سال چهاردهم، شماره‌های ۵۳ و ۵۴، پاییزو زمستان
۱۴۰۱
صفحات: ۶۳ تا ۷۷

دو فصلنامه علمی
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

Increasing the Total Throughput and Zeroing the Request Rejection (Outage) in a Cellular Network

Mohsen Seyyedi Saravi[*] , Mohammadreza Binesh Marvasti[**] , Seyyed Amir Asghari Tochaei[**], Seyyedeh Leili Mir Taheri[**]

[*]Ph.D. Student, Faculty of Computer Engineering, Islamic Azad University (Qom Branch) Iran

[**]Department of Electrical and Computer Engineering, Kharazmi University, Iran

Abstract

Guaranteeing high-quality remote services in cellular networks requires considering important criteria such as throughput, power consumption, and interference in these networks. Regarding the ever-existing limitations in sending power, in terms of hardware and battery limitations and regulatory laws in the real world, the preset study develops a framework to optimize these criteria by assuming. In this process, the limitation of the sending power of mobile nodes in a Wireless cellular network is taken into account. To this end, a novel method is proposed by reviewing the existing methods and comparing their advantages and disadvantages. The method is analytically modeled and then simulated in the MATLAB environment. The previous methods either increase the throughput by assuming an unlimited transmission power or prevent access of some nodes to the communication service. The simulation results showed that the proposed algorithm increases throughput by 27% and reduces the power consumption of mobile nodes in the network to a quarter. Moreover, it works such that no node does not lose its communication service.

Keywords: cellular network, throughput, power consumption, outage

افزایش مجموع گذردهی و به صفر رساندن رد درخواست در یک شبکه سلولی

محسن سیدی ساروی [*]، محمدرضا بینش مروستی[**]، سید امیر اصغری [**] سیده لیلی میرطاهری[**]

[*]دانشجوی دکترا ، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قم
[**]دکترا ، گروه مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه خوارزمی
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۸ تاریخ پذیرش:۱۴۰۱/۰۵/۲۴

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

تضمین کیفیت ارائه سرویس‌های از راه دور در شبکه‌های سلولی، نیازمند توجه به معیارهای مهمی مانند گذردهی، مصرف توان و تداخل در این شبکه‌هاست. از آنجاییکه همیشه محدودیت در توان ارسال چه از نظر محدودیت‌های سخت افزاری و باتری و چه از نظر قوانین رگولاتوری در دنیای واقعی وجود دارند، در این مقاله یک چارچوب برای بهینه ساختن این معیارها با فرض محدودیت توان ارسال گره‌های متحرک در یک شبکه سلولی بی‌سیم ارائه می‌گردد. برای ارائه این چارچوب، ابتدا بعد از مطالعه روش‌های موجود و مقایسه معایب و مزایای آنها، یک ایده جدید مطرح شد و بعداز اثبات فرمولی این ایده، مراحل شبیه‌سازی آن در نرم افزار متلب انجام گردید. روش‌هایی که تاکنون ارائه شده بودند، یا با فرض نامحدود بودن توان ارسال، گذردهی را افزایش می‌دادند و یا باعث عدم دستیابی برخی از گره‌ها به سرویس ارتباطی می‌شدند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی، علاوه بر افزایش ۲۷ درصدی گذردهی، مصرف توان گره‌های متحرک در شبکه را هم به یک چهارم کاهش می‌دهد و همچنین به شکلی عمل می‌کند تا هیچ گره‌ای، سرویس ارتباطی خود را از دست ندهد.

واژگان کلیدی: شبکه سلولی، گذردهی، مصرف توان، رد درخواست

۱. مقدمه

ارتباطات به بزرگترین انگیزه برای توسعه فناوری در قرن ۲۱ تبدیل شده است. توسعه ارتباطات به تجارت، صنعت، فرهنگ و روابط بین انسان‌ها کمک می‌کند. از نظر فنی، جنبه‌های مختلفی در این ارتباط حائز اهمیت می‌باشد. دستگاه‌های ارتباطی مانند گوشی‌های هوشمند، معمولاً بی‌سیم هستند و بنابراین ملاحظات خاصی برای آنها وجود دارد، مانند اهمیت مصرف انرژی، محدودیت باتری، و مسایل امنیتی. یکی از معیارهای مهم در کارایی یک سیستم ارتباطی شامل چندین کاربر، مجموع گذردهی آن سیستم است که شاخصی برای اندازه‌گیری بهره‌وری و ضمانت کیفیت سرویس در آن شبکه می‌باشد. گذردهی در یک سیستم ارتباطی، با جنبه‌های مختلفی از سیستم مانند کیفیت کانال، نویز محیط، توان ارسال سیگنال، محدودیت‌های رگولاتوری در توان ارسال سیگنال، فرکانس و

نویسنده مسئول: محمدرضا بینش مروستی m.seyyedi@aut.ac.ir

الگوریتم‌های مورد استفاده در دستگاه، ارتباط دارد. با توجه به اهمیت گذردهی یک سیستم شامل دستگاه‌های ارتباطی و تلفن‌های هوشمند که عموماً در شبکه‌های سلولی باهم ارتباط برقرار می‌کنند، هم از نظر ارتقاء کیفیت کانال جهت دریافت و ارسال داده و هم از نظر محدودیت انرژی برای ارسال پیغام با توجه به بی‌سیم بودن این سیستم‌ها، ارائه روشی برای افزایش گذردهی، کاهش مصرف توان و نیز کاهش رد درخواست با استفاده از کنترل توان پویا توسط هر گره، اهمیت پیدا می‌کند. منظور از کنترل توان پویا، تغییر توان ارسال سیگنال بصورت لحظه‌ای، به منظور حفظ پایداری سیستم و همچنین استفاده حداکثری از ظرفیت کانال برای ارسال پیغام است. این افزایش توان باید به شکلی باشد تا نویز و تداخل غیرقابل کنترل روی سایر دستگاه‌هایی که در این سیستم قرار دارند، ایجاد نشود. موارد فوق نشان می‌دهد که ضرورت استفاده از روش‌ها و ابزارهای جدید برای افزایش بهره‌وری در این حوزه، دارای اهمیت است. روش پیشنهادی در این مقاله به گره‌های بی‌سیمی که در یک شبکه سلولی قرار دارند، اجازه می‌دهد تا با حداکثر توان ارسال، البته تا جاییکه منجر به ایجاد تداخلی بیش از حد تحمل گره‌های دیگر نشود و باعث قطع شدن ارتباط سایر گره‌ها با شبکه نگردد، گذردهی خود را بالا برده و در نتیجه گذردهی کل سیستم افزایش یابد. در روش‌های قبلی، معمولاً یک جنبه مانند نرخ رد درخواست گره‌ها در شبکه و یا افزایش گذردهی شبکه بدون توجه به محدودیت‌های فیزیکی مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. در روش پیشنهادی ما، علاوه بر اینکه سه معیار افزایش گذردهی، به صفر رساندن نرخ رد درخواست گره‌های موجود در شبکه و کاهش مصرف انرژی در نظر گرفته شده است، محدودیت‌های مربوط به توان بیشینه نیز لحاظ گردیده است. روش پشنهادی در فاز مقدماتی از روش‌ها و الگوریتم‌های پیشین استفاده می‌کند، اما در جاییکه ادامه کار منجر به رد درخواست برخی از گره‌ها و یا استفاده از توان غیرمجاز یا غیرعملی توسط برخی از گره‌ها می‌شود، از فرمول پیشنهادی که در همین مقاله مورد اثبات قرار گرفته است استفاده می‌کند تا برخلاف روش‌های قبل، بتواند در هر سه معیار مورد نظر که در بالا به آنها اشاره گردید، بهبود ایجاد نماید. اثبات فرمولی در این مقاله منجر به ارائه فرمول جدید محاسباتی شده است و نتایج شبیه‌سازی‌هایی که با داده‌های یکسان بین الگوریتم‌های پیشین و روش پیشنهادی در محیط MATLAB انجام گرفته است، صحت نتایج را ثابت می‌کند.

