

کنترل توان در ارتباطات دستگاه به دستگاه زیرلایه در شبکه‌های سلولی نسل پنجم تحت اطلاعات غیر دقیق حالت کانال‌ها

مریم علی بیگی^۱ عباس طاهرپور^۲

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)- قزوین- ایران
m.alibeigi@edu.ikiu.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)- قزوین- ایران
taherpour@eng.ikiu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، شکل‌دهی پرتو و کمینه‌سازی توان مصرفی در ایستگاه پایه در یک شبکه سلولی با ارتباطات دستگاه به دستگاه زیرلایه بررسی می‌گردد. فرض شده است که اطلاعات حالت کانال در اختیار ایستگاه پایه نیست و تنها تخمینی از کواریانس آنها در دسترس است. خطای تخمین در ماتریس کواریانس اطلاعات حالت کانال به دو صورت در نظر گرفته شده است. در حالت اول فرض بر این است که کران بالای نرم فروبنیوس خطاها محدود است و هدف این است که شکل‌دهی پرتو در ایستگاه پایه به نحوی محاسبه شود که توان مصرفی ایستگاه پایه کمینه شده و نسبت سیگنال به نویز به اضافه تداخل برای همه کاربران از حد آستانه‌ای کمتر نشود. در حالت دوم فرض بر این است که توزیع آماری خطا مشخص است و هدف این است که شکل‌دهی پرتو به نحوی محاسبه شود که توان مصرفی ایستگاه پایه کمینه شده و احتمال عدم قطع برای کاربران از حد آستانه‌ای از پیش تعریف شده‌ای کمتر نشود. نشان داده می‌شود که اگرچه این مسائل بهینه‌سازی غیر محدب هستند، می‌توان آنها را با استفاده از تکنیک تخفیف نیمه معین به فرم محدب بازنویسی کرد و کران پایینی برای حل آنها به دست آورد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که روش‌های پیشنهادی ما عملکرد به مراتب بهتری نسبت به روش‌های Hybrid MRT_ZF, ZFBF و MRT دارند.

واژه‌های کلیدی: ارتباطات دستگاه به دستگاه، شکل‌دهی پرتو، خطای تخمین، احتمال عدم قطع

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۲۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۲۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر عباس طاهرپور

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - قزوین - خیابان امام خمینی - دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) - دانشکده‌ی برق

بین کاربران سلولی و کاربران D2D می‌شود و تضمین کیفیت سرویس را پیچیده و مشکل می‌کند.

همان‌طور که اشاره شد، در ارتباطات D2D زیرلایه، مدیریت تداخل به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های این نوع ارتباطات شناخته می‌شود. در نتیجه، طرح‌های مدیریت تداخل در این نوع ارتباطات اهمیت ویژه‌ای می‌یابند. یکی از روش‌هایی که می‌توان با استفاده از آن تداخل بین کاربران سلولی و کاربران D2D را به حداقل رساند، روش کنترل توان است. الگوریتم‌های کنترل توان توزیع شده^{۱۳} و متمرکز^{۱۴} برای ارتباطات تک ورودی- تک خروجی^{۱۵} در [۷] مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، توان ارسالی کاربران طوری تعیین شده است که نسبت سیگنال به نویز به علاوه تداخل^{۱۶} (SINR) کاربران سلولی بیشینه^{۱۷} شود و در عین حال حداقل SINR برای کاربران D2D نیز تأمین شود. به طور مشابه، یک روش کنترل توان در [۸] مورد بررسی قرار گرفته است که در آن توان ارسالی کاربران D2D به نحوی تنظیم می‌شود که SINR کاربران سلولی از حد معینی کمتر نشود. همچنین یک طرح کنترل توان پویا^{۱۸} برای کمینه کردن^{۱۹} مقدار تداخل ناشی از یک زوج D2D، در [۹] ارائه شده است. تمام مطالعات مورد بحث در بالا، ایستگاه پایه را تک آنتنی فرض کرده‌اند و تنها یک کاربر سلولی و یک زوج D2D را در نظر گرفته‌اند؛ در حالی که شبکه‌های فعلی تلفن همراه دارای ایستگاه‌های پایه چند آنتنی و همچنین کاربران سلولی متعددی هستند.

مطالعات اندکی وجود دارند که طرح‌های کنترل توان را برای ارتباطات D2D زیرلایه در یک شبکه سلولی با ایستگاه پایه چند آنتنی و کاربران سلولی متعدد بررسی کرده‌اند. کمینه کردن توان ارسالی کل در شبکه چند سلولی با مسیره‌های فراسو در [۱۰] مورد مطالعه قرار گرفته است. در آنجا شبکه‌ای چند سلولی در نظر گرفته شده است که در آن هر ایستگاه پایه تعداد ثابتی از کاربران سلولی و D2D را پشتیبانی می‌کند. کاربران سلولی تنها با ایستگاه پایه ارتباط برقرار می‌کنند، اما زوج‌های D2D می‌توانند به طور مستقیم یا از طریق ایستگاه پایه با یکدیگر ارتباط برقرار کنند. ثابت شده است که این مسأله یک مسأله NP-Hard^{۲۰} به مفهوم قوی است و با توجه به پیچیدگی آن، نویسندگان تخصیص توان را تنها در یک سلول در نظر گرفته‌اند و یک الگوریتم اکتشافی برای آن پیشنهاد کرده‌اند. در [۱۱] یک الگوریتم شکل‌دهی پرتو^{۲۱} و کنترل توان معرفی شده است که در آن مسیره‌های ارتباطات سلولی به صورت کانال‌هایی با محوشدگی رایلی^{۲۲} و مسیر ارتباط زوج D2D به صورت کانالی با محوشدگی رایسین^{۲۳} در نظر گرفته شده‌اند. هدف این الگوریتم کمینه‌سازی توان مصرفی در ایستگاه پایه است به نحوی که حداقل کیفیت سرویس^{۲۴} (QoS) برای کاربران سلولی و D2D تأمین شود.

از طرفی، در شبکه‌هایی با ارتباطات سلولی و ارتباطات D2D زیرلایه برای داشتن شکل‌دهی پرتو بهینه به اطلاعات حالت کانال^{۲۵} (CSI) نیاز است. در بیشتر تحقیقات صورت گرفته در زمینه ارتباطات

انتظار می‌رود حجم ترافیک شبکه‌های بی‌سیم طی ده سال آینده هزار برابر افزایش یابد و پیش‌بینی می‌شود که در سال ۲۰۲۰ حدود ۵۰ میلیارد دستگاه با شبکه‌های بی‌سیم ارتباط داشته باشند که همگی به دسترسی و به اشتراک گذاری داده‌ها، در هر کجا و هر زمان نیاز دارند. با افزایش سریع تعداد کاربران، سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم با چالش کمبود منابع طیفی مواجه شده‌اند. بنابراین فناوری‌هایی که بهره‌وری طیفی^۱ را افزایش می‌دهند بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳]. یکی از این فناوری‌ها ارتباطات دستگاه به دستگاه^۲ (D2D) است.

در یک شبکه تلفن همراه سنتی، تمام ارتباطات باید از ایستگاه پایه عبور کنند. اما در ارتباطات D2D دو کاربر که در فاصله نسبتاً کمی از یکدیگر قرار دارند می‌توانند به طور مستقیم با یکدیگر ارتباط برقرار کنند. ارتباطات D2D مزایای زیادی از جمله بهبود بهره‌وری طیفی، افزایش توان عملیاتی^۳، افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش تأخیر را به دنبال دارد. با توجه به این ویژگی‌های جذاب، ارتباطات D2D به عنوان یک فناوری کلیدی برای سیستم‌های ارتباطی نسل پنجم^۴ (5G) شناخته می‌شود [4] [۴].

ارتباطات D2D به دو دسته کلی داخل باند^۵ و خارج باند^۶ تقسیم می‌شود. در ارتباطات داخل باند، کاربران D2D از منابع طیفی سلولی استفاده می‌کنند و در ارتباطات خارج باند، کاربران D2D منابع طیفی متفاوتی با طیف سلولی را به کار می‌برند. همچنین، ارتباطات D2D داخل باند می‌تواند به دو روش رولایه^۷ و زیرلایه^۸ انجام شود. در روش رولایه قسمت خاصی از منابع طیفی به ارتباطات D2D اختصاص پیدا می‌کند. اما در روش زیرلایه کاربران D2D می‌توانند کل منابع طیف سلولی را مورد استفاده مجدد قرار دهند. در بین روش‌های ذکر شده، روش زیرلایه به دلیل استفاده هم‌زمان کاربران سلولی و کاربران D2D از طیف و در نتیجه داشتن بهره‌وری طیفی بالاتر، محبوبیت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد.

