

## معیار چند هدفی برای انتخاب آنتن در یک ایستگاه مرکزی Full-Duplex

محمد لاری<sup>۱</sup>، استادیار؛ سينا عصائیان<sup>۲</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران - m\_lari@semnan.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران - sinaasaeian@semnan.ac.ir

**چکیده:** استفاده از سیستم‌های مخابراتی تمام دوطرفه یا در اختصار FD، روش جدیدی برای افزایش بهره طیفی است. به همین دلیل هم مورد توجه جدی در نسل جدید سیستم‌های مخابراتی قرار گرفته است. چالش اصلی این روش، تداخل خودی است که باید به شکل مناسبی کاهش یابد. در این مقاله، ایستگاه مرکزی یک شبکه سلولی را به صورت چندآنتنی و FD در نظر گرفته‌ایم و برای رفع مشکل تداخل خودی، از ترفند انتخاب آنتن استفاده کرده‌ایم. همچنین برای انتخاب آنتن مناسب، یک معیار جدید ارائه کرده‌ایم. در این معیار جدید، مسئله انتخاب آنتن به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفی مدل‌سازی شده است. در این معیار جدید آنتن‌هایی جهت دریافت و ارسال سیگنال انتخاب می‌شوند که هم‌زمان علاوه بر کمینه‌کردن بهره مسیر تداخلی، بهره کانال در مسیرهای فراسو (UL) و فروسو (DL) را نیز بیشینه کنند. از آنجا که هدف ایستگاه مرکزی عملکرد مناسب در هر دو مسیر UL و DL و کاهش تداخل خودی به صورت هم‌زمان است، معیار چندهدفی عملکرد بهتری در مقایسه با معیارهای تک‌هدفی دارد. در معیارهای متداول تک‌هدفی، فقط عملکرد مسیر UL و DL یا مسیر تداخلی در نظر گرفته می‌شود. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که معیار جدید، آهنگ‌گذردهی بالاتری نسبت به معیارهای انتخاب آنتن متداول تک‌هدفی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** انتخاب آنتن، بهینه‌سازی چندهدفی، مخابرات تمام دوطرفه.

## Multi-objective Criterion for Antenna Selection in a Full Duplex Base Station

Mohammad Lari<sup>1</sup>, Assistant professor; Sina Asaeian<sup>2</sup>, MSc student

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, Email: m\_lari@semnan.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, Email: sinaasaeian@semnan.ac.ir

**Abstract:** Using full duplex communication systems called FD, is a new technique for increasing the spectral efficiency. That's why it has been considered seriously in the new generation of communication systems. The main challenge of the full-duplex system is the self-interference, which has to be decreased properly. In this paper, we consider a full-duplex cellular network base station and using the antenna selection technique to reduce its self-interference issue. For appropriate antenna selection, we present a new criterion. In this new criterion, antenna selection has been modeled and solved as a multi-objective optimization problem. In this new criterion, antennas which simultaneously minimizes interference channel gain and maximizes uplink (UL) and downlink (DL) channel gains are selected for transmission and reception. Since the goal of the base station is a good performance in both the UL and DL channels and reduction of the self-interference simultaneously, the multi-objective criterion has a better performance when compared to single-objective criteria. In the common single-objective criteria, only the UL and DL channels or interference channel is considered. Finally, simulation results show that the new criterion has more throughput rate than the other single-objective antenna selection technique in the full duplex systems.

**Keywords:** Antenna Selection, Full Duplex Communication, Multi-objective Optimization.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۱۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۱۸

نام نویسنده مسئول: محمد لاری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - سمنان - کیلومتر ۵ جاده سمنان دامغان - روبروی پارک سوکان - دانشگاه سمنان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر و مخصوصاً با فراگیر شدن استفاده از تلفن‌ها و اسباب هوشمند، شاهد افزایش فوق‌العاده ترافیک کاربران در شبکه‌های مخابراتی هستیم. تحقیقات میدانی حکایت از آن دارد که ترافیک داده‌ها در دهه آینده حدوداً ۱۰۰۰ برابر میزان فعلی می‌شود [۱]. به همین منظور، طراحان شبکه‌های مخابراتی نسل جدید، تمهیدات متنوع و متفاوتی را جهت پاسخگویی به این حجم از ترافیک درخواستی در نظر گرفته‌اند. راهکارهای پیشنهادی شامل کوچک و چگال کردن سلول‌های شبکه، استفاده از باندهای فرکانسی جدید و دست‌نخورده و همچنین روش‌های نوین مخابراتی جهت افزایش بهره طیفی و بهره‌برداری بهتر از منابع مخابراتی است [۱، ۲]. یکی از این موارد، ارسال و دریافت تمام دوطرفه<sup>۱</sup> است (این روش را در ادامه به اختصار FD می‌نامیم). این ترند، روش جدیدی در مقایسه با ارسال و دریافت نیمه دوطرفه<sup>۲</sup> است (این روش را هم در ادامه به اختصار HD می‌نامیم). با توجه به افزایش بهره طیفی در مخابرات FD در مقایسه با مخابرات HD، این روش در مقاله حاضر مورد توجه قرار گرفته است.