۱-۲. بیان مساله

کاربرانی که باهم در یک شبکه سلولی قرار دارند و با گوشی‌ها و دستگاه‌های هوشمند باهم به تبادل پیغام می‌پردازند، بصورت تصادفی در یک محیط محدود پراکنده شده و با ارتباط بی‌سیم، یک شبکه را تشکیل می‌دهند و مجهز به باتری برای تامین انرژی مصرفی می‌باشند. منظور از محیط محدود، یک سلول مخابراتی است که امروزه در شبکه‌های سلولی مخابراتی مورد توجه قرار می‌گیرد. یکی از اهدف این تحقیق، افزایش گذردهی این سیستم بوسیله کنترل توان هر کاربر است. می‌توانیم از کلمه گره[۲] بجای کاربر استفاده - کنیم. هر گره، وقتی پیغامی را در قالب یک سیگنال ارسال می‌کند، SINR[۳] خودش را دارد. یکی از معیارهای مهم در ارزیابی کارایی یک سیستم ارتباطی شامل چندین کاربر، مجموع گذردهی آن سیستم است که شاخصی برای اندازه‌گیری بهره‌وری و ضمانت کیفیت سرویس در آن شبکه می‌باشد. گذردهی در یک سیستم ارتباطی، با جنبه‌های مختلفی مانند کیفیت کانال، نویز محیط، توان ارسال سیگنال، محدودیت‌های رگولاتوری در توان ارسال سیگنال و فرکانس و همچنین الگوریتم‌های مورد استفاده در دستگاه، ارتباط دارد. مجموع SINR تمام گره‌ها بعنوان شاخصی از گذردهی کل سیستم است که دستیابی به کیفیت مناسبی از سرویس را نشان می‌دهد. ابهامات مساله، عبارتست از چگونگی پراکندگی گره‌ها، متفاوت بودن SINR آنها و تغییراتی که ممکن است در SINR بسته به نوع کاربرد ایجاد شود، اولویت‌بندی گره‌ها برای دسترسی به کانال که می‌تواند کاربردهای متنوعی برای این نوع شبکه‌ها را تعریف نماید. تفاوت در SINR از آنجا ناشی می‌شود که کیفیت سرویس در سرویس‌های مختلف، باهم فرق دارد. مثلاً تضمین کیفیت شبکه برای انتقال یک فایل در مقایسه با تضمین کیفیت شبکه برای برقراری یک مکالمه تصویری بین دو کاربر، باهم متفاوت است. متغییرهای اصلی عبارتند از توان ارسال داده توسط هر گره، بهره‌مسیر و نیز تداخل کل سیستم بر روی یک گره و تداخلی که یک گره برای سایر گره‌ها ایجاد می‌کند، تداخل موثر، SINR و نویز محیط که بسته به شرایط کاربرد و محیط های مختلف کاری، متغییر است. در این میان، مدیریت تداخل نیز بسیار مهم است، زیرا اگر مدیریت نشود، بیشتر از دو گره نمی‌توانند باهمدیگر ارتباط برقرار کنند. هرچه فاصله دو گره که باهم ارتباط بی‌سیم دارند بیشتر شود، تضعیف سیگنال نیز بیشتر خواهد بود. در حالت متمرکز، باید سیگنال‌های کنترلی از مرکز ارسال شود و پهنای

[2] Node

[3] Signal-to-Interference and Noise Ratio

باند را اشغال می‌کند و نیاز به همزمانی نیز دارد. بنابراین اگر سیستم توزیع‌شده باشد نیاز به هماهنگی از یک گره مرکزی نداشته و از سربار شدن سیگنال‌های کنترلی، ایجاد گلوگاه در مدیریت و سایر مسایل اجتناب می‌شود.

۱-۳. فرضیه های تحقیق

فرضیه‌های این تحقیق عبارتند از:

۱. دستگاه‌های هوشمند یا گره‌ها، بصورت تصادفی و توزیع پواسون در یک سلول مخابراتی پراکنده شده‌اند و بهره مسیر متفاوتی از هم دارند.

۲. گره‌های موجود در یک شبکه سلولی مخابراتی، می‌توانند با کنترل پویای توان ارسال سیگنال، نسبت به افزایش SINR خود و بهبود کیفیت ارتباطات، اقدام کنند.

۳. افزایش توان ارسال سیگنال گره‌ها، می‌تواند باعث ایجاد تداخل و نویز روی ارتباط سایر گره‌های موجود در آن سلول و یا حتی سلول‌های مجاور در شبکه شود.

۴. افزایش گذردهی کل سیستم در یک شبکه سلولی مخابراتی، باید بدون حذف سایر گره‌های ضعیف‌تر (از نظر کیفیت کانال ارتباطاتی و یا از نظر وضعیت باتری) انجام شود.

۵. باید یک مصالحه بین توان ارسال سیگنال، توان و مصرف باتری و همچنین تداخل و نویز قابل تحمل در محیط برای دستیابی به بهترین گذردهی در سیستم برقرار شود.

۱-۴. روش تحقیق

در این مقاله، ایده اصلی با استفاده از فرمول‌های ریاضی، اثبات می‌شود. برای تایید نتایج عملی، کدنویسی و شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی برمبنای اثبات فرمولی، در نرم افزار MATLAB انجام شده است. داده‌های مورد نیاز در شبیه‌سازی، توسط توابع تصادفی با توزیع پواسون، در نرم افزار MATLAB در بازه‌های منطقی تولید شده و عملیات شبیه‌سازی الگوریتم قبلی و پیشنهادی، با همان داده‌ها انجام شده‌است. نتایج حاصله از شبیه‌سازی، در پارامترهای مورد نظر تحقیق مانند مجموع گذردهی سیستم، مصرف توان و رد درخواست با نتایج حاصل از شبیه‌سازی الگوریتم قبلی با همین دیتاست موجود، مقایسه گردیده است.

ادامه این مقاله به‌صورت زیر سامان‌دهی شده است:

در بخش دوم، کارهای پیشین مورد بررسی و مرور قرار می‌گیرد و در بخش سوم، مدل سیستم ارائه می‌شود. در بخش چهارم، الگوریتم‌های فعلی مرتبط با موضوع مقاله بیان شده و در بخش پنجم، روش پیشنهادی ارائه و بعداز اثبات فرمولی، شبیه‌سازی می‌شود و نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد، و در نهایت در بخش ششم، نتیجه‌گیری تحقیق بیان می‌شود.

۲. کارهای پیشین

فعالیت‌های مختلفی برروی ارزیابی و یا افزایش گذردهی در پروتکل‌های ارتباطی بی‌سیمِ شبکه‌های سلولی انجام شده‌است. در طول دهه ۹۰، تحقیقات زیادی انجام گرفت و نتیجه این شد که با استفاده از روش‌های متمرکز و نه توزیع‌شده، می‌توان به بهینه سازی روش‌های کنترل توان ارسال توسط گره‌ها برای دستیابی به SINR مورد نظر دست یافت.

در پژوهشی در سال ۲۰۱۰، روش‌های اصلی کنترل توان ردیاب هدف SINR پویای توزیع‌شده از جمله TPC[4] و OPC[5] بصورت دقیق بررسی شده‌اند [۱] و سپس با استفاده از مزیت هرکدام از این روش‌ها، روش جدیدی به نام DTPC[6] معرفی گردیده‌است. این روش جدید، علاوه بر اینکه دستیابی تمام گره‌ها به SINR هدف را تضمین می‌کند، بلکه حداکثر توان کل سیستم و بهینه‌سازی آن را نیز فراهم می‌نماید. ضعف این روش در این است که توان ارسال گره‌ها به‌صورت نامحدود درنظر گرفته شده‌است، درحالی‌که در عمل، محدودیت‌های سخت‌افزاری و رگولاتوری وجود دارد. در این مقاله [۲]، یک طرح DTPC ساده اما جدید برای نقاط دسترسی 802.11n ارائه شد. کاهش توان ارسال، تداخل در سلول مورد نظر و سلول‌های مجاور را کاهش می دهد و از این رو مزایایی را برای همه WLAN های مجاور ایجاد می‌کند. طرح DTPC در یک شبیه‌ساز مورد آزمایش قرار گرفت و مزایای نظری فوق مورد تأیید قرار گرفت. در [۳] مشکل حذف تدریجی کاربران در شبکه‌های بی‌سیم در جایی‌که تعداد اندکی از گره‌ها باید حذف شوند تا سیستم برای سایر گره‌ها پایدار باشد مطرح شد و یک روش کنترل توان توزیع‌شده با حذف موقت و بررسی پایداری سیستم DFC[7] ارائه گردید. این روش از دست دادن گره‌ها

[4] Tracking Power Control

[5] Opportunistic Power Control

[6] Dynamic Target-SIR Tracking Power Control

[7] Distributed power control algorithm with temporary removal and Feasibility Check

در یک سیستم را به مقدار کمینه می‌رساند و مصرف توان ارسال را نیز در گره‌ها کاهش می‌دهد. در تحقیق دیگری، صرفه‌جویی در مصرف باتری گره‌ها با توجه به محدودیت ظرفیت ذخیره‌سازی باتری در شبکه‌های بی‌سیم مورد توجه قرار گرفت و یک راهبرد کنترل توان برخط نیز ارائه گردید [۴]. در مقاله دیگری در سال ۲۰۱۸، کنترل توان بهینه در کانال‌های دسترسی چندگانه گاوسی غیرمتمرکز مورد بررسی گرفت، به طوری که میانگین توان مصرف شده توسط گره‌ها در کل سیستم، حداکثر باشد [۵].