در ارتباطات D2D زیرلایه، استفاده مجدد از طیف فراسو^۹ بیشتر از استفاده مجدد از طیف فرسو^{۱۰} مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته است؛ زیرا در بیشتر مواقع کاربران سلولی داده‌ها را از شبکه سلولی با رگیری^{۱۱} می‌کنند. [۵] بنابراین منابع طیفی فراسو در مقایسه با منابع طیفی فرسو کمتر استفاده می‌شوند. با این وجود، در سال‌های اخیر، برنامه‌های جدیدی که از منابع طیفی فراسو استفاده می‌کنند، مانند VOIP^{۱۲} و ویدئو کنفرانس محبوبیت زیادی در بین کاربران سلولی پیدا کرده‌اند. بنابراین، پیش‌بینی می‌شود که در آینده میزان ترافیک طیف فراسو و فرسو تقریباً یکسان شود [۶] در نتیجه، مسأله تخصیص و استفاده مجدد از منابع طیفی فرسو در ارتباطات D2D زیرلایه اهمیت یافته و باید مورد توجه قرار گیرد. هرچند استفاده مجدد از طیف سلولی در هر دو حالت فراسو و فرسو باعث ایجاد تداخل متقابل

D2D زیرلایه، فرض بر این بوده است که CSI تمامی کانال‌ها در ایستگاه پایه به طور کامل و بدون خطا موجود است. در حالی که در عمل و واقعیت به دلیل خطای تخمین، خطای کوانتیزاسیون^{۲۶}، تأخیر بازخورد^{۲۷} و عواملی دیگر فقط CSI به صورت غیر دقیق^{۲۸} یا جزئی^{۲۹} در دسترس است. بنابراین روش‌های شکل‌دهی پرتو مقاوم^{۳۰} که CSI را کامل و بدون خطا در نظر نمی‌گیرند، اهمیت بسیاری می‌یابند.

نقص در CSI را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: نقص در لحظه‌ای^{۳۱} و نقص در ماتریس کواریانس^{۳۲} CSI. با توجه به این که آماره مرتبه دوم^{۳۳} کانال در مقایسه با خود کانال تغییرات آرام‌تری دارد، بنابراین CSI مبتنی بر کواریانس نسبت به CSI لحظه‌ای نیاز به بازخورد کمتری دارد. در نتیجه، استفاده از CSI مبتنی بر کواریانس، مخصوصاً در زمانی که محوشدگی کانال سریع است، به مراتب عملی‌تر و منطقی‌تر است.

در [۱۲] یک مدل CSI جزئی در نظر گرفته شده است. در آنجا فرض شده است که CSI کامل کانال‌های بین کاربران سلولی و ایستگاه پایه در دسترس است ولی CSI کانال‌های بین کاربران D2D و همچنین CSI کانال‌های تداخلی بین کاربران سلولی و کاربران D2D به طور کامل در دسترس نیست. بر این اساس، با استفاده از نظریه بازی‌ها، یک الگوریتم کنترل توان با هدف کمینه کردن مقدار تداخل ناشی از کاربران D2D ارائه شده است. در [۱۳] نیز با فرض غیردقیق بودن CSI لحظه‌ای، یک طرح شکل‌دهی پرتو مقاوم بر اساس ZFBF^{۳۴} در شبکه‌های D2D زیر لایه با هدف کمینه کردن توان مصرفی در ایستگاه پایه، پیشنهاد شده است.

علی‌رغم تحقیقاتی مانند [۱۲] و [۱۳]، در ارتباطات D2D زیرلایه به طرح‌های کنترل توان و شکل‌دهی پرتو مقاوم چندان پرداخته نشده است. از طرفی، رشد روز افزون تعداد دستگاه‌های بی‌سیم، به طور قابل توجهی باعث افزایش میزان CO2 خواهد شد [۱۴]، با توجه به اینکه 80% کل انرژی شبکه در ایستگاه پایه مصرف می‌شود، طرح‌هایی که مصرف انرژی را در ایستگاه پایه کاهش می‌دهند بسیار محبوب هستند. از این رو، در این مقاله ما قصد داریم در یک مدل D2D زیرلایه، در حالت فروسو، با فرض غیردقیق بودن ماتریس کواریانس CSI، طرح‌های کنترل توان و شکل‌دهی پرتو مقاوم را در ایستگاه پایه ارائه دهیم. به طور خاص، هدف ما این است که شکل‌دهی پرتو در ایستگاه پایه را طوری تعیین کنیم که توان مصرفی در ایستگاه پایه کمینه شود و در عین حال QoS کاربران سلولی و D2D از حد آستانه‌ای بیشتر باشد.

در این مقاله، دو روش برای مدل‌سازی خطا در CSI بررسی شده است. در هر دو روش، خطا در ماتریس کواریانس کانال‌ها و به صورت جمع شونده در نظر گرفته شده است. در روش اول، فرض شده است که نرم فرونیوس^{۳۵} خطا محدود است. در روش دوم، که نسبت به روش اول منطقی‌تر است، خطا به صورت تصادفی و با توزیع آماری مشخصی در نظر گرفته شده است.

هر چند مانند سایر مسائل بهینه‌سازی شکل‌دهی پرتو در سیستم‌های چند کاربره، مسئله بهینه‌سازی ما نیز یک مسئله NP-hard و غیر محدب است [۱۵] اما ما نشان می‌دهیم که می‌توان این مسئله را با استفاده از روش تخفیف نیمه معین^{۳۶} به شکل یک مسئله محدب بازنویسی کرد.

در مقایسه با تحقیقات مرتبط قبلی، مقاله ما اساساً در موارد زیر متفاوت است:

- در بیشتر تحقیقات قبلی، فقط یک کاربر سلولی هم‌زمان با یک زوج D2D در شبکه وجود دارد. با توجه به محبوبیت ارتباطات سلولی و تعداد زیاد کاربران سلولی، این فرضیه بسیار دور از واقعیت است. اما مدل پیشنهادی ما شامل چند کاربر سلولی و یک زوج D2D است. همچنین، مدل پیشنهادی ما به راحتی می‌تواند برای تعداد بیشتری زوج D2D تعمیم داده شود.
- برخلاف برخی تحقیقات قبلی مانند [۱۶] و [۱۷] که بعضی از کانال‌های تداخلی را نادیده گرفته‌اند، در این تحقیق ما تمامی مسیرها و کانال‌ها را در نظر گرفته‌ایم و از هیچ مسیری چشم‌پوشی نکرده‌ایم.
- همچنین بر خلاف [۱۸]، CSI غیردقیق تنها برای کانال‌های تداخلی بین کاربران سلولی و کاربران D2D، در نظر گرفته نشده است. بلکه فرض ما بر این است که همه CSI‌ها غیردقیق هستند. ادامه‌ی مقاله به صورت زیر است: در بخش ۲ مدل سیستم مورد نظر توصیف شده است در بخش ۳ مسئله بهینه‌سازی برای حالت‌های مختلف خطا در تخمین ماتریس کواریانس کانال‌ها فرمول‌بندی شده است و الگوریتم پیشنهادی معرفی شده است. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۴ آورده شده‌اند و در نهایت، در بخش ۵ نتیجه‌گیری مقاله بیان شده است.

۲- مدل سیستم

مدل سیستم مورد بررسی در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، یک سلول با N کاربر سلولی و ارتباطات فروسو و یک زوج D2D در حالت زیر لایه، در نظر گرفته شده است. کاربران سلولی با $CU_i, i=1,2,\dots,N$ فرستنده و گیرنده‌ی زوج D2D به ترتیب با DT و DR نمایش داده شده‌اند. فرض شده است که همه‌ی کاربران تک آنتنی هستند، اما ایستگاه پایه مجهز به M آنتن است. بنابراین، ایستگاه پایه به دلیل داشتن آنتن‌های متعدد قادر است به طور هم‌زمان با چندین کاربر سلولی ارتباط داشته باشد.

همچنین مشابه [۱۱] فرض شده است که کاربران سلولی در حالت داپلکس تقسیم فرکانسی (FDD^{۳۷}) و زوج D2D به صورت داپلکس تقسیم زمانی (TDD^{۳۸}) کار می‌کنند. برش‌های زمانی^{۳۹} که DT سیگنال خود را به DR ارسال می‌کند قابل توجه هستند. سیگنال‌های دریافت شده در i امین کاربر سلولی و DR به ترتیب به صورت روابط (۱) و (۲) خواهند بود.