در همه سیستم‌های مخابراتی دو یا چند گره وجود دارد که این گره‌ها معمولاً دو به دو در حال تبادل داده باهم هستند. یک گره گاهی در نقش فرستنده است و برای گره دیگر داده ارسال می‌کند. همین گره در زمان دیگر در نقش گیرنده است و از یک گره دیگر داده دریافت می‌کند. بنابراین، اغلب گره‌های مخابراتی هم نقش فرستندگی دارند و هم نقش گیرندگی. در سیستم‌های مخابراتی فعلی که به صورت HD کار می‌کنند، فرستندگی و گیرندگی یک گره یا در شکاف‌های زمانی متفاوت و یا در پهنای فرکانسی متفاوت اتفاق می‌افتد. در حالت اول، گره در شکاف‌های خاصی از زمان در نقش فرستنده داده ارسال کرده و در شکاف‌های زمانی دیگر در نقش گیرنده داده دریافت می‌کند. همچنین در حالت دوم، اگرچه گره‌ها در یک‌زمان هم ارسال دارند و هم دریافت می‌کنند، اما ارسال و دریافت در پهنای فرکانسی متفاوت انجام می‌شود و تداخلی بین ارسال و دریافت هم‌زمان نخواهیم داشت. اما در سیستم‌های مخابراتی FD، ارسال و دریافت یک گره به صورت هم‌زمان و هم‌فرکانس انجام می‌شود. به این ترتیب، وقتی گیرنده یک گره روشن است و داده دریافت می‌کند، فرستنده‌اش نیز هم‌زمان کار می‌کند و داده ارسال می‌کند. بنابراین، توان ارسال فرستنده که معمولاً قوی هم هست، به راحتی به گیرنده خودی نشت کرده و تداخل خودی<sup>۳</sup> درست می‌کند. دلیل اینکه سیستم‌های مخابراتی تاکنون به صورت FD پیاده‌سازی نشده‌اند نیز دقیقاً همین تداخل خودی نسبتاً شدید است که حتی ممکن است به توانی تا 100dB بالاتر از توان نویز گیرنده هم برسد [۳، ۴]. در حال حاضر با توجه به تحقیقات انجام شده و آزمایش‌های عملی در سیستم‌های آزمایشگاهی ساخته شده، امکان

کاهش این تداخل تا مقداری در حدود توان نویز گیرنده به وجود آمده است. به همین سبب، استفاده از روش FD در نسل‌های جدید سیستم‌های مخابراتی پیشنهاد شده است [۵].

مشکل اصلی سیستم‌های مخابراتی FD، تداخل خودی شدیدی است که از فرستنده یک گره به گیرنده همان گره وارد می‌شود. روش‌های مختلف برای کاهش این تداخل وجود دارد. کاهش تداخل اغلب یا در حوزه انتشار و توسط آنتن ارسال و دریافت، یا در حوزه آنالوگ و در بخش رادیویی<sup>۴</sup> گیرنده و یا در حوزه دیجیتال انجام می‌شود [۴، ۵]. با توجه به شدت بالای این تداخل، سیستم‌های عملی باید هم‌زمان از ترندهای مناسب در هر سه حوزه انتشار، آنالوگ و دیجیتال استفاده کنند تا در نهایت تداخل باقیمانده به حدود (یا کمتر از) توان نویز گیرنده برسد [۵]. آن وقت سیستم FD قادر است بدون هیچ مشکلی، به صورت هم‌زمان و در یک بازه فرکانسی، هم ارسال و هم دریافت داشته باشد. بنابراین برای ارتباط با یک گره دیگر، نسبت به سیستم مشابه HD، یک شکاف زمانی کمتر و یا یک بازه فرکانسی کمتر نیاز دارد. این یعنی (تقریباً) دو برابر شدن بهره طیفی که بسیار مطلوب سیستم‌های مخابراتی نسل جدید است.

کاهش تداخل در حوزه انتشار بسیار ضروری است. زیرا شدت تداخل خودی بالا است و اگر این تداخل خودی شدید وارد بخش رادیویی گیرنده شود، سبب اشباع مدارهای رادیویی شده و عملکرد گیرنده را به کلی مختل می‌کند [۶]. روش‌های کاهش تداخل در حوزه انتشار اغلب شامل انتخاب آنتن، استفاده از جاذب‌های الکترومغناطیسی بین آنتن فرستنده و گیرنده [۷] و استفاده از پلاریزاسیون‌های متعامد [۸، ۹] جهت ارسال و دریافت با کمترین اثر تزویج است. از آنجا که روش‌های حوزه انتشار قادر به حذف مقدار قابل توجهی از تداخل خودی نیستند، بنابراین قبل از تبدیل سیگنال به مقادیر دیجیتال، باید بخش دیگری از تداخل خودی در حوزه آنالوگ نیز حذف شود. در غیر این صورت و با توجه به محدود بودن بازه دینامیکی<sup>۵</sup> مبدل آنالوگ به دیجیتال<sup>۶</sup>، ممکن است بخشی از داده‌ها از بین بروند. با توجه به قدرت پردازشی محدودی که در بخش آنالوگ گیرنده وجود دارد، حذف تداخل در این بخش اغلب شامل تخمین تداخل و تفریق آن از سیگنال آنالوگ دریافتی است [۱۰]. سپس سیگنال آنالوگ به دیجیتال تبدیل می‌شود و تداخل خودی باقیمانده، در حوزه دیجیتال تا حد زیادی کاهش می‌یابد. با توجه به قدرت پردازشی بالا در بخش دیجیتال، روش‌های کاهش تداخل در حوزه دیجیتال بسیار متنوع هستند. در این بین می‌توان به هم‌سوسازی تداخل<sup>۷</sup> [۱۱] و روش‌های مبتنی بر زیرفضا [۱۲، ۱۳] اشاره کرد. در بیشتر این روش‌ها از درجه آزادی<sup>۸</sup> موجود در سیستم‌های چندآنتنی جهت جدا کردن فضای تداخل و سیگنال مطلوب استفاده می‌شود.