در سال ۲۰۲۰، کاری مشابه تحقیق ما انجام گرفت، اما با این روش که ایستگاه‌های پایه[8] که در شبکه‌های سلولی ثابت هستند، بصورت متحرک و با استفاده از فناوری پهباد، متحرک در نظر گرفته شدند [۶]. این پهبادها با دریافت اطلاعات دستگاه‌ها برای حل ۳ مشکل فرعی شامل ارتباط کاربران، تخصیص منابع و محل قرارگیری ایستگاه پایه، با استفاده از الگوریتمی مبتنی بر روش جریمه و بهینه-سازی متوالی محدب[9] بعنوان روش پیشنهادی فعالیت می‌کنند. در نهایت حتی با افزوده شدن تعداد این ایستگاه‌ها یا پهبادها، سربار حاصل از افزونگی ارتباطی به علت تبادل پیغام بالای این روش در شبکه، از حد مورد قبول فراتر رفت. درهمین سال مقاله دیگری شبکه‌های ارتباطی بی‌سیم با مجموعه‌ای از گره‌ها را در نظر گرفت که به یک هاب متصل می‌باشند. نویسندگان این مقاله فرض کردند که انرژی این گره‌ها، از طریق انرژی فرکانس رادیویی تامین می‌شود و هدف آن به حداکثر رساندن گذردهی گره‌ها در این سیستم است. در این سیستم برای کاهش مصرف انرژی، تداخل‌ها شناسایی و مدام برطرف می‌شود. نتایج شبیه‌سازی و اثبات فرمولی در این تحقیق نشان داد که این راه حل، فعلاً غیر قابل اجراست [۷].

در مقاله‌ای دیگر، یک سیستم با چند گره در نظر گرفته شده و تمرکز این تحقیق نیز بر مصرف باتری و دوام آن قرار داده شده است [۸]. هر دستگاه با یک باتری و با ظرفیت محدود در این سیستم قرار گرفت. حداکثر توان عملیاتی و جمع حداکثر توان مصرفی بعنوان دو مشکل برای بهینه‌سازی سیستم معرفی شدند. شبیه‌سازی‌های عددی در این تحقیق نشان داد که با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی، توان عملیاتی مورد انتظار از سیستم بالا می‌رود. در این تحقیق، مصرف باتری کم شده و در نتیجه تعداد گره‌هایی که در محیط قرار دارند و به شبکه متصل شده‌اند افزایش می‌یابد، در حالیکه در روش پیشنهادی ما در این مقاله، تمرکز بر افزایش گذردهی و افزایش توان عملیاتی تا حد ممکن و در راستای افزایش گذردهی و عدم حذف گره ضعیف از سیستم قرار گرفته است.

در این مطالعه [۹]، طرح کنترل توانی پیشنهاد شده است که در آن ابتدا الزامات کاربر اولویت‌دار برآورده شده و سپس تا حد امکان تعداد زیادی از کاربران عادی به SINR های هدف خود می‌رسند. علاوه بر این، اگر یک کاربر عادی به SINR هدف خود رسیده باشد، نیازی به به‌روز رسانی سطح توان ارسال خود ندارد، بلکه فقط کاربران عادی که به SINR هدف خود نرسیده باشند، سطح توان ارسال خود را افزایش می‌دهند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد طرح پیشنهادی از نظر مصرف توان و کارایی بهتر از TPC و در شرایط خاصی نیز بهتر از OPC عمل می‌کند.

در پژوهش دیگری [۱۰]، تخصیص توان در شبکه های سلولی با در نظر گرفتن محو شدن ناکاگامی[10] پیشنهاد شده است. محو شدن ناکاگامی برای پراکندگی چند مسیری در خوشه‌های متفاوتی از امواج منعکس شده رخ می‌دهد. در هر خوشه، فازهای تک تک امواج منعکس شده تصادفی هستند، اما زمان تاخیر تقریباً برای همه امواج برابر است. هدف این پژوهش بهینه‌سازی مصرف انرژی دستگاه‌ها و گذردهی شبکه با توجه به محدودیت‌های احتمال رد درخواست است و در آن الگوریتم‌های تخصیص توان برای به حداکثر رساندن توان و بهره‌وری انرژی و با روش دیفرانسیل و تفریقی و تکرار شوندگی ارائه شده است.

در مقاله دیگری [۱۱] احتمال رد درخواست و نسبت SINR بعنوان مشکلات تخصیص توان در نظر گرفته شده و با استفاده از نظریه Perron-Frobenius و برنامه نویسی هندسی (GP[11]) به ارائه راه حل پرداخته است. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد طرح‌های تخصیص توان پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به کنترل توان ردیابی SINR هدف نسبت به الگوریتم‌های TPC، OPC و DFC دارد. اما الگوریتم DTPC که شکل کامل‌تر و بهینه‌تر این الگوریتم‌ها می‌باشد، در این مقاله مورد بررسی و مقایسه قرار نگرفته است. در حالیکه ما در این

[8] Base station

[9] Successive convex optimization

[10] Nakagami fading

[11] Geometric Programming

پژوهش با تمرکز بر بهینه‌ساختن DTPC، روش پیشنهادی خود را ارائه می‌دهیم.

۳. مدل سیستم

۳-۱. تداخل[12]

تداخل به این معنی است که توان یک گره در گره دیگر، اثر منفی داشته باشد. در CDMA[13] هم در مدل تک سلولی و هم در مدل چند سلولی تداخل وجود دارد. زیرا حامل‌ها در فضای کد از هم جدا هستند و در فضای زمان و فرکانس، باهم یکی می‌باشند. بنابراین گره‌های داخل یک سلول هم بر روی هم تداخل دارند.

۳-۲. کنترل توان

در شبکه‌های ارتباطی بی‌سیم، مساله کنترل توان از دو جنبه اهمیت دارد، اول اینکه گره‌ها متحرک هستند و برای تامین انرژی به برق شهر متصل نمی‌باشند، دوم اینکه تغییرات در توان ارسال، از نظر تداخل بر روی گره‌ها دیگر حایز اهمیت است. زیرا بر روی کیفیت سرویس آنها تاثیر می‌گذارد. در این مقاله برای بررسی اثر توان ارسالی یک گره بر روی سایر گره‌ها، یک مدل تک سلولی را در نظر گرفته شده که در آن از روش CDMA استفاده می‌شود.

۳-۳. توان ارسال[14] و توان بیشینه

اندازه توان ارسال، تداخل و سایر معیارهای موثر در موضوع مورد نظر با روابط ریاضی نشان داده می‌شوند. توان ارسال با p_i و توان بیشینه، با p_{max} نشان داده می‌شود. توان ارسالی هر گره، باید عددی مثبتی بوده و از صفر بزرگتر باشد و مقدار آن نمی‌تواند از مقدار p_{max} بزرگتر باشد ($0 \le p_i \le p_{max}$). توان ارسالی بیشینه، مقداری است که سیستم به‌علت مقرراتی که رگولاتور تعیین کرده و یا محدودیت‌های سخت‌افزاری، قادر به افزایش توان بیشتر از آن نمی‌باشد. توان دریافتی و یا اثر توان در گیرنده، با φ_i نشان داده می‌شود و طبق رابطه (۱)، از ضرب بهره‌مسیر[15] در توان ارسالی محاسبه می‌شود:

$$\varphi_i = h_i p_i \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، بهره‌مسیر با h_i و توان ارسال با p_i نشان‌داده می‌شود. تداخلی که برروی هر گره و یا هر کاربر وجود دارد، مجموع توان دریافتی سایر گره‌هاست که با $\sum_{i\neq j} P_j h_j$ نشان داده می‌شود. بنابراین، اگر مجموع توان دریافتی همه گره‌ها، به جز گره گیرنده محاسبه شود، و مقدار آن با نویز موجود در محیط که با δ^2 نمایش داده می‌شود جمع گردد، تداخل ایجاد شده روی گره یا کاربر مورد نظر با رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۱]:

$$I_i(p) = \sum_{i\neq j} P_j h_j \quad + \delta^2 \qquad (۲)$$

۳-۴. محدودیت در توان ارسالی

برخی از محدودیت‌ها در افزایش توان ارسال، وابسته به فناوری یا رگولاتوری و یا بر اثر سایر معیارها مانند عدالت[16] در ارائه سرویس به همه گره‌ها می‌باشد. گاهی محدودیت‌ها، وابسته به فناوری یا رگولاتوری نیستند، ولی به ذات خود سیستم برمی‌گردد و نامحدود بودن توان ارسال امکان‌پذیر نیست.