طور آماری از یکدیگر مستقل هستند. بنابراین با استفاده از روابط (۱) و (۲)، SINR لحظه‌ای برای D_R و i امین کاربر سلولی را می‌توان به صورت روابط (۳) و (۴) نوشت.

$$\gamma_R = \frac{P_0 |h_{TR}|^2}{\sum_{k=1}^N |\mathbf{h}_R^H \mathbf{w}_k|^2 + \sigma_R^2} \quad (3)$$

$$\gamma_i = \frac{|\mathbf{h}_i^H \mathbf{w}_i|^2}{P_0 |h_{Ti}|^2 + \sum_{k=1, k \neq i}^N |\mathbf{h}_i^H \mathbf{w}_k|^2 + \sigma_i^2}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد، در عمل و واقعیت به‌دست آوردن اطلاعات دقیق حالت کانال‌ها به دلایل محوشدگی سریع، ماهیت در حال تغییر کانال‌های بی‌سیم، خطای کوآنیزاسیون و عواملی دیگر، بسیار دشوار است. بنابراین، ما فرض کرده‌ایم که تخمین از خصوصیات آماری مرتبه دوم ضرایب کانال‌ها را در اختیار داریم. متوسط SINR دریافتی در D_R و هر کاربر سلولی به شکل زیر

تعریف می‌شوند:

$$\bar{\gamma}_R = \mathbb{E}[\gamma_R] = \frac{P_0 R_{TR}}{\sum_{k=1}^N \mathbf{w}_k^H \mathbf{R}_R \mathbf{w}_k + \sigma_R^2} \quad (5)$$

$$\bar{\gamma}_i = \mathbb{E}[\gamma_i] = \frac{\mathbf{w}_i^H \mathbf{R}_i \mathbf{w}_i}{P_0 R_{Ti} + \sum_{k=1, k \neq i}^N \mathbf{w}_k^H \mathbf{R}_i \mathbf{w}_k + \sigma_i^2}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

که $\mathbf{R}_R = \mathbb{E}[\mathbf{h}_R \mathbf{h}_R^H]$ ، $R_{Ti} = \mathbb{E}[h_{Ti} h_{Ti}^H]$ ، $R_{TR} = \mathbb{E}[h_{TR} h_{TR}^H]$ و $\mathbf{R}_i = \mathbb{E}[\mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H]$ تخمین کواریانس‌های کانال‌ها هستند.

می‌دانیم توان مصرفی در ایستگاه پایه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{BS} = \sum_{i=1}^N \text{tr}(\mathbf{W}_i) \quad (7)$$

که $\mathbf{W}_i = \mathbf{w}_i \mathbf{w}_i^H$ ماتریس شکل دهی پرتو را نشان می‌دهد. واضح است که این ماتریس، یک ماتریس هرمیتی^۴ مثبت نیمه معین^۴ با رتبه ۱ است.

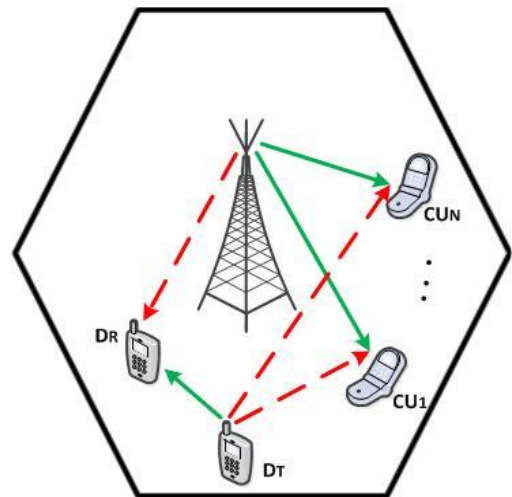
۳- فرمول بندی مسأله

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، متأسفانه در عمل، به‌دست آوردن CSI دقیق بسیار مشکل است. در اینجا فرض می‌کنیم که تخمین‌های ماتریس کواریانس کانال‌ها حاوی خطا هستند و این خطاها را به دو روش مدل‌سازی می‌کنیم: در روش اول مانند [۱] و [۱۹]، خطاها را با استفاده از مدل عدم قطعیت محدود شده، مدل کرده‌ایم. در این روش فرض می‌کنیم که همه‌ی خطاها جمع شونده و دارای نرم فروبنیوس محدود هستند. در روش دوم، که نسبت به روش اول به واقعیت نزدیک‌تر است، مانند [۲]، [۲۰] و [۲۱] خطاها با توزیع آماری مشخصی در نظر گرفته‌ایم. در این روش فرض کرده‌ایم که خطاهای

$$y_r = \sqrt{P_0 s_0} h_{TR} + \sum_{k=1}^N s_k \mathbf{h}_R^H \mathbf{w}_k + n_R \quad (1)$$

$$y_i = s_i \mathbf{h}_i^H \mathbf{w}_i + \sum_{k=1, k \neq i}^N s_k \mathbf{h}_i^H \mathbf{w}_k + \sqrt{P_0 s_0} h_{Ti} + n_i, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

که P_0 نشان دهنده توان ارسالی D_T و s_0 بیانگر سیگنال ارسالی از D_T به D_R هستند. s_i و $i = 1, 2, \dots, N$ نیز به ترتیب سیگنال ارسالی و بردار وزنی شکل دهنده پرتو مربوط به i امین کاربر سلولی را نشان می‌دهند. h_{TR} ضریب کانال بین D_T و D_R ، h_{Ti} ضریب کانال بین D_T و i امین کاربر سلولی، \mathbf{h}_i و \mathbf{h}_R بردار ضرایب کانال‌های بین ایستگاه پایه و بردار ضرایب کانال بین ایستگاه پایه و i امین کاربر سلولی را نشان می‌دهند. n_i و n_R نیز بیانگر نویز گوسی مختلط سفید جمع شونده با میانگین صفر و واریانس‌های σ_i^2 و σ_R^2 به ترتیب در D_R و i امین کاربر سلولی هستند.



شکل (۱): مدل سیستم بردارهای سبز ممتد نشان دهنده سیگنال‌های مطلوب و بردارهای قرمز خط چین نشان دهنده سیگنال‌های تصادفی هستند

توجه کنید که، می‌توان فرض کرد در برش‌های زمانی فرد D_T سیگنال خود را به D_R ارسال می‌کند و در برش‌های زمانی زوج D_R سیگنال خود را به D_T می‌فرستد. اما از آنجا که روابط سیگنال‌های دریافت شده مشابه هستند، ما برای ساده شدن بحث، تنها برش‌های زمانی فرد را مد نظر قرار می‌دهیم. همچنین، می‌توان فرض کرد که چندین زوج D2D در سلول وجود دارند و روابط مشابهی را برای سیگنال‌های دریافتی در این زوج‌های D2D و کاربران سلولی به دست آورد. در این حالت، باز هم مسأله با روش پیشنهادی ما قابل حل است؛ تنها تفاوت این است که سیگنال‌های تداخلی بیشتری وجود خواهند داشت و در نتیجه، روابط QoS کاربران پیچیده‌تر خواهند شد.

بدون از دست دادن کلیت مسأله می‌توان فرض کرد که $\mathbb{E}[s_0] = \mathbb{E}[s_i] = 0$ و $\mathbb{E}[s_0^2] = \mathbb{E}[s_i^2] = 1$ هستند. همچنین، فرض کرده‌ایم که سیگنال‌های ارسالی، بردارهای کانال‌ها و نویزها به

$$\begin{aligned} \min \bar{\gamma}_R &= \frac{\min P_0(\hat{R}_{TR} + E_{TR})}{\max \sum_{k=1}^N \mathbf{w}_k^H (\hat{\mathbf{R}}_R + \mathbf{E}_R) \mathbf{w}_k + \sigma_R^2} \\ &= \frac{P_0(\hat{R}_{TR} - \delta_R)}{\sum_{k=1}^N \mathbf{w}_k^H (\hat{\mathbf{R}}_R + \varepsilon_R \mathbf{I}) \mathbf{w}_k + \sigma_R^2} \quad (13) \\ &= \frac{P_0(\hat{R}_{TR} - \delta_R)}{\sum_{k=1}^N \text{tr} \left((\hat{\mathbf{R}}_R + \varepsilon_R \mathbf{I}) \mathbf{W}_k \right) + \sigma_R^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \min \bar{\gamma}_i &= \frac{\min \mathbf{w}_i^H (\hat{\mathbf{R}}_i + \mathbf{E}_i) \mathbf{w}_i}{\max P_0(\hat{R}_{Ti} + E_{Ti}) + \sum_{k=1, k \neq i}^N \mathbf{w}_k^H (\hat{\mathbf{R}}_i + \mathbf{E}_i) \mathbf{w}_k + \sigma_i^2} \\ &= \frac{\mathbf{w}_i^H (\hat{\mathbf{R}}_i + \varepsilon_i \mathbf{I}) \mathbf{w}_i}{P_0(\hat{R}_{Ti} + \delta_i) + \sum_{k=1, k \neq i}^N \mathbf{w}_k^H (\hat{\mathbf{R}}_i + \varepsilon_i \mathbf{I}) \mathbf{w}_k + \sigma_i^2} \quad (14) \\ &= \frac{\text{tr} \left((\hat{\mathbf{R}}_i + \varepsilon_i \mathbf{I}) \mathbf{W}_i \right)}{P_0(\hat{R}_{Ti} + \delta_i) + \sum_{k=1, k \neq i}^N \text{tr} \left((\hat{\mathbf{R}}_i + \varepsilon_i \mathbf{I}) \mathbf{W}_k \right) + \sigma_i^2} \end{aligned}$$