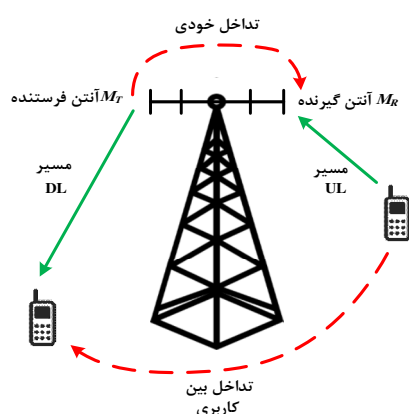
انتخاب آنتن علاوه بر قابلیت کاهش تداخل، سبب ساده‌سازی، کاهش ابعاد و کاهش توان مصرفی بخش رادیویی گیرنده نیز می‌شود. از این رو استفاده از این روش در سیستم‌های مخابراتی چندآنتنی بسیار متداول و پرطرفدار است. در این مقاله نیز از این ترند برای

خدمت به کاربران در هر دو مسیر DL و UL به همراه کمترین تداخل خودی هست، بنابراین در حالت کلی با یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفی<sup>۱۴</sup> روبرو هستیم. از این رو معیار ارائه شده برای انتخاب آنتن نیز به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفی طرح و حل شده است. در نهایت نیز با شبیه‌سازی نشان خواهیم داد که معیار جدید عملکرد مناسبی مخصوصاً در مقایسه با معیارهای متداول دارد. بسیاری از مسئله‌های دنیای پیرامون ما ماهیت چندهدفی دارند (به عنوان مثال [۲۰] یا [۲۱] را ببینید). بنابراین مدل‌سازی و حل این مسئله‌ها به صورت بهینه‌سازی چندهدفی بسیار مطلوب‌تر از روش‌های معمول تک‌هدفی است.

در ادامه این مقاله ابتدا مدل سیستم را در بخش ۲ توضیح داده و معیارهای متداول انتخاب آنتن در ایستگاه مرکزی را بیان کرده‌ایم. سپس در بخش ۳ معیار چندهدفی برای انتخاب آنتن را توضیح داده و در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی را آورده‌ایم. در انتها در بخش ۵ نتیجه‌گیری مقاله آورده شده است.

## ۲- مدل سیستم

مدل سیستم مطابق شکل ۱ شامل یک ایستگاه مرکزی FD با  $M_T$  آنتن فرستنده و  $M_R$  آنتن گیرنده است. در حالت کلی  $K_D$  پایانه کاربری در مسیر DL از ایستگاه مرکزی داده دریافت می‌کنند و  $K_U$  پایانه کاربری در مسیر UL در حال ارسال داده به ایستگاه مرکزی هستند. پایانه‌ها به صورت HD کار می‌کنند. یعنی هر پایانه در شکاف مشخصی از زمان داده‌هایش را برای ایستگاه مرکزی ارسال می‌کند. در شکاف زمانی دیگر، داده‌هایش را از ایستگاه مرکزی دریافت می‌کند. شکاف زمانی ارسال و دریافت کاربران مختلف روی یکدیگر منطبق نیست. بنابراین ایستگاه مرکزی FD می‌تواند به‌طور هم‌زمان به  $K_D$  پایانه کاربری در مسیر DL و  $K_U$  پایانه کاربری در مسیر UL خدمت دهد.



شکل ۱: ایستگاه مرکزی چندآنتنی FD

دسترسی چندگانه کاربران را یکی از روش‌های متداول و متعامد مانند OFDMA<sup>۱۵</sup> در نظر می‌گیریم. چون عملکرد ایستگاه مرکزی به صورت FD است، بنابراین ایستگاه مرکزی هر بلوک زمان-فرکانس<sup>۱۶</sup> خود را به‌طور هم‌زمان در اختیار یک کاربر DL و یک کاربر UL می‌

کاهش تداخل داخلی استفاده شده است. مقالات متعددی به بررسی این موضوع پرداخته‌اند. یکی از بهترین مقالات در این زمینه مرجع [۱۴] است که در آن سیستم FD را به صورت چندآنتنی در نظر گرفته و با استفاده از انتخاب آنتن یا انتخاب پرتو، تداخل خودی را کاهش داده و حتی در بعضی حالت‌ها صفر کرده است. این روش در مرجع [۱۵] به همراه انتخاب رله در رله‌های تقویت و ارسال<sup>۱</sup> جهت کاهش تداخل استفاده شده است. نویسندگان مقاله احتمال قطع را نیز محاسبه کرده‌اند. همچنین انتخاب آنتن در یک سیستم مخابراتی دوطرفه<sup>۱۱</sup> چندآنتنی FD نیز در مراجع [۱۶] و [۱۷] بررسی شده است. در این سیستم، دو گره به صورت هم‌زمان و هم‌فرکانس باهم داده ردوبدل می‌کنند. در مرجع [۱۶] نویسندگان پس از کاهش تداخل خودی با انتخاب یک آنتن در فرستنده و یک آنتن در گیرنده گره اول (و به همین ترتیب یک آنتن در فرستنده و یک آنتن در گیرنده گره دوم)، تداخل خودی را کاهش داده و میانگین مجموع نرخ و میانگین مجموع خطای سمبل را محاسبه کرده‌اند. در مرجع [۱۷] که حالت کلی‌تر [۱۶] است، تعداد آنتن‌های انتخابی در هر گره برای ارسال و دریافت دوطرفه لزوماً برابر یک نیست و می‌تواند بیشتر باشد. در این حالت نیز نویسندگان با تقریب‌های مناسب، میانگین مجموع نرخ در سیستم مخابراتی دوطرفه را محاسبه کرده‌اند. همچنین معیارهای مختلف جهت انتخاب آنتن مناسب در یک ایستگاه مرکزی<sup>۱۱</sup> در یک شبکه مخابرات سلولی که به صورت FD کار می‌کند، در [۱۸] مورد مطالعه قرار گرفته و احتمال قطع در هر دو مسیر فرسو<sup>۱۲</sup> و فراسو<sup>۱۳</sup> محاسبه شده است. در ادامه از اختصار DL برای مسیر فرسو و اختصار UL برای مسیر فراسو استفاده می‌کنیم.