بنابراین از قید $0 \le p_i \le p_{max}$ در مسایل و الگوریتم‌ها استفاده می‌شود. بهره‌مسیر در هیچ شرایطی منفی نمی‌شود. از این محدودیت در تعریف شبکه بی‌سیم با تداخل محدود[17] استفاده می‌شود. اگر حد بالا در نظرگرفته نشود و p_i افزایش زیادی پیدا کند، برای سایر گره‌ها تداخل ایجاد می‌شود. اگر توان بی‌نهایت بشود، بازهم محدودیت پایین وجود دارد و ممکن است دسترسی به SINR قابل قبول برای تمام گره‌ها امکان‌پذیر نباشد.

۳-۵. سطح سیگنال دریافتی

معیار SINR، سطح سیگنال دریافتی گره i است که از توان دریافتی گره تقسیم بر تداخلی که سایر گره‌ها ایجاد می‌کنند بعلاوه نویز محیط که با δ^2 نشان داده می‌شود، بدست می‌آید. نسبت سیگنال به تداخل یا SINR در گره i با معیار γ_i در رابطه (۳) نشان داده شده است [۱]:

$$\gamma_i = \frac{P_i h_i}{\sum_{i\neq j} P_j h_j \quad + \delta^2} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، توان ارسال در بهره‌مسیر کاربر i، در صورت کسر و مجموع تداخل محیط شامل نویز موجود در محیط و اثر توان دریافتی

[12] Interference
[13] Code-Division Multiple Access
[14] Transmit power
[15] Path gain
[16] Fairness
[17] Interference limited wireless networks

سایر گره‌ها به جز خود گره مورد نظر در مخرج کسر قرار می‌گیرد. با جایگذاری رابطه تداخل $I_i(p)$ در رابطه (۳)، رابطه (۴) که شکل ساده شده رابطه (۳) است، بدست می‌آید [۱]:

$$\gamma_i = \frac{P_i h_i}{I_i(p)} \quad (۴)$$

اگر بهره‌مسیر ثابت باشد، برای افزایش SINR گره باید تداخل کم شده و توان آن افزایش یابد و در نتیجه کیفیت سرویس بالاتر می‌رود. کیفیت سرویس، تابعی از SINR است. هرچه SINR بالاتر باشد، خطا کمتر و کیفیت سرویس بالاتر است. پس کنترل توان نقش کلیدی در تضمین کیفیت سرویس برای یک گره است که می‌تواند اثر مثبت برای خود و نتیجه منفی برای سایر گره‌ها داشته باشد. اگر گره i توان خود را افزایش دهد، برای کاربر j تداخل ایجاد می‌کند.

۳-۶. تداخل موثر[18]

معیار مهم دیگری به نام تداخل موثر وجود دارد که با R نشان‌داده می‌شود که در رابطه (۵) با تقسیم تداخل بر بهره‌مسیر بدست می‌آید [۳]:

$$R_i(p) = \frac{I_i(p)}{h_i} \quad (۵)$$

از معیار تداخل موثر برای سنجش کیفیت محیط انتقال یا کانال استفاده می‌شود. هرچه تداخل موثر کمتر باشد، به‌معنی تداخل کمتر یا بهره‌مسیر بیشتر است و در نتیجه نشان دهنده کانالی با وضعیت بهتر است.

۳-۷. معیارهای کارآیی[19]

در این بخش، برخی از معیارهای مهم در سنجش میزان کارآیی الگوریتم‌های شبکه‌های سلولی به منظور راستی آزمایی الگوریتم پیشنهادی بررسی می‌شوند.

۳-۸. گذردهی[20]

یکی از معیارهای کارآیی، تعریف گذردهی گره است و به‌صورت تابعی از γ_i نشان داده‌می‌شود که با افزایش γ، مقدار آن افزایش یافته و در نتیجه باعث افزایش کیفیت سرویس می‌شود. گذردهی سیستم که به‌صورت مجموع گذردهی همه گره‌هاست، معیار مهمی در سنجش کارآیی الگوریتم‌ها می‌باشد.

۳-۹. مجموع توان ارسالی

مجموع توان ارسالی نیز معیار مهمی بشمار می‌رود. در برخی موارد، معیار مجموع توان مصرفی، بر معیارهای دیگر مانند مجموع گذردهی سیستم ترجیح پیدا می‌کند. بنابراین الگوریتم‌ها براساس معیارهای مورد نظر، سنجیده شده و هر کدام در شرایط خاصی اولویت پیدا می‌کند.

۳-۱۰. احتمال رد درخواست[21]

احتمال رد درخواست که به آن نرخ قطع‌شدن نیز گفته می‌شود، به این معنی است که گره شماره یک، دو و سه، به ترتیب کیفیت سرویس γ_1 ، γ_2 و γ_3 را درخواست می‌کنند و برخی از گره‌ها، به $\bar{\gamma}$ های خود نمی‌رسند. یعنی برخی از گره‌ها از مجموع m گره، که γ_j آنها بزرگتر از $\bar{\gamma}$ بود، گره‌های حمایت‌شده[22] نامیده می‌شوند، و گره‌های حمایت نشده[23] نیز با علامت پریم نشان‌داده می‌شوند که تعداد آنها برابر با مجموع کل گره‌ها منهای گره‌های حمایت شده-است. تعداد گره‌های حمایت نشده تقسیم بر تعداد کل گره‌ها، نرخ رددرخواست است که هرچه کمتر باشد، نشان می‌دهد که الگوریتم کارآیی بیشتری دارد. گذردهی گره i با رابطه (۶) محاسبه می‌شود [۱] که در آن W پهنای باند کانال می‌باشد:

$$T_i(p) = W\ log_2(1 + \gamma_i(p)) \quad (۶)$$

گذردهی کل سیستم رابطه (۷) بدست می‌آید [۱]:

$$T(p) = \sum_{i \epsilon M} T_i(p) \quad (۷)$$

مجموع توان ارسالی در سیستم برابر با $\sum_{i \epsilon M} p_i$ است. احتمال رد درخواست در رابطه (۸) نشان داده شده است [۳]:

$$O(p) = \frac{|S'(p)|}{|M|} \quad (۸)$$

[18] Effective interference

[19] Performance measures

[20] Throughput

[21] Outage probability

[22] Supported

[23] Non supported

Where $S(p) = \left\{ j \epsilon M \middle| \gamma_i(p) \geq \overline{\gamma_J} \right\}$, $S'(p) = M - S(p)$

در این شرایط ممکن است با اخراج چند گره از شبکه، سیستم قابل امکان‌پذیر بودن[24] گردد و مقدار رددرخواست به صفر برسد. در برخی موارد، مجموع توان ارسالی گره‌ها نیز می‌تواند هدف باشد.

۴. الگوریتم‌های کنترل توان

بهترین الگوریتم‌های کنترل توان، الگوریتم‌هایی هستند که در هر بازه زمانی، هر گره توان خود را بر اساس تابعی بنام تابع روزآمدکردن توان مصرفی[25] تنظیم می‌کند. این تابع در روابط ریاضی با علامت $f_i(p)$ نشان داده می‌شود. الگوریتم کنترل توان در رابطه (۹) محاسبه شده است [۳]:

$$p_i(t+1) = f_i(p(t)) \qquad (۹)$$

که در این رابطه، $p_i(t)$ نشان‌دهنده توان ارسال در زمان فعلی و $p_i(t+1)$ نشان‌دهنده توان ارسال در زمان بعد است. الگوریتم کنترل توان به‌صورت محدود دررابطه (۱۰) نشان داده شده است [۳]:

$$p_i(t+1) = min\{p_{max}, f_i(p(t))\} \qquad (۱۰)$$

که در این رابطه، $p_i(t)$ نشان‌دهنده توان ارسال در زمان فعلی، $p_i(t+1)$ نشان‌دهنده توان ارسال در زمان بعد و p_{max} نشان-دهنده حداکثر توانی است که گره می‌تواند با آن ارسال نماید. در این رابطه، نشان‌داده شده‌است که گرهi، توان ارسال لحظه قبل را دارد. به این معنی که گره، مقدار توان خود در لحظه t را می‌داند و لذا توان خود در لحظه $t+1$ را به‌وسیله تابع f_i محاسبه می‌کند. در این حالت، با داشتن f_i، مساله حل می‌شود. در دو رابطه بالا، هم توان نامحدود و هم توان محدود برای ارسال درنظر گرفته شده‌است. اگر توان بیشینه محدود درنظر گرفته‌شود، یک توان ارسال کمینه بین p_{max} و $f_i(p(t))$ درنظر گرفته‌شده و در واقع یک محدودیت به آن اعمال گردیده‌است.