با جایگذاری روابط (۷)، (۱۳) و (۱۴) در مسأله بهینه‌سازی (۱۲) و کمی ساده سازی به مسأله بهینه‌سازی (۱۵) می‌رسیم:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^N \text{tr}(\mathbf{W}_i) + P_0 \\ \text{subject to : } P_0(\hat{R}_{TR} - \delta_R) - \gamma_{th} \sum_{k=1}^N \text{tr} \left((\hat{\mathbf{R}}_R + \varepsilon_R \mathbf{I}) \mathbf{W}_k \right) \\ - \gamma_{th} \sigma_R^2 \geq 0 \\ \text{tr} \left((\hat{\mathbf{R}}_i + \varepsilon_i \mathbf{I}) \mathbf{W}_i \right) - \gamma_{th} P_0(\hat{R}_{Ti} + \delta_i) \\ - \sum_{k=1, k \neq i}^N \text{tr} \left((\hat{\mathbf{R}}_i + \varepsilon_i \mathbf{I}) \mathbf{W}_k \right) - \gamma_{th} \sigma_i^2 \geq 0 \\ \mathbf{W}_i \succeq 0, \quad \mathbf{W}_i = \mathbf{W}_i^H, \quad \text{rank}(\mathbf{W}_i) = 1, \\ i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (15)$$

در مسأله بهینه‌سازی (۱۵) تابع هدف و همه شرطها غیر از شرط رتبه یک بودن ماتریس شکل‌دهی پرتو، محدب هستند. ما از روش تخفیف نیمه معین استفاده کرده و این شرط غیر محدب را حذف می‌کنیم. بنابراین مسأله بهینه‌سازی در نهایت به صورت مسأله (۱۶) خواهد بود که یک مسأله محدب SDP است و می‌توان آن را با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدب حل کرد.

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^N \text{tr}(\mathbf{W}_i) \\ \text{subject to : } P_0(\hat{R}_{TR} - \delta_R) - \gamma_{th} \sum_{k=1}^N \text{tr} \left((\hat{\mathbf{R}}_R + \varepsilon_R \mathbf{I}) \mathbf{W}_k \right) \\ - \gamma_{th} \sigma_R^2 \geq 0 \\ \text{tr} \left((\hat{\mathbf{R}}_i + \varepsilon_i \mathbf{I}) \mathbf{W}_i \right) - \gamma_{th} P_0(\hat{R}_{Ti} + \delta_i) \\ - \sum_{k=1, k \neq i}^N \text{tr} \left((\hat{\mathbf{R}}_i + \varepsilon_i \mathbf{I}) \mathbf{W}_k \right) - \gamma_{th} \sigma_i^2 \geq 0 \\ \mathbf{W}_i \succeq 0, \quad \mathbf{W}_i = \mathbf{W}_i^H, \\ i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (16)$$

تخمین ماتریس کوواریانس کانال‌های بین ایستگاه پایه و کاربران سلولی جمع شونده و دارای توزیع گوسی هستند و خطاهای تخمین ماتریس کوواریانس کانال‌های دیگر، مانند روش اول، جمع شونده با نرم فروبنیوس محدود در نظر گرفته‌ایم.

۳-۱- مدل عدم تطابق با نرم محدود

فرض کنید که تخمین کوواریانس کانال‌ها می‌تواند به صورت روابط (۸) و (۹) در نظر گرفته شود.

$$\mathbf{R}_i = \hat{\mathbf{R}}_i + \mathbf{E}_i, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \cup \{R\} \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_{Tj} = \hat{\mathbf{R}}_{Tj} + \mathbf{E}_{Tj}, \quad j \in \{1, 2, \dots, N\} \cup \{R\} \quad (9)$$

که $\hat{\mathbf{R}}_i$ و \hat{R}_{Tj} نشان دهنده‌ی مقادیر واقعی کوواریانس کانال‌ها هستند. \mathbf{E}_i و \mathbf{E}_{Tj} به ترتیب خطاهای تخمین‌های $\hat{\mathbf{R}}_i$ و \hat{R}_{Tj} هستند که در روابط $\|\mathbf{E}_i\| \leq \varepsilon_i$ و $\|\mathbf{E}_{Tj}\| \leq \delta_j$ صدق می‌کنند. در ادامه با استفاده از روابط (۸) و (۹)، روابط (۵) و (۶) را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$\bar{\gamma}_R = \frac{P_0(\hat{R}_{TR} + E_{TR})}{\sum_{k=1}^N \mathbf{w}_k^H (\hat{\mathbf{R}}_R + \mathbf{E}_R) \mathbf{w}_k + \sigma_R^2} \quad (10)$$

$$\bar{\gamma}_i = \frac{\mathbf{w}_i^H (\hat{\mathbf{R}}_i + \mathbf{E}_i) \mathbf{w}_i}{P_0(\hat{R}_{Ti} + E_{Ti}) + \sum_{k=1, k \neq i}^N \mathbf{w}_k^H (\hat{\mathbf{R}}_i + \mathbf{E}_i) \mathbf{w}_k + \sigma_i^2}, \quad (11)$$

$$i = 1, 2, \dots, N.$$

هدف ما این است که توان مصرفی در ایستگاه پایه را کمینه کنیم به شرطی که SINR همه کاربران از حد معینی بیشتر باشد. بنابراین مسأله بهینه‌سازی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \min P_{BS} \\ \text{subject to : } \bar{\gamma}_R \geq \gamma_{th} \\ \bar{\gamma}_i \geq \gamma_{th} \\ \mathbf{W}_i \succeq 0, \quad \mathbf{W}_i = \mathbf{W}_i^H, \quad \text{rank}(\mathbf{W}_i) = 1 \\ i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (12)$$

که γ_{th} حد آستانه‌ی SINR را نشان می‌دهد. متأسفانه، به دلیل پیچیدگی مسأله (۱۲)، هیچ راه حل بسته‌ای^{۲۲} برای آن وجود ندارد. اما برای اطمینان از برقرار بودن دو شرط اول رابطه (۱۲) ما می‌توانیم با جایگذاری کران پایین SINR، بدترین حالت SINRهای کاربران سلولی و بدترین حالت SINR برای D_R را به دست بیاوریم. با توجه به محدودیت نرم خطاها، کران پایین $\bar{\gamma}_i$ و $\bar{\gamma}_R$ به ترتیب از روابط (۱۳) و (۱۴) به دست می‌آیند:

همان طور که ذکر شد، مسأله بهینه سازی (۱۶) محدب است و با استفاده از برخی نرم افزارها که از روش نقطه یابی درونی استفاده می-کنند، مانند جعبه ابزار CVX برنامه MATLAB، قابل حل است.

همچنین واضح است که اگر رتبه ماتریس \mathbf{W}_i برابر یک باشد جواب بهینه به دست آمده است؛ اما اگر رتبه ماتریس \mathbf{W}_i بیشتر از یک باشد، در واقع یک کران پایین برای مسأله بهینه سازی به دست آمده است.

۳-۲- مدل عدم تطابق احتمالی

در قسمت قبلی فرض شد که خطا دارای نرم محدود و مشخصی است. اما این تعریف دقیق و قطعی از خطا ممکن است در عمل قابل قبول و درست نباشد. علاوه بر این، در نظر گرفتن بدترین حالت ممکن است بیش از حد بدبینانه باشد؛ زیرا احتمال وقوع خطا در بیشترین مقدار خود ممکن است بسیار کم باشد. بنابراین، طرح های احتمالی می توانند جایگزین واقع گرایانه تر و قابل انعطاف تری برای طرح های بدترین حالت باشند.

در این بخش فرض می کنیم که ماتریس \mathbf{E}_i یک ماتریس هرمیتی مختلط گوسی با میانگین صفر و واریانس σ_{ei}^2 است و سایر خطاها مانند قبل دارای نرم محدود هستند. هدف ما این است که توان مصرفی در ایستگاه پایه را کمینه کنیم به شرطی که احتمال عدم قطع همهی کاربران سلولی از حد آستانه ای از پیش تعریف شده ای بیشتر باشد و در عین حال SINR زوج D2D نیز از حد آستانه ای بیشتر شود. بنابراین مسأله بهینه سازی را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} & \min P_{BS} \\ & \text{subject to : } \bar{\gamma}_R \geq \gamma_{th} \\ & \Pr(\bar{\gamma}_i \geq \gamma_{th}) \geq p_i \\ & \mathbf{W}_i \succeq 0, \quad \mathbf{W}_i = \mathbf{W}_i^H, \quad \text{rank}(\mathbf{W}_i) = 1, \\ & i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (17)$$

که $\Pr(\cdot)$ اپراتور احتمال است. p_i نیز حد آستانه ای احتمال عدم قطع i امین کاربر سلولی را نشان می دهد. همان طور که از روابط بالا مشخص است، احتمال عدم قطع یک کاربر برابر احتمال بزرگتر بودن SINR آن کاربر از حد آستانه (γ_{th}) است.