ایستگاه مرکزی FD که موضوع مورد نظر در مقاله ما است، قابلیت ارسال داده برای یک پایانه کاربری در مسیر DL و دریافت داده از پایانه کاربری دیگر در مسیر UL را به صورت هم‌زمان و هم‌فرکانس دارد. بدیهی است که اگر ایستگاه مرکزی FD بتواند تداخل خودی را تا حد ممکن کاهش دهد و در یک بازه زمانی و به صورت هم‌فرکانس به کاربران DL و UL سرویس می‌دهد، بهره طیفی افزایش می‌یابد [۱۹]. در شبکه مخابرات سلولی، استفاده از ایستگاه مرکزی FD چند مزیت دارد. یکی اینکه معمولاً توان پردازشی در ایستگاه مرکزی بالا است. بنابراین امکان کاهش تداخل خودی تا حد نسبتاً زیادی وجود دارد. مزیت دیگر اینکه وقتی ایستگاه مرکزی به صورت FD پیاده‌سازی شود، بدون تغییر پایانه‌ها، امکان افزایش بهره طیفی وجود خواهد داشت. حتی لازم نیست پایانه‌ها از نحوه عملکرد ایستگاه مرکزی به صورت FD اطلاع داشته باشند. با توجه به این توضیحات، در مقاله حاضر، ایستگاه مرکزی شبکه سلولی به صورت FD در نظر گرفته شده و برای کاهش تداخل خودی در آن، از انتخاب آنتن استفاده شده است. در ادامه ابتدا دو معیار انتخاب آنتن که در [۱۸] بررسی شده است را به عنوان روش‌های متداول توضیح داده و نقطه‌ضعف آن دو معیار را بیان می‌کنیم. سپس معیار جدیدی برای انتخاب آنتن در ایستگاه مرکزی ارائه می‌دهیم. از آنجا که هدف ایستگاه مرکزی ارائه بهترین

$$\gamma_U = \frac{P_U g}{\sigma_0^2 + \eta P_D \alpha} \quad (۲)$$

می‌شود [۱۸]. در این دو رابطه  $\sigma_0^2$  توان نویز و  $0 \leq \eta \leq 1$  ضریبی است که میزان حذف تداخل خودی را در گیرنده FD نشان می‌دهد ( $\eta=0$ ) حذف کامل تداخل را نشان می‌دهد و  $\eta=1$  به معنی نشت کامل تداخل به گیرنده FD است. پس از انتخاب آنتن مناسب در مسیر DL و UL و با توجه به رابطه‌های (۱) و (۲)، آهنگ‌گذردهی مجموع کاربران DL و UL به صورت:

$$C_T = C_D(1 - p_{o,D}) + C_U(1 - p_{o,U}) \quad (۳)$$

نوشته می‌شود [۱۸]. جمله اول آهنگ‌گذردهی کاربر DL و جمله دوم آهنگ‌گذردهی کاربر UL است. در این رابطه  $P_{o,U}$  و  $P_{o,D}$  احتمال قطع به ترتیب در مسیر DL و UL و برابر

$$P_{o,D} = \Pr(\gamma_D < \gamma_{D,T}) \quad (۴)$$

$$P_{o,U} = \Pr(\gamma_U < \gamma_{U,T}) \quad (۵)$$

است و  $\Pr(\cdot)$  احتمال وقوع یک رخداد را نشان می‌دهد. همچنین،  $C_D$  و  $C_U$  ظرفیت قطع را به ترتیب در مسیر DL و UL نشان می‌دهند و  $\gamma_{U,T}$  و  $\gamma_{D,T}$  حد آستانه روی SINR در مسیر DL و UL است. مشخص است که ظرفیت قطع و این حد آستانه رابطه‌ای به صورت

$$C_D = \log_2(1 + \gamma_{D,T}) \quad (۶)$$

$$C_U = \log_2(1 + \gamma_{U,T}) \quad (۷)$$

دارند. در مرجع [۱۸] دو معیار بیشینه بهره در مسیر DL و UL و همچنین کمینه بهره در مسیر تداخلی برای انتخاب آنتن‌های فرستنده و گیرنده ایستگاه مرکزی مورد توجه قرار گرفته است.

## ۲-۱- معیار بیشینه بهره در مسیر DL و UL

در این معیار، یک آنتن فرستنده ایستگاه مرکزی طوری انتخاب می‌شود که بهره مسیر DL بیشینه شود. به این ترتیب

$$h = \max\{h_1, h_2, \dots, h_{M_T}\} \quad (۸)$$

خواهد بود. به همین ترتیب یک آنتن گیرنده ایستگاه مرکزی طوری انتخاب می‌شود که بهره مسیر UL بیشینه شود. بنابراین،

$$g = \max\{g_1, g_2, \dots, g_{M_R}\} \quad (۹)$$

است. وقتی آنتن فرستنده و گیرنده با توجه به رابطه‌های (۸) و (۹) مشخص شوند، بهره کانال تداخلی یعنی  $\alpha$  نیز مشخص خواهد شد. ادامه این معیار را مطابق نام‌گذاری مرجع [۱۸]، به اختصار MM-AS<sup>۱۸</sup> می‌نامیم.