۴-۱. الگوریتم کنترل توان ردگیر SINR هدف (TPC)

این الگوریتم به‌صورت توزیعی کار می‌کند و حداقلِ توان، باید مساوی یا بزرگتر از صفر درنظر گرفته‌شود. اما قیدی برای این الگوریتم وجود دارد. این قید باعث می‌شود تا SINR برای تمام گره‌ها، مساوی یا بزرگتر از SINR هدف آن گره باشد. در این حالت، گره باید توان ارسال را به شکلی تنظیم کند تا آن قید تامین شود. بنابراین توان مصرفی تا زمان رسیدن به SINR هدف، افزایش‌یافته و بعداز رسیدن به آن، ثابت باقی می‌ماند. مجموع توان ارسالی هر گره بصورت $\sum_i P_i$ نشان‌داده می‌شود. قید بزرگتر بودن $\gamma_i(p)$ هر گره از مقدار $\overline{\gamma_i}$ برای اینکه گره به SINR هدف برسد، بصورت $\gamma_i(p) \geq \overline{\gamma_i}$, $\forall_i \in M$ نشان‌داده می‌شود.

مقادیر $\gamma_i(p)$ به ازای هر گره از ۱ تا M باید این قید را برآورده سازند.

$$\gamma_i = \frac{P_i h_i}{\sum_{i \neq j} P_j h_j \quad + \ \delta^2} = \frac{P_i h_i}{I_i(p)} = \overline{\gamma_i} \qquad (۱۱)$$

$$P_i = \overline{\gamma_i} \frac{I_i(p)}{h_i} \qquad (۱۲)$$

$$P_i(t+1) = \overline{\gamma_i} \frac{I_i(p(t))}{h_i} \qquad (۱۳)$$

از روابط (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) برای محاسبه توان ارسالی هر گره در لحظه مورد نظر براساس میزان تداخل، بهره‌مسیر و مقدار $\overline{\gamma_i}$ آن استفاده می‌شود [۱]. این رابطه به‌صورت یک حلقه برای هر گره به‌صورت جداگانه اجرا می‌شود تا هر گره بتواند توان ارسالی خود را تنظیم نماید.

TPC در حالت ارسال با توان نامحدود از رابطه (۱۴) بدست می‌آید [۱]:

$$P_i(t+1) = \overline{\gamma_i} \frac{I_i(p(t))}{h_i} \qquad (۱۴)$$

TPC در حالت ارسال با توان محدود نیز از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود [۱]:

[24] Feasible

[25] Power updating function

$$p_i(t+1) = min\{p_{max}\ , \overline{\gamma_i}\frac{I_i(p(t))}{h_i}\} \qquad (۱۵)$$

هنگامی‌که SINR هدف قابل حصول نباشد، الگوریتم TPC باعث می‌شود گره‌های حمایت نشده در توان بیشینه قرار گیرند و باعث کاهش عمر باتری می‌شود. همین عمل باعث می‌شود تعداد گره‌های حمایت نشده بیشتر شود. اگر یکی از این گره‌ها توان خود را صفر کند و کنار برود، ممکن است کاربر حمایت‌نشده دیگری به SINR هدف خود برسد.

۴-۲. الگوریتم کنترل توان فرصت‌طلبانه (OPC)

الگوریتم OPC یا کنترل توان به‌صورت فرصت‌طلبانه، برعکس TPC عمل می‌کند. یعنی هر گاه R_i که تداخل بر روی بهره‌مسیر است، افزایش پیدا کند، یعنی وقتی وضعیت کانال انتقال بد شود، گره هم توان خود را کم می‌کند و به سمت خروج از شبکه می‌رود. به همین دلیل باعث کاهش تداخل روی سایر گره‌ها شده و گذردهی سیستم افزایش می‌یابد. در مدل محدود بودن توان مصرفی، توان خود را افزایش می‌دهد. در توان بیشینه هم به علت وجود نویز، بازهم از نظر عددی محدودیت وجود دارد.. η_i ، مقدار ثابتی است که بسته به نوع شبکه و شرایط مساله، تعیین می‌شود. تابع توان در رابطه (۱۶) نشان داده شده است:

$$f_i(p(t)) = \frac{\eta_i}{R_i(p(t))} \qquad (۱۶)$$

OPC در حالت ارسال با توان نامحدود از رابطه (۱۷) بدست می‌آید:

$$P_i(t+1) = \frac{\eta_i}{R_i(p(t))} \qquad (۱۷)$$

OPC در حالت ارسال باتوان محدود از رابطه (۱۸) بدست می‌آید:

$$p_i(t+1) = min\{\overline{p_i}\ , \frac{\eta_i}{R_i(p(t))}\} \qquad (۱۸)$$

در این الگوریتم، گره‌ای که توان خود را کم‌کرده و از سیستم خارج شده‌است، نمی‌تواند به سیستم برگردد. زیرا سایر گره‌ها در شبکه که بهره‌مسیر مناسبی دارند، توان خود را افزایش داده و تداخل را برای بقیه افزایش می‌دهند. تنها در صورتی گره حذف شده به سیستم برمی‌گردد که یا به‌وسیله حرکت یا حذف موانع، بهره‌مسیر آن افزایش یابد و یا اینکه گره‌ای که در قله قرار دارد، از شبکه خارج شود. به همین دلیل به این الگوریتم، الگوریتم کنترل توان با روش فرصت-طلبانه گفته می‌شود. در OPC، گره‌ها با وضعیت کانالی خوب و بد تشخیص داده‌شده و گره‌ها با وضعیت کانالی بد، توان خود را کاهش داده و به سمت خروج از شبکه می‌روند. بروزرسانی تابع کنترل توان در الگوریتم OPC از رابطه (۱۹) بدست می‌آید [۱]:

$$p_i(t+1) = \frac{\eta_i}{R_i(p(t))} = \eta_i \frac{h_i}{I_i(p(t))} \qquad (۱۹)$$

که برابر است با رابطه (۲۰) [۱]:

$$p_i(t+1) = \eta_i \frac{\gamma_i(t)}{p_i(t)} \qquad (۲۰)$$

۴-۳. الگوریتم ردگیر پویای SINR هدف (DTPC)

با ترکیب TPC و OPC یک الگوریتم جدید بنام DTPC ارائه گردید [۱]. بعداز اینکه از رسیدن همه گره‌ها به حداقل SINR اطمینان حاصل شد، برای افزایش گذردهی سیستم، گره‌هایی که کانال بهتری دارند، توان خود را بصورت رابطه (۲۱) افزایش می‌دهند تا SINR آنها بیشتر شود و گذردهی سیستم بالاتر برود[۱].

$$f_i\big(p(t)\big) = \overline{\Gamma_i}(p(t))R_i(p(t)) \qquad (۲۱)$$

در رابطه (۲۱)، $p(t)$ توان ارسالی گره و $R_i(p(t))$ تداخل موثر آن است. معیار R_i^{th} نشان‌دهنده تداخل موثر در یک حدآستانه[۲۶] مورد نظر است که می‌تواند باعث تصمیم‌گیری الگوریتم DTPC برای استفاده از رابطه TPC یا OPC برای محاسبه توان ارسالی گره گردد. در این الگوریتم، یک حدآستانه در R_i در نظر گرفته می‌شود. اگر R_i گره از R_i حدآستانه کمتر باشد، یا به‌عبارت دیگر تداخل روی بهره‌مسیر از این حد کمتر باشد، این به معنی این است که گره وضعیت کانالی بهتری دارد و بنابراین از رابطه $\frac{\eta_i}{R_i^2(p(t))}$ استفاده می‌شود که همان الگوریتم OPC است. ولی اگر از حدآستانه دوم که وابسته به R_i یا وضعیت کانال است عبور کرد، و یا از یک R_i بیشتر

[26] Threshold

شد، دیگر ادامه OPC انجام نشده و طبق الگوریتم TPC عمل می-شود. پس در DTPC، SINR هدف در بخش OPC به‌صورت پویا است و به همین دلیل به آن SINR هدف بصورت پویا[۲۷] یا DTPC گفته می‌شود. هدف DTPC افزایش گذردهی سیستم است. بنابراین درنهایت منجر به افزایش توان می‌شود. DTPC با رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود [۱].

$$\overline{\Gamma_i}\big(p(t)\big)=\begin{cases}\dfrac{\eta_i}{R_i^{\,2}(p(t))}, & if\ R_i(p(t))<R_i^{\,th}\\ \overline{\gamma_i}, & if\ R_i(p(t))\geq R_i^{\,th}\end{cases} \qquad (۲۲)$$

پارامترهای الگوریتم عبارتند از $\overline{\gamma_i}$، $R_i^{\,th}$ و η_i. تابع باید پیوسته باشد. یعنی در R_i برابر با $R_i^{\,th}$، حد راست و حد چپ باید باهم برابر باشد. برای اینکه حدها باهم برابر باشند، باید $\frac{\eta_i}{R_i^{\,2}(p(t))}$، مساوی با $\overline{\gamma_i}$ باشد. بنابراین $R_i^{\,th}$ با رابطه (۲۳) قابل محاسبه است [۱]:

$$R_i^{\,th}=\sqrt{\frac{\eta_i}{\overline{\gamma_i}}} \qquad (۲۳)$$

نیازمندی‌های بروزرسانی این الگوریتم بصورت رابطه (۲۴) بیان می-شود [۱]:

$$P_i(t+1)=max\{\overline{\gamma_i}\frac{p_i(t)}{\gamma_i(t)}\ ,\eta_i\frac{\gamma_i(t)}{p_i(t)}\} \qquad (۲۴)$$