با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) و همچنین فرض محدود بودن نرم های \mathbf{E}_R ، E_{TR} و E_{Ti} می توانیم دو شرط اول رابطه (۱۷) را به صورت روابط (۱۸) و (۱۹) بنویسیم:

$$P_0(\hat{\mathbf{R}}_{TR} + \delta_R) \geq \gamma_{th} \left(\sum_{k=1}^N \text{tr}((\hat{\mathbf{R}}_R + \varepsilon_R \mathbf{I}) \mathbf{W}_k) + \sigma_R^2 \right) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & \Pr\{\text{tr}((\hat{\mathbf{R}}_i + \mathbf{E}_i) \mathbf{W}_i) \geq \gamma_{th} (P_0(\hat{\mathbf{R}}_{Ti} + \delta_i) \\ & + \sum_{k=1, k \neq i}^N \text{tr}((\hat{\mathbf{R}}_i + \mathbf{E}_i) \mathbf{W}_k) + \sigma_i^2)\} \geq \alpha_i, \quad (19) \\ & i = 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

اگر $y_i = \text{tr}(\hat{\mathbf{R}}_i + \mathbf{E}_i) \mathbf{X}_i$ ، $\mathbf{X}_i = \mathbf{W}_i - \gamma_{th} (\sum_{k=1, k \neq i}^N \mathbf{W}_k)$ و

(۱۹) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\Pr(y_i \geq u_i) \geq \alpha_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (20)$$

از آنجا که $\hat{\mathbf{R}}_i + \mathbf{E}_i$ و \mathbf{X}_i هر دو هرمیتی هستند، بنابراین مشخص است که y_i یک مقدار حقیقی است. در [۲۲] اثبات شده است که y_i دارای توزیع گوسی با میانگین $\mu_i = \text{tr}(\mathbf{X}_i \hat{\mathbf{R}}_i)$ و واریانس $\sigma_{ei}^2 \text{tr}(\mathbf{X}_i \mathbf{X}_i^H)$ است (اثبات این موضوع در پیوست آورده شده است). بنابراین داریم:

$$P_r(y_i \geq u_i) = Q\left(\frac{u_i - \mu_i}{\sqrt{\sigma_{ei}^2 \text{tr}(\mathbf{X}_i \mathbf{X}_i^H)}}\right) \quad (21)$$

$$= Q\left(\frac{u_i - \mu_i}{\sigma_{ei}}\right), \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

که $Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \exp(-\frac{v^2}{2}) dv$ است.

همان طور که از رابطه (۱۷) مشخص است، هدف ما این است که i امین کاربر سلولی احتمال عدم قطع بیشتری از p_i داشته باشد. می دانیم که در سیستم های واقعی احتمال عدم قطع باید بیشتر از 0.5 و در حالت ایده آل برابر ۱ باشد. بنابراین در مسأله (۱۷) نیز فرض ما بر این است که $0.5 < p_i \leq 1$ ، $i = 1, 2, \dots, N$.

با توجه به اینکه تابع Q یک تابع اکیداً نزولی است. بنابراین رابطه ای احتمال عدم قطع در مسأله (۱۷) با کمی ساده سازی می تواند به شکل رابطه زیر نوشته شود:

$$\mathbf{X}_i \leq \frac{u_i - \mu_i}{\sigma_{ei}^2 Q^{-1}(p_i)} \quad (22)$$

اگر باز هم از شرط غیر محدب رتبه ماتریس شکل دهی پرتو صرف نظر کنیم، با استفاده از روابط قبل و کمی ساده سازی مسأله بهینه سازی (۱۷) را می توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^N \text{tr}(\mathbf{W}_i) \\ & \text{subject to : } P_0(\hat{\mathbf{R}}_{TR} - \delta_R) - \gamma_{th} \sum_{k=1}^N \text{tr}((\hat{\mathbf{R}}_R + \varepsilon_R \mathbf{I}) \mathbf{W}_k) \\ & - \gamma_{th} \sigma_R^2 \geq 0 \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} & u_i - \mu_i - \mathbf{X}_i \sigma_{ei}^2 Q^{-1}(p_i) \geq \\ & \mathbf{W}_i \succeq 0, \quad \mathbf{W}_i = \mathbf{W}_i^H, \quad i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned}$$

اکنون مسأله بهینه سازی (۲۳) یک مسأله محدب با یک تابع هدف خطی است. بنابراین می تواند با استفاده از جعبه ابزارهای بهینه سازی مانند CVX حل شود. باز هم باید توجه داشت که جواب هایی که برای \mathbf{W}_i که از حل مسأله (۲۳) به دست می آیند لزوماً دارای رتبه ای یک نیستند و تنها در صورتی جواب مسأله (۱۷) خواهند بود که دارای رتبه ای یک باشند. اما همان طور که قبلاً هم اشاره شد،

روش ما یک روش زیر بهینه است که کرانی برای مسأله اصلی به دست می‌آورد.

۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش، برخی از نتایج شبیه‌سازی برای نشان دادن عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی ارائه شده است. در تمام مثال‌ها، فرض کرده-ایم که سه کاربر سلولی و یک زوج D2D با یکدیگر در یک سلول وجود دارند. همچنین در تمام شبیه‌سازی‌ها فرض شده است که D_T و D_R به ترتیب در θ_T و θ_R و کاربران سلولی در $\theta_1 = 10^\circ$ ، $\theta_1 + \alpha$ و $\theta_1 - \alpha$ نسبت به آرایه‌ی آنتن ایستگاه پایه، قرار گرفته‌اند. مانند [23] فرض کرده‌ایم که ایستگاه پایه مجهز به آنتن آرایه‌ای خطی یکنواخت با عناصری با فاصله نیم موج است. همچنین فرض بر این است که هر کاربر با تعداد زیادی از پراکنده کننده‌های^{۴۴} محلی، که نسبت به ایستگاه پایه دارای زاویه‌ی پراکندگی σ_θ هستند، احاطه شده است. بنابراین، با فرض اینکه پراکنده کننده‌ها دارای توزیع گوسی هستند، ماتریس کوواریانس کانال نرمالیزه شده بین ایستگاه پایه و کاربر سلولی می‌تواند با رابطه‌ی زیر تقریب زده شود:

$$\left[\hat{\mathbf{R}}_i(\theta_i, \sigma_\theta) \right]_{k,l} = e^{j\pi(k-l)\sin\theta_i} e^{-0.5(\pi(k-l)\sigma_\theta \cos(\theta_i))^2}, \quad (24)$$

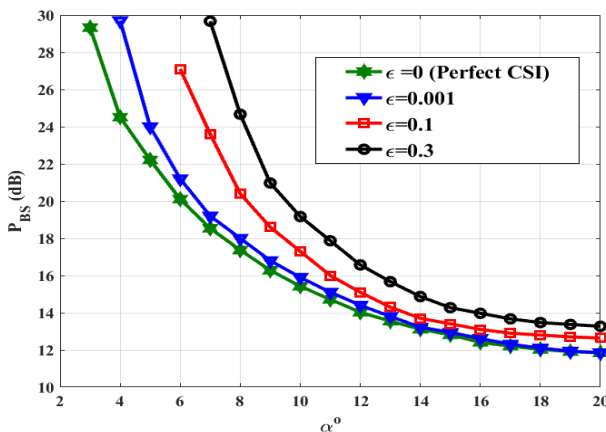
$$i \in \{1, 2, \dots, N\} \cup \{R\}.$$

ضرایب کانال‌های دیگر به صورت مقادیر رندوم گوسی نرمالیزه شده با میانگین صفر و واریانس واحد در نظر گرفته شده‌اند. فرض کرده‌ایم که توان D_T ثابت و برابر $P_0 = 0\text{dB}$ است. همچنین، توان نویز در همه‌ی کاربران سلولی و همین‌طور در D_R یکسان و برابر σ_n^2 فرض شده است. علاوه بر آن، فرض کرده‌ایم که کران بالای همه‌ی خطاها یکسان و برابر ε است. به عبارتی $\sigma_{ei}^2 = \sigma_e^2$ ، $i = 1, 2, \dots, N$ است. همین‌طور به ازای $\varepsilon_i = \delta_i = \varepsilon$ و $p_i = p$ در نظر گرفته شده‌اند. در تمامی شبیه‌سازی‌ها، نمودارها فقط برای حالت‌هایی که مسأله قابل حل بوده رسم شده‌اند.