گذارد. برای سادگی و بدون اینکه مسئله کلیت خود را از دست بدهد، فرض می‌کنیم ایستگاه مرکزی بلوک زمان-فرکانس اول خود را در اختیار پایانه کاربری شماره یک در مسیر DL و پایانه کاربری شماره یک در مسیر UL قرار داده است و بلوک‌های زمان-فرکانس دیگر نیز در اختیار کاربران دیگر DL و UL است. چون دسترسی چندگانه شبکه متعامد در نظر گرفته شده است، کاربران بلوک‌های مختلف تداخلی روی یکدیگر ندارند. بنابراین در ادامه توضیحات، فقط بلوک زمان-فرکانس اول را با یک پایانه کاربری در مسیر DL و یک پایانه کاربری در مسیر UL در نظر می‌گیریم. به همین دلیل در شکل ۱ تنها یک کاربر در مسیر DL و یک کاربر در مسیر UL در نظر گرفته شده است.

چون ایستگاه مرکزی به صورت FD کار می‌کند، بنابراین تداخل خودی از فرستنده به گیرنده آن وارد می‌شود. همچنین، به علت هم-زمان و هم-فرکانس بودن ارسال پایانه کاربر در مسیر UL و دریافت پایانه کاربر دیگر در مسیر DL، تداخل بین کاربری بین این دو پایانه وجود دارد. تداخل خودی و تداخل بین کاربری در شکل ۱ به صورت خط‌چین مشخص شده است. چون کاربر DL و UL اغلب از هم فاصله دارند و مانند ایستگاه مرکزی در ارتفاع بالا نیستند، تداخل بین کاربری به اندازه تداخل خودی شدید نیست. بنابراین و برای سادگی بیشتر، این تداخل در ادامه در نظر گرفته نشده است.

همان‌طور که گفتیم، فرستنده ایستگاه مرکزی  $M_T$  آنتن دارد که بهره توانی این کانال‌ها را در مسیر DL با  $\{h_1, h_2, \dots, h_{M_T}\}$  نشان می‌دهیم. به همین ترتیب بهره توانی کانال‌ها بین  $M_R$  آنتن گیرنده و پایانه UL را با  $\{g_1, g_2, \dots, g_{M_R}\}$  نشان می‌دهیم. در کانال تداخلی نیز  $M_R \times M_T$  مسیر وجود دارد که می‌توان بهره توانی آنها را به صورت ماتریس

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1M_T} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2M_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{M_R 1} & \alpha_{M_R 2} & \dots & \alpha_{M_R M_T} \end{pmatrix}$$

نمایش داد. کانال‌های فضایی مسیر DL و UL و مسیر تداخلی ناهمبسته و رایلی با میانگین صفر و واریانس واحد در نظر گرفته شده است [۱۶]. بنابراین، بهره توانی این کانال‌ها توزیع نمایی دارند [۲۲]. از تداخل بین کاربری نیز صرف‌نظر شده است. ایستگاه مرکزی با دو معیار که در ادامه توضیح داده خواهد شد، در هر بار تغییر شرایط کانال، یک آنتن در فرستنده و یک آنتن در گیرنده انتخاب می‌کند. پس از انتخاب آنتن در فرستنده و گیرنده، بهره توانی کانال را در مسیر DL و UL به ترتیب با  $h$  و  $g$  و بهره توانی کانال تداخلی را با  $\alpha$  نشان می‌دهیم. اگر توان دریافتی توسط پایانه کاربری در مسیر DL برابر  $P_D$  و توان دریافتی توسط ایستگاه مرکزی در مسیر UL برابر  $P_U$  باشد، نسبت توان سیگنال به توان نویز و تداخل<sup>۱۷</sup> در مسیر DL و UL به ترتیب برابر

$$\gamma_D = \frac{P_D h}{\sigma_0^2} \quad (۱)$$

$$\begin{aligned} \max_{i,j} h \\ \max_{i,j} g \\ \min_{i,j} \alpha \end{aligned} \quad (11)$$

مسئله بهینه‌سازی چندهدفی اغلب یک جواب یکتا ندارد. به این معنی که یک انتخاب مشخص از آنتن‌های فرستنده و گیرنده وجود ندارد که هر سه هدف رابطه (۱۱) را هم‌زمان برآورده کند. بنابراین، در مسئله‌های چندهدفی یک دسته جواب به‌جای یک جواب یکتا داریم. این دسته جواب‌ها را نقاط بهینه پرتو<sup>۲۰</sup> می‌گویند (برای توضیح دقیق‌تر و تعریف ریاضی نقاط بهینه پرتو، [۲۳، ۲۴] را ببینید). در مسئله‌های بهینه‌سازی چندهدفی معمولاً یکی از جواب‌های بهینه پرتو به‌عنوان جواب نهایی مسئله مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روش‌های حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفی بسیار متنوع هستند. در بین این روش‌ها، روش مجموع وزن‌دار<sup>۲۱</sup> ساده و البته بسیار کارآمد است [۲۳]. در این روش توابع هدف مسئله با وزن‌های متفاوت با یکدیگر جمع شده و یک تابع هدف جدید درست می‌کنند. به این ترتیب مسئله چندهدفی به یک مسئله تک‌هدفی متداول تبدیل می‌شود که حل آن ساده است [۲۳]. با توجه به این توضیحات، می‌توان مسئله بهینه‌سازی چندهدفی رابطه (۱۱) را به‌صورت رابطه