ردرخواست این الگوریتم در سیستم امکان پذیر، صفر است و با TPC تفاوتی ندارد. تفاوت اصلی TPC و DTPC در افزایش گذردهی سیستم است. گذردهی الگوریتم DTPC از الگوریتم OPC کمتر است، ولی از نظر ردرخواست نسبت به الگوریتم OPC بهتر شده‌است. الگوریتم DTPC با درنظر گرفتن توان نامحدود برای گره‌ها طراحی گردیده‌است. زیرا اگر توان به‌صورت محدود درنظر گرفته‌شود، ممکن است برخی از گره‌ها در ناحیه TPC باشند و برای اینکه به ناحیه OPC وارد شوند، مجبور باشند تا به‌صورت جهشی توان خود را افزایش بدهند. اگر محدودیت برای توان ارسال درنظر گرفته‌شود، این گره‌ها هیچ‌وقت نمی‌توانند از ناحیه TPC خارج شوند. ولی در عمل، باید محدودیت ارسال توان را به‌علت محدودیت-های سخت‌افزاری و رگولاتوری و اثر تداخلی آنها با یکدیگر درنظر گرفت. بنابراین در این مقاله الگوریتمی با توجه به سه الگوریتم TPC، OPC و DTPC پیشنهاد می‌گردد که در آن، ضعف‌هایی که در حالت ارسال با توان محدود در الگوریتم DTPC وجود دارد برطرف گردیده‌است.

۵. روش کاربردی برای حل مساله

اگر الگوریتم DTPC با توان ارسال محدود پیاده‌سازی شود، بعضی از گره‌ها به ناحیه OPC می‌روند و برخی دیگر در ناحیه TPC ارسال می‌کنند و ممکن است به علت محدودیت توان، نتوانند به SINR هدف خود برسند. برای اینکه این گره‌ها به SINR هدف خود برسند، یا باید توان خود را افزایش دهند که اگر در حال ارسال در توان بیشینه باشند، دیگر امکان افزایش توان ندارند، و یا اینکه باید وضعیت کانال برای آنها بهبود یابد و اینکار فقط با کاهش تداخل گره‌های با کانال قوی برروی گره‌های با کانال ضعیف امکان‌پذیر است. بنابراین راه‌حل پیشنهادی این است که گره‌هایی که کانالِ بهتری دارند و می‌توانند به ناحیه OPC بروند، توان خود را افزایش بدهند، اما نه با فرمول OPC. یعنی توان خود را به اندازه‌ای افزایش دهند که بقیه گره‌ها SINR هدف خود را از دست ندهند.

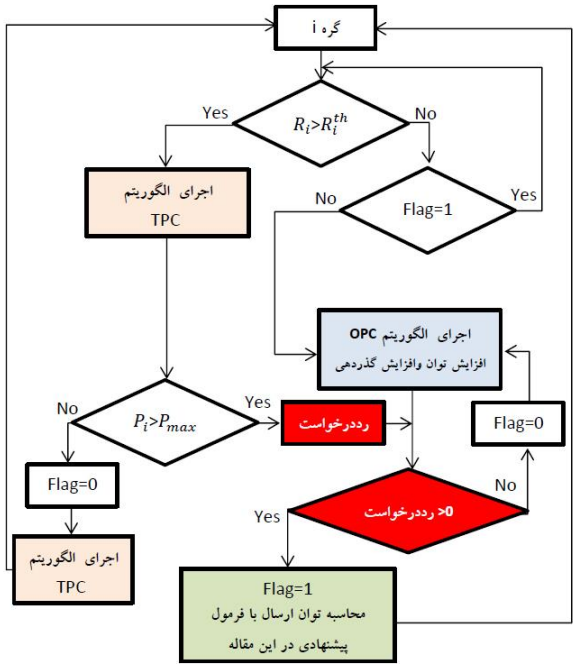
۵-۱. روش پیشنهادی

در روش‌های فعلی که در بخش ۴ گفته شد و با فرض محدود بودن توان ارسال، گره‌ای که به ناحیه OPC می‌رود، فقط در صورتی‌که همه گره‌ها به SINR خود رسیده باشند، می‌تواند توان خود را به اندازه‌ای که باعث حذف بقیه گره‌ها از دسترسی به SINR نشود، افزایش دهد. اما اگر گره‌ای هنوز به SINR هدف خود نرسیده باشد، حتی گره با کانالِ مناسب، همچنان باید با فرمول TPC توان خود را تغییر دهد تا تداخل بیشتری برای سایر گره‌ها ایجاد نکند. در روش پیشنهادی ما و با فرض همین محدودیت در توان ارسال گره‌ها، در صورتی‌که گره‌ای به ناحیه OPC وارد شود و بقیه گره‌ها هم به SINR رسیده باشند، می‌تواند به اندازه‌ای توان خود را بالا ببرد که بقیه، SINR خود را از دست ندهند و اگر این افزایش توان باعث شود تا گره‌ای SINR خود را از دست بدهد، گره i با فرمول پیشنهادی مقدار افزایش توان خود را به شکلی محاسبه می‌کند که گره ضعیف‌تر مجدداً به شبکه برگردد. این کار باعث می‌شود تا گذردهی سیستم به اندازه قابل توجهی بهبود یابد و رد درخواست نیز کاهش یابد.

[27] Dynamic target-SIR

روند اجرای الگوریتم پیشنهادی، در شکل (۱) به‌صورت فلوچارت نشان داده شده است. همه گره‌ها از جمله گره i در ابتدا بعد از چک کردن شرط $Ri<R^{th}$ به قسمت اجرای الگوریتم TPC می‌روند تا بخاطر ویژگی TPC، همه گره‌ها به SINR هدف برسند و رد درخواست سیستم، صفر گردد. سپس گره i توان خود را افزایش می‌دهد، و اگر از توان بیشینه یا مجاز سیستم بیشتر شد، فلاگ را صفر کرده و توان خود را که حالا مقدار آن غیرمجاز شده، با الگوریتم TPC مجدداً محاسبه کرده و به ابتدای فلوچارت برمی‌گردد. TPC حداقل SINR را برای گره حاصل می‌کند و فقط تضمین می‌کند که درخواست گره رد نشود. ما برای همین در الگوریتم پیشنهادی، ابتدا از TPC برای نگهداشتن همه گره‌ها در شبکه استفاده می‌کنیم. در قدم دوم، می‌خواهیم در صورت امکان افزایش توان گره‌های قوی‌تر ضمن گارانتی عدم حذف هیچ گره ضعیفی از شبکه به دلیل اثر تداخل افزایش توان گره‌های قوی‌تر، این توان را افزایش دهیم.گره-های قوی‌تر، تداخل موثر یا Ri کمتری نسبت به تداخل موثر حداستانه یا R^{th} دارند که این شرط در فلوچارت نشان داده شده است. اگر گره‌ای تداخل موثر کمتری از تداخل موثر حد آستانه داشت، به سمت راست فلوچارت می‌رود و سپس فلاگ را چک می-کند. اگر فلاگ صفر باشد، یعنی سیستم قبلاً در سمت چپ فلوچارت، الگوریتم TPC را اجرا کرده و به حداقل SINR گره‌ها دست یافته است و حالا گره i می‌تواند در صورت امکان، SINR خود را افزایش دهد. بنابراین در ادامه مسیر به قسمت اجرای الگوریتم OPC می‌رود و با اجرای آن، توان خود را افزایش داده و SINR آن نیز افزایش می‌یابد. تا اینجا غیر از استفاده از فلاگ‌ها، تقریباً شبیه الگوریتم DTPC با توان محدود عمل شد. در DTPC با توان محدود، اگر این افزایش توان و ایجاد تداخل حاصل از آن باعث رد درخواست یک گره ضعیف بشود، ترمیمی اتفاق نمی‌افتد. اما در الگوریتم پیشنهادی، بعداز اینکه گره قوی با الگوریتم OPC توان خود را افزایش داد، همانگونه که در بخش شرطی سمت پایین و چپ فلوچارت مشخص شده، بررسی می‌شود که آیا بر اثر این افزایش توان با OPC، آیا گره‌ای در همین شبکه رد درخواست شده یا خیر. اگر گره‌ای رد درخواست نشده باشد، که فرض می‌شود همان الگوریتم TPC روی آن اجرا شده و یعنی تبعاتی برای سیستم از نظر ایجاد رد درخواست برای سایر گره‌ها نداشته است. پس فلاگ صفر شده و گره مجدداً برای افزایش توان، به مرحله الگوریتم OPC می‌رود. اما بلاخره در یک نقطه، این افزایش توان باعث ایجاد تداخل بیش از حد روی گره‌های ضعیف شده و رد درخواست در شبکه ایجاد می‌شود.