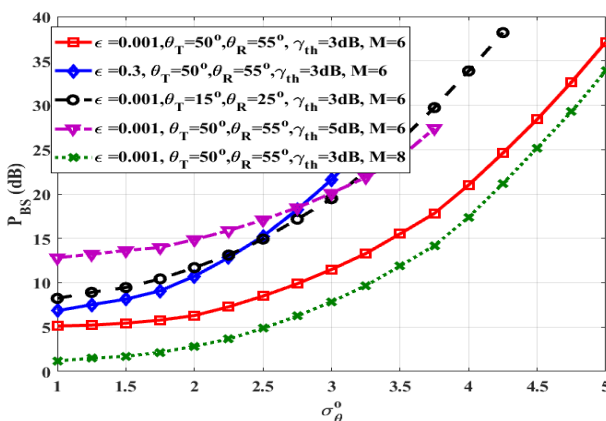
در شکل (۲) توان مصرفی در ایستگاه پایه بر حسب α به‌ازای مقادیر مختلف ε رسم شده است. در اینجا فرض شده است که $M = 8$ ، $\gamma_{th} = 3\text{dB}$ ، $\sigma_\theta = 2$ ، $\theta_T = 50^\circ$ و $\theta_R = 55^\circ$ همان‌طور که انتظار داریم، با افزایش ε ، توان مصرفی در ایستگاه پایه افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌کنیم که با افزایش α توان مصرفی در ایستگاه پایه کاهش می‌یابد. این قابل قبول است زیرا با افزایش فاصله بین کاربران شکل دومی پرتو دقیق‌تر خواهد بود.

در شکل (۳) توان مصرفی در ایستگاه پایه بر حسب σ_θ به ازای مقادیر مختلف ε ، θ_T ، θ_R ، γ_{th} و M زمانی که $\alpha = 10^\circ$ است، رسم شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش σ_θ توان مصرفی ایستگاه پایه افزایش می‌یابد. این به این دلیل است که همبستگی فضایی بین عناصر آرایه آنتن ایستگاه پایه مربوط به کانال‌های فضایی بین ایستگاه پایه و کاربران سلولی کاهش یافته و تداخل از یک لینک

به لینک دیگر افزایش پیدا می‌کند؛ در نتیجه برای تضمین SINR توان مصرفی ایستگاه پایه افزایش می‌یابد. همچنین شکل (۳) مشاهده می‌شود که با افزایش ε توان مصرفی افزایش می‌یابد. علاوه بر این ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه توان مصرفی کاهش می‌یابد زیرا با داشتن آنتن‌های بیشتر شکل‌دهی پرتو دقیق‌تر خواهد بود. همین‌طور توان مصرفی زمانی که زوج D2D در بین کاربران سلولی نیستند ($\theta_T = 50^\circ$ ، $\theta_R = 55^\circ$) نسبت به حالتی که زوج D2D در بین کاربران سلولی قرار می‌گیرند ($\theta_T = 15^\circ$ ، $\theta_R = 25^\circ$) کاهش می‌یابد زیرا در حالت اول فرستنده زوج D2D در بین دو کاربر سلولی است ولی در حالت دوم تنها به یکی از کاربران سلولی نزدیک است؛ بنابراین شکل‌دهی پرتو در حالت دوم نسبت به حالت اول دقیق‌تر خواهد بود و در نتیجه توان مصرفی ایستگاه پایه کمتر خواهد بود. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش γ_{th} توان مصرفی افزایش می‌یابد. زیرا برای رسیدن به SINR بالاتر به توان بیشتری نیاز است.



شکل (۲): توان مصرفی ایستگاه پایه بر حسب α به ازای مقادیر مختلف ε زمانی که $M = 6$ ، $\gamma_{th} = 3\text{dB}$ ، $\sigma_\theta = 2$ ، $\theta_T = 50^\circ$ و $\theta_R = 55^\circ$

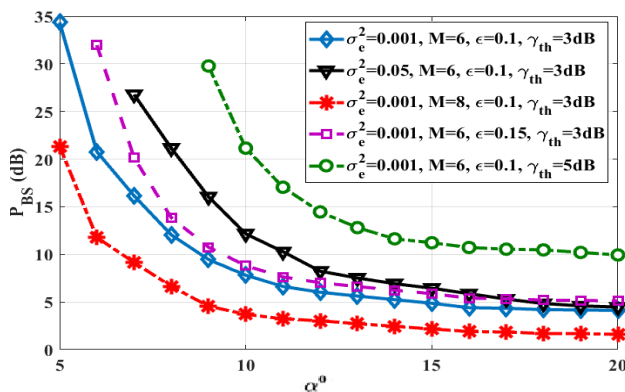


شکل (۳): توان مصرفی ایستگاه پایه بر حسب σ_θ به ازای مقادیر مختلف ε ، θ_T ، θ_R ، γ_{th} ، M و $\alpha = 10^\circ$

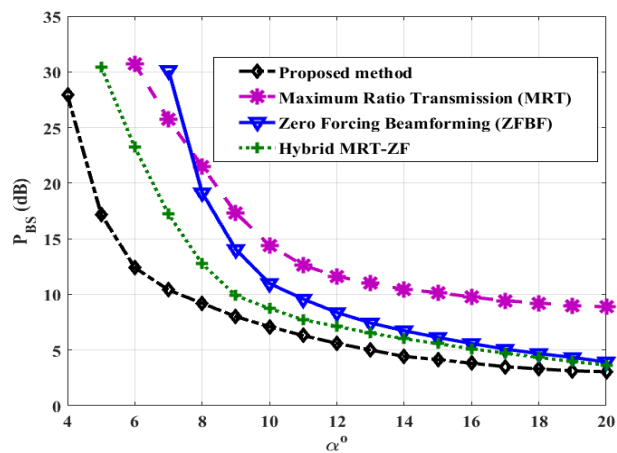
در شکل (۴) توان مصرفی در ایستگاه پایه بر حسب زاویه جدایی بین کاربران سلولی (α) برای روش پیشنهادی و سه روش شکل دومی پرتو [24] ZFBF, Hybrid MRT_ZF و MRT^{۴۵} مقایسه شده است.

در اینجا فرض کرده‌ایم که $\sigma_\theta = 2$ ، $\gamma_{th} = 3dB$ ، $\epsilon = 0.1$ ، $\theta_R = 55^\circ$ و $\theta_T = 50^\circ$ داشته باشیم. همان‌طور که انتظار داریم با افزایش γ_{th} ، σ_e^2 و ϵ توان مصرفی ایستگاه پایه افزایش یافته است ولی با افزایش M و در نتیجه امکان دقیق‌تر شدن شکل‌دهی پرتو، مصرف توان در ایستگاه پایه کاهش یافته است.

در شکل (۷) توان مصرفی ایستگاه پایه بر حسب σ_θ برای مکان‌های مختلف زوج D2D و مقادیر مختلف σ_e^2 در حالتی که $\sigma_\theta = 2$ ، $p = 80\%$ ، $\epsilon = 0$ ، $M = 6$ ، $\gamma_{th} = 3dB$ است، نمایش داده شده است. از این شکل ملاحظه می‌شود که با تغییر مکان زوج D2D و قرار گرفتن آنها به مکانی در بین کاربران سلولی و در نتیجه ایجاد تداخل بیشتر روی کاربران سلولی، توان مصرفی در ایستگاه پایه افزایش خواهد یافت. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش σ_θ توان مصرفی ایستگاه پایه افزایش می‌یابد. این به این دلیل است که همبستگی فضایی بین عناصر آرایه آنتن ایستگاه پایه مربوط به کانال‌های فضایی بین ایستگاه پایه و کاربران سلولی کاهش می‌یابد و تداخل از یک لینک به لینک دیگر افزایش می‌یابد. در نتیجه برای تضمین QoS کاربران سلولی، توان مصرفی در ایستگاه پایه افزایش می‌یابد.