$$\min_{i,j} -w_1 h - w_2 g + w_3 \alpha \quad (12)$$

به یک مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفی تبدیل کرد که  $0 \leq w_1 \leq 1$ ،  $0 \leq w_2 \leq 1$  و  $0 \leq w_3 \leq 1$  و وزن‌ها را در روش مجموع وزن‌دار نشان می‌دهند. این وزن‌ها اهمیت هر یک از توابع هدف مسئله بهینه‌سازی (۱۱) را تعیین می‌کند. چون در رابطه (۱۱) دو هدف اول به‌صورت بیشینه  $h$  و  $g$  در نظر گرفته شده بودند، در رابطه (۱۲) با علامت منفی وارد شده‌اند. اغلب اوقات اهمیت مسیر DL و UL یکسان است. بنابراین می‌توان ضریب  $w_1$  و  $w_2$  را مساوی فرض کرد. همچنین چون مجموع وزن‌ها را برابر یک در نظر می‌گیرند، می‌توانیم رابطه (۱۲) را به‌صورت ساده‌تر و به شکل

$$\min_{i,j} -\left(\frac{1-w}{2}\right)h - \left(\frac{1-w}{2}\right)g + w\alpha \quad (13)$$

بازنویسی کنیم. مطابق رابطه (۱۳)، آنتنی در فرستنده و گیرنده ایستگاه مرکزی انتخاب خواهند شد که رابطه (۱۳) را کمینه کند. همان‌طور که گفتیم، وزن‌ها اهمیت هر یک از توابع هدف را مشخص می‌کنند و این اهمیت ممکن است در شرایط خوب و بد کانال تغییر کند. در مسئله (۱۳)، هر چقدر  $w$  بزرگ‌تر شود، اهمیت کانال تداخلی و کاهش اثر آن بیشتر می‌شود و عملکرد سیستم با معیاری مطابق رابطه (۱۳) به معیار LI-AS شبیه‌تر می‌شود. در حالت حدی وقتی  $w=1$  است، مسئله بهینه‌سازی (۱۳) دقیقاً معادل معیار LI-AS می‌شود. در مقابل وقتی  $w$  کوچک می‌شود، اهمیت کانال تداخلی کم و کمتر و اهمیت کانال مستقیم در مسیر DL و UL بیشتر می‌شود. در این حالت عملکرد سیستم با معیاری مطابق رابطه (۱۳)، مشابه معیار MM-AS شده و در حالت حدی  $w=0$  دقیقاً برابر معیار MM-AS

## ۲-۲- معیار کمینه بهره در مسیر تداخلی

در این معیار یک آنتن فرستنده و یک گیرنده ایستگاه مرکزی طوری انتخاب می‌شوند که کمینه تداخل از فرستنده وارد گیرنده شود. بنابراین،

$$\alpha = \min\{\alpha_{11}, \alpha_{21}, \dots, \alpha_{21}, \alpha_{12}, \alpha_{22}, \dots, \alpha_{M_R, 2}, \dots\} \quad (10)$$

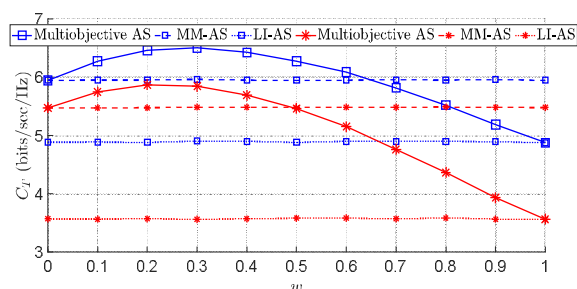
است. به عبارت دیگر،  $\alpha$  برابر کوچک‌ترین درایه ماتریس  $A$  است. اگر درایه سطر  $i$ ام و ستون  $j$ ام ماتریس  $A$  کمینه مقدار را داشته باشد، به این معنی است که آنتن  $j$ ام فرستنده و آنتن  $i$ ام گیرنده ایستگاه مرکزی در مسیر DL و UL انتخاب می‌شود. وقتی آنتن‌های فرستنده و گیرنده مشخص شدند، بهره کانال DL و UL نیز مشخص می‌شود. در ادامه این معیار را مطابق نام‌گذاری مرجع [۱۸]، به اختصار LI-AS<sup>۱۹</sup> می‌نامیم.

## ۳- معیار چندهدفی برای انتخاب آنتن

در مرجع [۱۸] با تحلیل و شبیه‌سازی نشان داده شده است که وقتی آهنگ‌گذردهی DL اهمیت زیادی دارد، MM-AS معیار مناسب‌تری در مقایسه با معیار LI-AS است. در مقابل وقتی که آهنگ‌گذردهی UL اهمیت بیشتری دارد، LI-AS مناسب‌تر از معیار MM-AS است. این رفتار قابل توجیه نیز هست. در روش MM-AS، خودتداخلی در ایستگاه مرکزی در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین، معیار MM-AS برای کاربر DL که رفتار خودتداخلی نیست، مناسب است. به همین ترتیب در روش LI-AS، انتخاب آنتن فقط بر اساس تداخل خودی در ایستگاه مرکزی است. بنابراین این معیار برای کاربر UL مناسب است. سیگنال کاربر UL به علت عملکرد FD ایستگاه مرکزی، با تداخل دریافت می‌شود.