همانطور که در پایین فلوچارت نشان داده شده، در صورتیکه خروجی قسمت شرطی ایجاد رد درخواست، "بله" باشد، به معنی افزایش غیرمجاز توان در گره i بوده است. بنابراین ابتدا فلاگ ۱ می‌شود تا هیچ گره دیگری وارد الگوریتم OPC نشود و وضعیت تداخل در شبکه بدتر نشود.سپس برای حل مشکل ایجاد شده و کاهش توان گره i، توان این گره با فرمول الگوریتم پیشنهادی که نتیجه اثبات آن با رابطه (۲۷) نشان داده شده است، محاسبه می‌شود. یعنی با حذف یک گره به دلیل اجرای الگوریتم OPC توسط گره i ام، سایر گره‌ها واکنشی نشان نمی‌دهند، بلکه فقط گره i ام به جای استفاده از الگوریتم OPC که توزیع شده‌تر عمل می‌کند، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، توان خود را متناسب با وضعیت سایر گره‌ها تنظیم می‌کند تا به رد درخواست منجر نشود.



شکل ۱. فلوچارت DTPC پیشنهادی

مقدار افزایش توان در الگوریتم پیشنهادی به این صورت قابل محاسبه است:

گره‌ای که بعداز چک شدن شرط $Ri<R^{th}$ و مناسب بودن تداخل موثرش نسبت به تداخل موثر آستانه و همچنین عدم رد درخواست هیچ گره دیگری، به ناحیه OPC رسیده است، حداقل توانی که می-تواند داشته باشد بدون آنکه گره دیگری SINR خود را از دست بدهد را به ازای هر گره محاسبه می‌کند و از بین توان‌های بدست آمده، مقدار کمینه آن را برای خود انتخاب کرده و چون محدودیت

توان نیز دارد و از روش DTPC با محدودیت توان استفاده می‌شود، بازهم توانِ کمینه بدست آمده از محاسبه را با توان بیشینه مجاز که در ابتدا مشخص شده، مقایسه کرده و مقدار کمتر را برای خود

فرمول محاسبه حداقل توانِ گره i یا P_i که در ناحیه OPC قرار دارد به ازای بقیه گره‌ها که در ناحیه TPC قرار دارند و می‌خواهند γ_j خود را از دست ندهند بصورت زیر است : (اندیس i برای گره‌ای که وارد ناحیه OPC شده است می-باشد و اندیس jمربوط به تک تک گره‌ها برای بدست آمدن P_i به ازای آنها در نظر گرفته شده است)، بنابراین برای اثبات فرمولی از رابطه (۳) شروع می کنیم و روابط (۲۵)، (۲۶) و (۲۷) را بدست می‌آوریم.

در رابطه (۳)، SINR برای گره j با نماد γ_j محاسبه می‌شود. هدف ما محاسبه توان گره i به ازای تمام SINR تمام گره‌های دیگر است که با اندیس j نشان داده می‌شوند. بنابراین باید P_i را از این معادله خارج کنیم.

$$\gamma_j = \frac{P_j h_j}{\sum_{k\neq j,k\neq i}^{n} P_k h_k \ + P_i h_i + \ \delta^2} \qquad (۲۵)$$

در رابطه (۲۵)، توانستیم $P_i h_i$ را از $\sum_{k\neq j}^{n} P_k h_k$ جدا کنیم. سپس در رابطه (۲۶)، $P_i h_i$ را به یک‌طرف معادله می‌بریم:

$$P_i h_i = \frac{P_j h_j}{\gamma_j} - \delta^2 - \sum_{k\neq i,k\neq j}^{n} P_k h_k \qquad (۲۶)$$

در رابطه (۲۷) می‌توانیم P_i را براساس سایر پارامترهای سیستم به ازای تمام گره‌ها با اندیس j، برای گره i محاسبه نماییم:

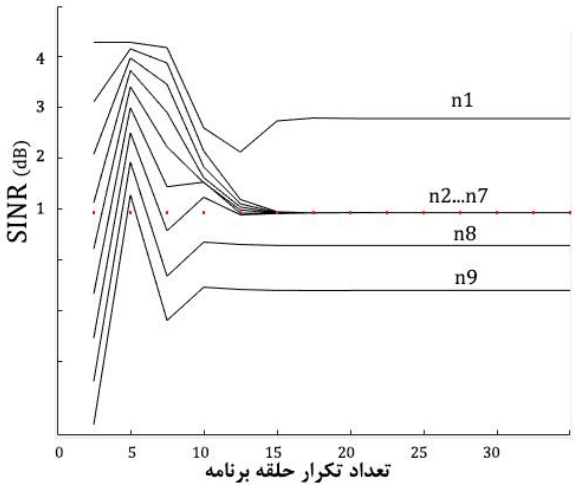
$$P_i = \frac{P_j h_j}{\gamma_j h_i} - \frac{\delta^2}{h_i} - \frac{\sum_{k\neq i,k\neq j}^{n} P_k h_k}{h_i} \qquad (۲۷)$$

اگر رابطه (۲۷) را در یک حلقه بگذاریم و آن را به ازای تمام گره‌ها یعنی از ۱ تا n تکرار کنیم، مقادیر P_i به ازای تمام گره‌ها برای دستیابی به γ_j آنها بدست می‌آید. به این صورت که رابطه (۲۷) باعث می‌شود تا ما حداکثر توان گره i را برای تک تک گره‌های موجود در شبکه محاسبه کنیم و از بین تمام P_i های بدست آمده، کمترین آن را انتخاب کنیم تا هیچ گره‌ای دچار رد درخواست نشود. بنابراین گره‌ای که به ناحیه OPC رفته و افزایش توانش باعث ایجاد رد درخواست در سیستم شده، حالا توان خود را با رابطه (۲۷) که اثبات شد، افزایش می‌دهد. یعنی به تداخلی که روی بقیه گره‌ها می‌تواند بگذارد، وابسته شده است و توانی را برای خود انتخاب می‌کند که منجر به رد درخواست هیچ گره‌ای نشود.

۵-۲. شبیه‌سازی

برای مقایسه نتایج عملکرد الگوریتم پیشنهادی حاصل از اثبات فرمولی با سایر الگوریتم‌های موجود، در نرم افزار MATLAB کدنویسی الگوریتم‌ها انجام شد و با مقادیر پایه و یکسان، این الگوریتم‌ها مورد پیاده‌سازی و اجرا قرار گرفتند. جمع کل گذردهی سیستم و نمودار SINR گره‌ها بصورت تفکیک شده در نتایج شبیه-سازی نشان داده شده است. فرض شده که در یک سلول مخابراتی، ۹ گره حضور دارند. حداکثر توان مجاز در سیستم $۱۰^{-۷}$ وات و SINR مجاز برای ارتباط گره‌ها در شبکه هم $۱۰^{-۱}$ دسیبل در نظر گرفته شد.

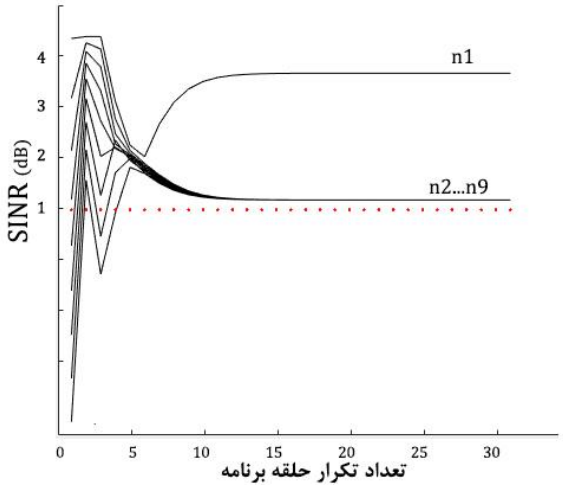
نتایج حاصل از اجرای الگوریتم DTPC در شکل ۲ نشان می‌دهد که ۱ گره به حداکثر SINR ممکن در سیستم با عدد ۰/۲۵۲۷ دسیبل رسید، ۶ گره روی حداقل SINR یعنی $۱۰^{-۱}$ دسیبل باقی ماندند و ۲ گره نیز نتوانستند به حداقل SINR برسند و بنابراین دچار رد درخواست شده و از سیستم خارج شدند. خط نقطه‌چین، SINR هدف با مقدار $۱۰^{-۱}$ دسیبل را نشان می‌دهد که مرز رد درخواست گره‌هاست.