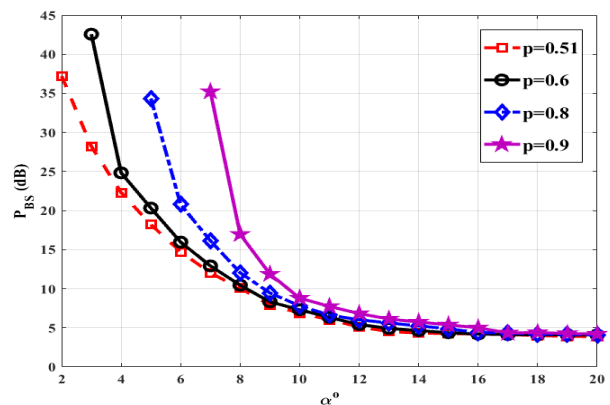
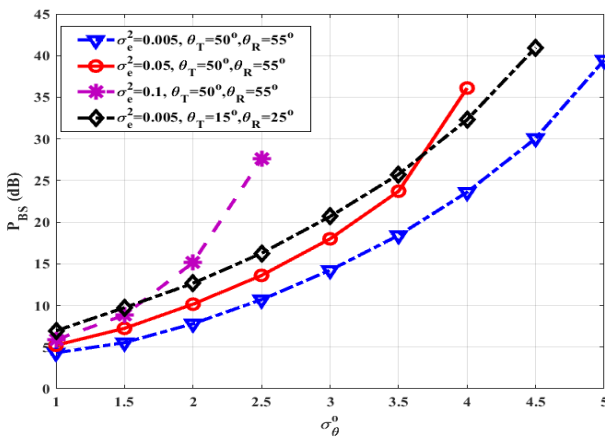


شکل (۴): مقایسه عملکرد الگوریتم پیشنهادی با روش‌های شکل‌دهی پرتو Hybrid MRT_ZF و ZFBF، MRT بر حسب α به ازای $\theta_T = 50^\circ$ ، $\gamma_{th} = 3dB$ ، $\sigma_\theta = 2$ ، $M = 6$ ، $\epsilon = 0.1$ و $\theta_R = 55^\circ$



شکل (۵): توان مصرفی ایستگاه پایه بر حسب α به ازای مقادیر مختلف p زمانی که $\theta_T = 50^\circ$ ، $\sigma_\theta = 2$ ، $\gamma_{th} = 3dB$ ، $M = 6$ و $\theta_R = 55^\circ$

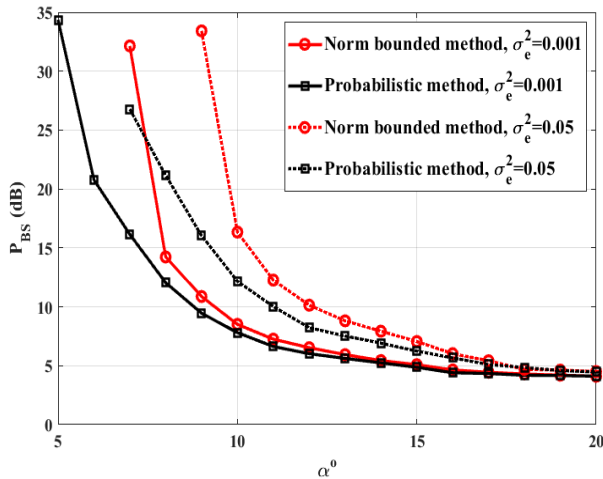
شکل (۶): توان مصرفی ایستگاه پایه بر حسب σ_θ به ازای مقادیر مختلف ϵ ، γ_{th} ، σ_e^2 زمانی که $\sigma_\theta = 2$ ، $p = 80\%$ ، $\theta_R = 55^\circ$ ، $\theta_T = 50^\circ$



شکل (۷): توان مصرفی ایستگاه پایه بر حسب σ_θ برای مکان‌های مختلف زوج D2D و مقادیر مختلف σ_e^2 به ازای $p = 80\%$ ، $\gamma_{th} = 3dB$ و $M = 6$ ، $\epsilon = 0.1$ ، $\sigma_\theta = 2$

شکل (۶): توان مصرفی ایستگاه پایه بر حسب α به ازای مقادیر مختلف σ_e^2 ، ϵ ، γ_{th} و M زمانی که $\sigma_\theta = 2$ ، $p = 80\%$ و $\theta_T = 50^\circ$

شکل (۷): توان مصرفی ایستگاه پایه بر حسب α به ازای مقادیر مختلف σ_e^2 ، ϵ ، γ_{th} و M زمانی که $\sigma_\theta = 2$ ، $p = 80\%$ و $\theta_T = 50^\circ$

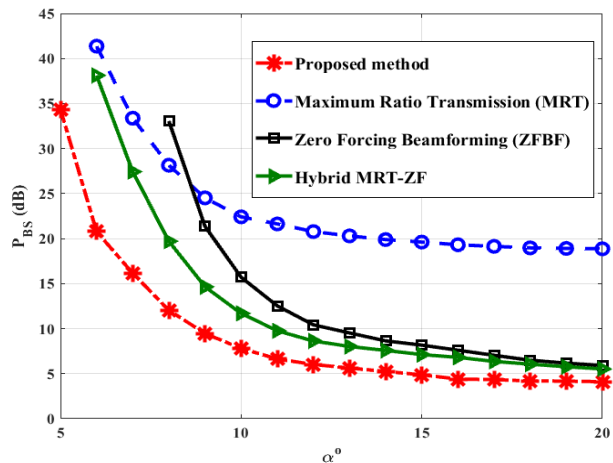


شکل (۹): مقایسه عملکرد دو الگوریتم پیشنهادی با یکدیگر به ازای $M = 6$ و $\gamma_{th} = 3dB$

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، شکل دهی پرتو و کمینه سازی توان مصرفی در ایستگاه پایه در یک سیستم سلولی با ارتباطات D2D زیرپایه در مدلی نزدیک به واقعیت که در آن تخمین کواریانس کانالها دارای خطا بود، مطالعه شد. روش پیشنهادی توان مصرفی در ایستگاه پایه را کمینه می کرد در حالی که کیفیت سرویس را برای همه کاربران بیشتر از حد آستانه ای نگه می داشت. ملاحظه شد که ایستگاه پایه در حالتی که CSI غیردقیق فرض شود نسبت به حالتی که CSI دقیق در نظر گرفته شود، توان بیشتری مصرف می کند و هر چقدر نرم خطا و یا واریانس خطا بیشتر باشد این اختلاف بیشتر است. همچنین تأثیر عوامل مختلف سیستم بر روی عملکرد الگوریتم بررسی شد و مشاهده گردید که علاوه بر نرم خطا و یا واریانس آن، محل قرار گیری زوج D2D نیز تأثیر مهمی بر میزان مصرف توان دارد. ملاحظه شد که افزایش تعداد آنتن های ایستگاه پایه و افزایش فاصله بین کاربران سلولی به دلیل امکان داشتن شکل دهی پرتو دقیق تر، موجب کاهش توان مصرفی در ایستگاه پایه می شود. علاوه بر آن، مشاهده شد که در نظر گرفتن حد آستانه ای بزرگتر برای کیفیت سرویس کاربران سلولی منجر به افزایش توان مصرفی در ایستگاه پایه می شود. همچنین شبیه سازی ها نشان دادند که الگوریتم های پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به Hybrid MRT_ZF، MRT و ZFBF دارند و توان کمتری را مصرف می کنند. علاوه بر آن، در مقایسه ی دو الگوریتم پیشنهادی ملاحظه شد که ایستگاه پایه در روش دوم (که در آن خطا با توزیعی مشخص در نظر گرفته شده بود) نسبت به روش اول (که در آن خطا با نرم محدود در نظر گرفته شده بود و از بدترین حالت SINRها برای حل مسأله استفاده شده بود) توان کمتری مصرف می کند.

عملکرد الگوریتم پیشنهادی با سه الگوریتم شکل دهی پرتو Hybrid MRT_ZF، MRT و ZFBF در شکل (۸) مقایسه شده است. در اینجا فرض شده است که $p = 80\%$ ، $\sigma_e^2 = 0.001$ ، $\sigma_0 = 2$ ، $\varepsilon = 0.1$ و $\gamma_{th} = 3dB$ است. از این شکل پیداست که الگوریتم پیشنهادی ما مخصوصاً در α های کوچک، توان کمتری را نسبت به روش های دیگر مصرف می کند.



شکل (۸): مقایسه عملکرد الگوریتم پیشنهادی با روش های شکل دهی پرتو Hybrid MRT_ZF، MRT و ZFBF بر حسب α به ازای $p = 80\%$ ، $\sigma_0 = 2$ ، $\sigma_e^2 = 0.001$

$$\gamma_{th} = 3dB \text{ و } M = 6, \varepsilon = 0.1$$

در شکل (۹) توان مصرفی ایستگاه پایه بر حسب α به ازای مقادیر مختلف σ_e^2 برای دو الگوریتم پیشنهادی با فرض $p = 80\%$ ، $\gamma_{th} = 3dB$ ، $M = 6$ و $\theta_T = 50^\circ$ و $\theta_R = 55^\circ$ مقایسه شده است. برای این کار، در روش اول ε_i با جستجوی عددی طوری انتخاب شده است که $p = 80\%$ شود و در هر دو روش $\delta_i = 0.1$ فرض شده است. از این شکل ملاحظه می شود که توان مصرفی در ایستگاه پایه در روش دوم (خطا با توزیع آماری گوسی) از روش اول (خطا با نرم محدود و در نظر گرفتن بدترین حالت) کمتر است. مخصوصاً در α های کوچک که شکل دهی پرتو و تضمین QoS به دلیل نزدیک تر بودن کاربران مشکل تر است، این اختلاف بیشتر است.