از دید شبکه و ایستگاه مرکزی، بیشینه‌شدن آهنگ‌گذردهی مجموع دو کاربر مسیر DL و UL اهمیت بیشتری دارد. بنابراین، بهترین آنتن برای انتخاب در مسیر DL و UL آنتن‌هایی هستند که بهره DL و UL در آن بیشینه و بهره مسیر تداخلی در آن کمینه باشد. به عبارت دیگر در این شرایط با یک مسئله چندهدفی روبرو هستیم. پس باید آنتنی انتخاب شود که سه هدف را تأمین کند. این سه هدف بیشینه‌شدن بهره مسیر DL، بیشینه‌شدن بهره مسیر UL و کمینه‌شدن بهره مسیر تداخلی است. بنابراین، مسئله انتخاب آنتن را می‌توان به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفی مطابق رابطه (۱۱) نوشت. در رابطه (۱۱)  $i$  و  $j$  اندیس آنتن گیرنده و فرستنده ایستگاه مرکزی است و  $h$  بهره توانی کانال در مسیر DL،  $g$  بهره توانی کانال در مسیر UL و  $\alpha$  بهره توانی مسیر تداخلی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، رابطه (۱۱) هر سه رابطه (۸)، (۹) و (۱۰) را باهم در نظر گرفته است و به همین سبب این مسئله را چندهدفی می‌گویند [۲۳، ۲۴].

تداخل شدید است، انتخاب آنتن با معیار LI-AS عملکرد بهتری دارد زیرا به کانال تداخلی توجه کرده و آنتن‌هایی را انتخاب می‌کند که بهره کمینه را در مسیر تداخلی داشته باشند. معیار انتخاب آنتن چنددهدی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است، سعی در ترکیب هر دو معیار و بهبود عملکرد در همه شرایط دارد. در شکل ۲ مشخص است که معیار انتخاب آنتن چنددهدی در حالت حدی  $w=0$  و  $w=1$  مشابه معیارهای MM-AS و LI-AS می‌شود. اما مهم‌ترین نکته در شکل ۲، بهبود عملکردی است که معیار ارائه‌شده در این مقاله در مقایسه با معیارهای MM-AS و LI-AS دارد. وقتی تداخل نسبتاً کم است، معیار انتخاب چنددهدی به ازای  $0 \leq w \leq 0.65$  آهنگ‌گذردگی مجموعی بهتر از هر دو معیار MM-AS و LI-AS دارد. این آهنگ‌گذردگی مجموعی وقتی  $w \approx 0.3$  است، بیشینه می‌شود. وقتی هم که تداخل نسبتاً شدید است، انتخاب آنتن چنددهدی به ازای  $0.04 \leq w \leq 1$  آهنگ‌گذردگی بهتری در مقایسه با دو معیار قبلی دارد و وقتی  $w \approx 0.6$  است، آهنگ‌گذردگی بیشینه می‌شود. بنابراین با تنظیم مناسب پارامتر  $w$ ، انتخاب آنتن با معیار جدید چنددهدی، قطعاً عملکرد بهتری در مقایسه با معیارهای متداول انتخاب آنتن دارد. پارامتر  $w$  اهمیت توابع هدف مختلف را در روش حل مجموع وزن‌دار مشخص می‌کند و مقدار مناسب این پارامتر به شرایط مختلف محیط بستگی دارد.



شکل ۳: مقایسه معیار جدید انتخاب آنتن با دو معیار قبلی به ازای مقادیر مختلف برای متوسط نسبت توان سیگنال به توان نویز

در شکل ۳ آهنگ‌گذردگی مجموع را به ازای سه معیار متفاوت انتخاب آنتن یعنی معیار چنددهدی و معیارهای MM-AS و LI-AS مجدداً برحسب  $w$  رسم کرده‌ایم. همانند شکل قبل،  $M_T=4$  و  $M_R=4$  است و در اینجا  $\eta=-10\text{dB}$  فرض شده است. شکل به ازای دو مقدار مختلف  $\gamma_0=15\text{dB}$  (نمودارهای آبی‌رنگ با نشانگر مربعی) و  $\gamma_0=12\text{dB}$  (نمودارهای قرمز رنگ با نشانگر ستاره‌ای) رسم شده است. همانند شکل ۲، نمودارها از جنبه‌های مختلف قابل مقایسه با یکدیگر هستند. مهم‌ترین نکته، تفاوتی است که در عملکرد معیار چنددهدی هنگام تغییر  $\gamma_0$  مشاهده می‌شود. وقتی  $\gamma_0=15\text{dB}$  است، آهنگ‌گذردگی مجموع به ازای  $w \approx 0.3$  به مقدار بیشینه خود می‌رسد و وقتی  $\gamma_0=12\text{dB}$  است، آهنگ‌گذردگی مجموع به ازای  $w \approx 0.2$  بیشینه می‌شود. این تغییر در شکل ۲ هم به ازای مقادیر مختلف  $\eta$

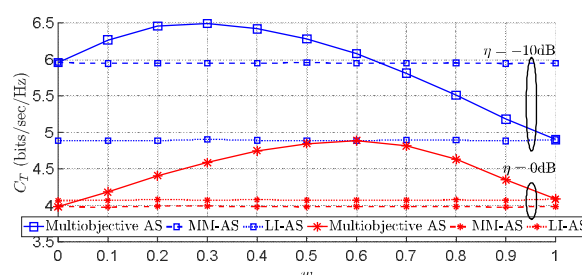
می‌شود. تنظیم دقیق پارامتر  $w$  در حل مسئله بهینه‌سازی چنددهدی روش مشخصی ندارد و اغلب توسط فرد خبره و با توجه به شرایط مسئله انجام می‌شود [۲۳، ۲۴]. در مقاله حاضر جهت ساده‌سازی حل مسئله چنددهدی، به روش تجربی و به صورت سعی و خطا، یک رابطه برای تنظیم پارامتر  $w$  ارائه شده است. این رابطه تجربی در بخش بعد و با شبیه‌سازی تأیید شده است.