شکل ۲. نمودار SINR همه گره‌ها در یک شبکه سلولی در الگوریتم DTPC با توان محدود. محور افقی، تکرار الگوریتم

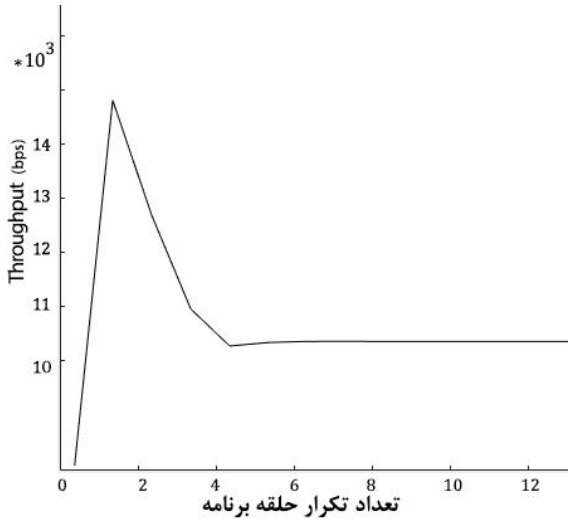
شکل ۳، نتایج حاصل از اجرای الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این نمودار، ۱ گره به حداکثر SINR ممکن در سیستم با عدد ۰/۳۷۳۴ دسیبل رسید و ۸ گره روی حداقل SINR یعنی $۱۰^{-۱}$

دسیبل باقی ماندند، بنابراین علاوه بر اینکه SINR سیستم افزایش یافت، هیچ گره‌ای نیز از سیستم حذف نگردید. در نتیجه الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم DTPC با توان محدود، عملکرد بهتری داشته است.



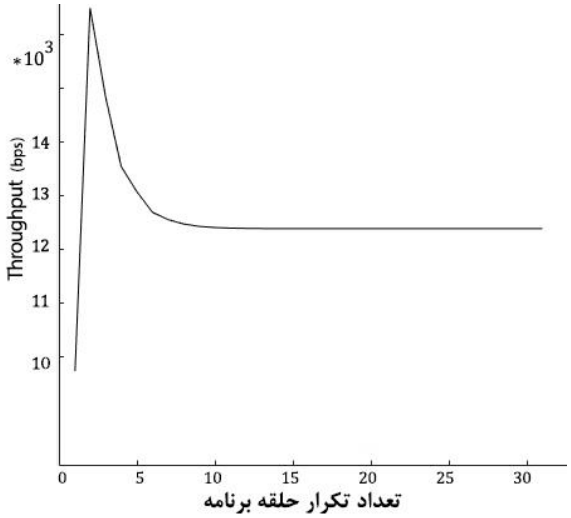
شکل ۳. نمودار SINR همه گره‌ها در یک شبکه سلولی در الگوریتم DTPC پیشنهادی

شکل ۴، نتایج مجموع گذردهی سیستم حاصل از شبیه‌سازی الگوریتم DTPC با توان محدود را نشان می‌دهد. مجموع گذردهی در این شبیه‌سازی به ۱۰۷۸۳ bps[۲۸] رسیده است.



شکل ۴. نمودار مجموع گذردهی سیستم در الگوریتم DTPC با توان محدود

شکل ۵ نتایج مجموع گذردهی سیستم حاصل از شبیه‌سازی در الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد که به ۱۲۷۶۱ bps رسید. این عدد حدود ۲۰٪ افزایش را نسبت به الگوریتم قبلی نشان می‌دهد، علاوه بر اینکه هیچ گره‌ای هم از شبکه حذف نگردیده است.



شکل ۵. نمودار مجموع گذردهی سیستم در الگوریتم DTPC پیشنهادی

جدول ۱ مقادیر حاصل از شبیه‌سازی را در کنار هم نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقادیر رد ردخواست، مجموع گذردهی و مجموع توان مصرفی در دو الگوریتم

الگوریتم	رد درخواست	مجموع گذردهی (bps)	مجموع توان مصرفی (W)
DTPC با توان محدود	۲ گره از ۹ ٪۲۲	۱۰۷۸۳	۴۵۳۸*۱۰^-۱۰
DTPC Plus با توان محدود	۰	۱۲۷۶۱	۱۰۳۵*۱۰^-۱۰

۶. جمع‌بندی

در این مقاله یک چارچوب به منظور ارایه طرحی برای بهبود گذردهی و کاهش مصرف توان گره‌های متحرک در شبکه‌های سلولی مخابراتی و سپس با استفاده از اثبات فرمولی، الگوریتم پیشنهادی ارائه گردید. اما به منظور مشاهده میزان بهبود عملکرد، در کنار آخرین الگوریتم

[28] bit per second

معرفی شده در این زمینه و با داده‌های یکسان و در محیط مشابه، مورد شبیه‌سازی قرار گرفت.

نتایج اجرای الگوریتم‌ها در جدول ۱ و شکل‌های ۲ تا ۵ نشان داده شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۲ و ۴ نشان می-دهد که رد درخواست در الگوریتم DTPC با توان محدود، ۲۲٪ بوده که در الگوریتم پیشنهادی به صفر رسیده است. بنابراین رد درخواست بهبود پیدا کرده و به حد بهینه خود یعنی صفر رسیده است. گذردهی نیز به عنوان مهم‌ترین معیار مورد نظر در این تحقیق، در الگوریتم پیشنهادی ۲۷٪ بهبود یافته است. همچنین مصرف توان در الگوریتم پیشنهادی به کمتر از یک چهارم نسبت به آخرین الگوریتم موجود کاهش یافته است. بنابراین الگوریتم پیشنهادی، بدون اینکه اثر منفی در شبکه ایجاد کند یا از منابع خاصی استفاده کرده و یا بار محاسباتی یا ارتباطی خاصی بر شبکه تحمیل نماید، توانسته در-حالیکه قید محدودیت توان را اعمال می‌کند، اجازه دهد تا گره‌ها علاوه‌بر دستیابی به SINR هدف، در صورتیکه مشکلی برای سایر گره‌ها بوجود نیاید، توان خود را افزایش داده و در نتیجه گذردهی کل سیستم، بالا برود و توان مصرفی گره هم به منظور افزایش طول عمر باتری در دستگاه‌های متحرک و کاهش تداخل در محیط شبکه، کاهش یابد. از کارهای آتی در این زمینه، می‌توان به اولویت‌دهی گره‌ها در دسترسی به کانال ارتباطی پرداخت که با توجه به تنوع سرویس‌های مخابراتی و تفاوت کیفیت سرویس در آنها، می‌تواند بسیار چالشی و جذاب باشد.

مراجع

[1] M. Rasti, A. R. Sharafat, and J. Zander, "A Distributed Dynamic Target-SINR-Tracking Power Control Algorithm for Wireless Cellular Networks," *IEEE Trans*. Veh. Technol., vol. 59, no. 2, pp. 906–916, Feb 2010.

[2] Carlos Gandarillas , Carlos Martín-Engeños , Héctor López Pombo , Antonio G. Marques, "Dynamic transmit-power control for WiFi access points based on wireless link occupancy," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2014.

[3] M. Rasti, A. R. Sharafat, and J. Zander, "Pareto and Energy-Efficient Distributed Power Control with Feasibility Check in Wireless Networks, *" EEE Trans.* Inf. Theory, Vol. 57, no. 1, pp. 245–255, Jan 2011.

[4] Sheyda Zarandi, Mehdi Rasti, "Energy efficient resource allocation in two-tier heterogeneous network with inband full-duplex communications," in *IEEE Conferences* Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 2072 – 2077, 2017.

[5] Kamal Singh, "Optimal Power Control in Decentralized Gaussian Multiple Access Channels," *IEEE Communications Letters*, Vol. 22, Journal Article, Publisher: IEEE, 2018.

[6] Sixing Yin, Lihua Li, F. Richard Yu, "Resource Allocation and Base station Placement in Downlink Cellular Networks Assisted by Multiple Wireless Powered UAVs." *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 2171 – 2184, 2020.

[7] Z. Chen; k. Chi, K. Zheng, Y. Li, X. Liu, "Common Throughput Maximization in Wireless Powered Communication Network with Non-C\Orthogonal Multiple Access," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 7692 – 7706, 2020.

[8] J. Zhao, F. Shen, J. Joung, "Throughput Maximization with Rate-Dependent Power Consumption in Battery-Limited Multiuser Networks." *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 1141 – 1146, 2020.

[9] Danh H. Ho, Thomas Aaron Gulliver, "Prioritised and selective power control in cellular wireless networks," *Institution of Engineering and Technology (IET)*, pp. 433-441, 2019.

[10] Danh H. Ho, Thomas Aaron Gulliver, "Uplink Power Allocation for Throughput an d Energy Efficiency Over Nakagami-m Fading Channels," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2021.

[11] Danh H. Ho, Thomas Aaron Gulliver, "Power Allocation in Cellular Networks Base

d on Outage Probability and Normalized SINR," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2020.