ضمایم

- [7] Lee, N., Lin, X., Andrews, J.G. and Heath Jr, R.W., "Power control for D2D underlaid cellular networks: Modeling, algorithms, and analysis, " *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 33, No. 1, pp. 1–13, 2015.
- [8] Yu, C.H., Tirkkonen, O., Doppler, K. and Ribeiro, C., "On the performance of device-to-device underlay communication with simple power control, " in *Proc. IEEE Veh. Tech. Conf., (VTC), Spring, Barcelona, Spain*, pp. 1–5, 2009.
- [9] Gu, J., Bae, S.J., Choi, B.G. and Chung, M.Y., "Dynamic power control mechanism for interference coordination of device-to device communication in cellular networks, " in *Proc. Third Int. Conf. Ubiquitous and Future Net. (ICUFN), Dalian, China*, pp. 71–75, 2011.
- [10] Belleschi, M., Fodor, G., Abrardo, A., "Performance analysis of a distributed resource allocation scheme for D2D communications", in *Proc. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 358–362, 2011.
- [11] Lin, M., Ouyang, J., Zhu, W.-P., "Joint beamforming and power control for device-to-device communications underlying cellular networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 34, No. 1, pp. 138–150, 2016.
- [12] Maghsudi, S., Stanczak, S., "Hybrid centralized distributed resource allocation for device-to-device communication underlying cellular networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 65, No. 4, pp. 2481–2495, 2016.
- [13] Mirza, J., Zheng, G., Wong, K.K. and Saleem, S., "Joint Beamforming and Power Optimization for D2D Underlying Cellular Networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018.
- [14] Van Chien, T., Bjornson, E. and Larsson, E.G., "Downlink power control for massive MIMO cellular systems with optimal user association, " in *Proc. IEEE Intl. Conf. Commun., (ICC), Kuala Lumpur, Malaysia*, pp. 1–6, 2016.
- [15] Liu, Y. F., Dai, Y. H., Luo, Z. Q., "Coordinated beamforming for MISO interference channel: Complexity analysis and efficient algorithms", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 59, No. 3, pp. 1142–1157, 2011.
- [16] Min, H., Lee, J., Park, S. and Hong, D., "Capacity enhancement using an interference limited area for device-to-device uplink underlying cellular networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 10 No. 12, pp.3995–4000, 2011.
- [17] Min, H., Seo, W., Lee, J., Park, S. and Hong, D., "Reliability improvement using receive mode selection in the device-to-device uplink period underlying cellular networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 10, No. 2, pp.413–418, 2011.
- [18] Feng, D., Lu, L., Yi, Y.W., Li, G.Y., Feng, G. and Li, S., "QoS-aware resource allocation for device-to-device communications with channel uncertainty", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vl. 65, No. 8, pp. 6051–6062, 2016.
- [19] Le, T.A., Nakhai, M.R. and Navaie, K., "A robust transmission strategy for multi-cell interference networks", In *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1-6, 2015.
- [20] Shaker, R., Khakzad, H., Taherpour, A., Khattab, T. and Hasna, M. O., " Hybrid underlay/overlay cognitive radio system with hierarchical modulation in the presence of channel estimation error", In *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 967–972, 2014.

اگر $\mathbf{G} \in C^{N \times M}$ یک ماتریس تصادفی هرمیتی باشد، و اگر مقادیر حقیقی روی قطر اصلی آن و همچنین مقادیر مختلط سایر عناصر آن متغیرهای رندوم گوسی مستقل با میانگین صفر و واریانس σ^2 باشند، آن گاه برای هر ماتریس قطعی $\mathbf{A} \in C^{N \times M}$ خواهیم داشت:

$$\text{tr}(\mathbf{AG}) \sim N_c(0, \sigma^2 \text{tr}(\mathbf{AA}^H)) \quad (25)$$

که $(.,.)$ توزیع گوسی مختلط است. اگر $MN \rightarrow \infty$ با توجه به قضیه حد مرکزی، توزیع $\text{tr}(\mathbf{AG})$ صرف نظر از توزیع عناصر \mathbf{G} ، با توجه به اینکه آنها مستقل هستند و از توزیع آماری مشابه گرفته می-شوند، گوسی خواهد بود. اثبات: توجه کنید که:

$$\text{tr}(\mathbf{AG}) = \sum_i^M \sum_j^N a_{ij} g_{ji} \quad (26)$$

از آنجا که عناصر \mathbf{G} مستقل گوسی با میانگین صفر هستند، بنابراین (24) هم دارای توزیع گوسی با میانگین صفر است. واریانس آن نیز از رابطه (27) قابل محاسبه است:

$$\begin{aligned} E\{\text{tr}(\mathbf{AG})(\text{tr}(\mathbf{AG}))^*\} \\ &= E\{\text{vec}(\mathbf{A}^H)^H \text{vec}(\mathbf{G}) \text{vec}(\mathbf{G})^H \text{vec}(\mathbf{A}^H)\} \\ &= \text{vec}(\mathbf{A}^H)^H \sigma^2 \mathbf{I}_{NM} \text{vec}(\mathbf{A}^H) \\ &= \sigma^2 \text{tr}(\mathbf{A}^H \mathbf{A}) \end{aligned} \quad (27)$$

که $\text{vec}(\cdot)$ و \mathbf{I}_{NM} به ترتیب ماتریس همانی و عملگر برداری را نشان می‌دهند. به این ترتیب اثبات انجام شده است.

مراجع

- [1] زراعتکار مقدم، جواد، فرخی، حمید، ندا، ناصر، "مدیریت تداخل در شبکه‌های رادیو شناختگر با استفاده از شکل‌دهی پرتو همکارانه تحت اطلاعات غیر دقیق کانال" *نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران*، سال چهاردهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۶
- [2] علیزاده، سجاد، خالقی بیزکی، حسین، اخوت، مجید، "بهبود کارایی سیستم UWB مبتنی بر TiR در شرایط تخمین‌گر غیر ایده‌ال کانال" *نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران*، سال یازدهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۹۳
- [3] Gupta, A., Jha, R., "A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies, " *IEEE Access*, Vol. 3, pp. 1206-1232, 2015.
- [4] Tehrani, M.N., Uysal, M. and Yanikomeroglu, H., "Device-to-device communication in 5G cellular networks: challenges, solutions, and future directions, " *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 52, pp. 86–92, 2014.
- [5] Lin, X., Andrews, J., Ghosh, A. and Ratasuk, R., "An overview of 3GPP device-to-device proximity services, " *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 52, No. 4, pp. 40–48, 2014.
- [6] Malandrino, F., Limani, Z., Casetti, C. and Chiasserini, C.F., "Interference-aware downlink and uplink resource allocation in HetNets with D2D support, " *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 14, No. 5, pp. 2729–2741, 2015.

-
- ⁴¹ Positive semi-definite
 - ⁴² Closed form solution
 - ⁴³ Worst case
 - ⁴⁴ Scatterers
 - ⁴⁵ Maximum ratio transmission

- [21] Ponukumati, D., Gao, F. and Bode, M., "Robust multicell downlink beamforming based on second-order statistics of channel state information", In IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), pp. 1-5, 2011.
- [22] Couillet, R., & Debbah, M., "Random matrix methods for wireless communications", Cambridge University Press, 2011.
- [23] Bengtsson, M., Ottersten, B., "Optimal downlink beamforming using semidefinite optimization", in Proc. 37th Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing, pp. 987-996, 1999.
- [24] Timotheou, S., Krikidis, I., Zheng, G. and Ottersten, B., "Beamforming for MISO interference channels with QoS and RF energy transfer", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 13, No. 5, pp.2646-2658, 2014.

زیر نویس ها

- ¹ Spectrum efficiency
- ² Device to Device
- ³ Throughput
- ⁴ Fifth-generation
- ⁵ In-band
- ⁶ Out-band
- ⁷ Overlay
- ⁸ Underlay
- ⁹ Uplink
- ¹⁰ Downlink
- ¹¹ Download
- ¹² Voice Over Internet Protocol
- ¹³ Distributed
- ¹⁴ Centralized
- ¹⁵ Single-input single-output
- ¹⁶ Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
- ¹⁷ Maximized
- ¹⁸ Dynamic
- ¹⁹ Minimizing
- ²⁰ Non-deterministic Polynomial-time hard
- ²¹ Beamforming
- ²² Rayleigh Fading
- ²³ Rician Fading
- ²⁴ Quality of service
- ²⁵ Channel State Information
- ²⁶ Quantization
- ²⁷ Feedback delay
- ²⁸ Imperfect
- ²⁹ Partial
- ³⁰ Robust
- ³¹ Instantaneous
- ³² Covariance
- ³³ Second order statistics
- ³⁴ Zero forcing beamforming
- ³⁵ Frobenius norm
- ³⁶ Semidefinite relaxation technique
- ³⁷ Frequency Division Duplex
- ³⁸ Time Division Duplexing
- ³⁹ Time Slots
- ⁴⁰ Hermitian