#### ۴- بررسی عملکرد و نتایج شبیه‌سازی

در این بخش عملکرد یک ایستگاه مرکزی FD با معیار جدید انتخاب آنتن بررسی شده و نتایج شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو آورده شده است. برای این منظور در رابطه (۱) و (۲):

$$\frac{P_D}{\sigma_0^2} = \frac{P_U}{\sigma_0^2} = \gamma_0 \quad (14)$$

در نظر گرفته شده و  $\gamma_0$  متوسط نسبت توان سیگنال به توان نویز را در مسیر DL و UL نشان می‌دهد. همچنین  $\gamma_{D,T} = \gamma_{U,T} = 10\text{dB}$  فرض شده است. جهت شبیه‌سازی مونت‌کارلو، در هر بار اجرای برنامه تعداد 100,000 نمونه شبیه‌سازی شده است.

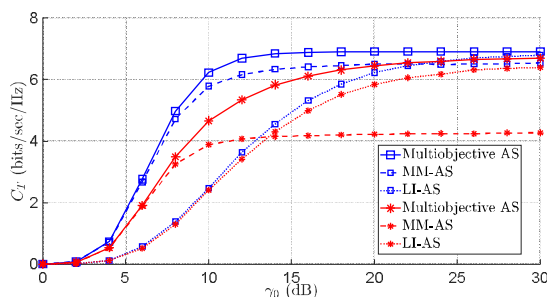


شکل ۴: مقایسه معیار جدید انتخاب آنتن با دو معیار قبلی به ازای تداخل نسبتاً کم و نسبتاً شدید

ابتدا در شکل ۲ آهنگ‌گذردگی مجموع به ازای سه معیار متفاوت انتخاب آنتن یعنی معیار چنددهدی (ارائه‌شده در همین مقاله) و معیارهای MM-AS و LI-AS (ارائه‌شده در مرجع [۱۸]) برحسب  $w$  رسم شده است. در این شکل  $M_R=4$ ،  $M_T=4$  و  $\gamma_0=15\text{dB}$  است. در نمودارهای آبی‌رنگ که با نشانگر هستند،  $\eta=-10\text{dB}$  است و در نمودارهای قرمز رنگ که با نشانگر ستاره‌ای مشخص هستند،  $\eta=0\text{dB}$  فرض شده است. در شکل ۲ آهنگ‌گذردگی مجموع با معیارهای MM-AS و LI-AS قابل مقایسه با یکدیگر هستند. به ازای تداخل نسبتاً کم ( $\eta=-10\text{dB}$ ) آهنگ‌گذردگی با معیار MM-AS بیشتر از آهنگ‌گذردگی با معیار LI-AS است. اما در تداخل نسبتاً شدید ( $\eta=0\text{dB}$ ) آهنگ‌گذردگی با معیار LI-AS بیشتر از آهنگ‌گذردگی با معیار MM-AS است. بنابراین در شدت تداخل متفاوت، معیارهای MM-AS و LI-AS عملکرد متفاوتی دارند. دلیل این تفاوت همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد این است که، در معیار MM-AS جهت انتخاب آنتن، توجهی به کانال تداخلی نمی‌شود و آنتن‌هایی که بهره بیشینه را در مسیر DL و UL دارند انتخاب می‌شوند. این معیار در شرایطی با تداخل کم مناسب است. اما وقتی

روش LI-AS است. همچنین به ازای  $\eta = -10\text{dB}$  و در  $\gamma_0 = 20\text{dB}$ ، آهنگ گذردهی مجموع در روش چندهدفی، به میزان  $0.62\text{bits/sec/Hz}$  بیشتر از آهنگ گذردهی در روش MM-AS است. همین مقایسه در شرایط تداخلی شدید نیز قابل انجام است. به ازای  $\eta = 0\text{dB}$  و در  $\gamma_0 = 10\text{dB}$ ، آهنگ گذردهی مجموع در روش ارائه شده به اندازه  $1.22\text{bits/sec/Hz}$  بهتر از آهنگ گذردهی در روش LI-AS است. همچنین به ازای  $\eta = 0\text{dB}$  و در  $\gamma_0 = 20\text{dB}$ ، در روش چندهدفی، آهنگ گذردهی مجموع به میزان  $1.41\text{bits/sec/Hz}$  بیشتر از آهنگ گذردهی در روش MM-AS است.

جهت مقایسه دیگر، نمودارهای مشابه با شکل ۴ ولی برای تعداد آنتن  $M_T = 8$  و  $M_R = 8$  در شکل ۵ رسم شده است. در این شکل هم پارامتر  $w$  مطابق با رابطه (۱۳) تنظیم شده است. در شکل ۵ هم عملکرد روش جدید انتخاب آنتن در همه شرایط بهتر از دو روش متداول قبلی شده است. مشابه شکل ۴، در نمودارهای آبی رنگ با نشانگر مربعی،  $\eta = -10\text{dB}$  و در نمودارهای قرمز رنگ با نشانگر مربعی،  $\eta = 0\text{dB}$  در نظر گرفته شده است. در مقایسه دو شکل ۴ و ۵، مشخص است که آهنگ گذردهی مجموع در شکل ۵ خیلی سریع تر به مقدار بیشینه خود رسیده است. به عنوان مثال، در مقدار  $\gamma_0 = 10\text{dB}$  و  $\eta = -10\text{dB}$ ، در شکل ۴ مقدار آهنگ گذردهی مجموع حدوداً برابر  $6.23\text{bits/sec/Hz}$  و در شکل ۵ این مقدار حدوداً برابر  $4.97\text{bits/sec/Hz}$  است. دلیل افزایش این است که در شکل ۵ تعداد آنتن ها جهت انتخاب بیشتر است.



شکل ۵: مقایسه معیار جدید انتخاب با دو معیار قبلی در شرایط مختلف کانال وقتی تعداد آنتن های فرستنده و گیرنده برابر ۸ است.

## ۵- نتیجه گیری

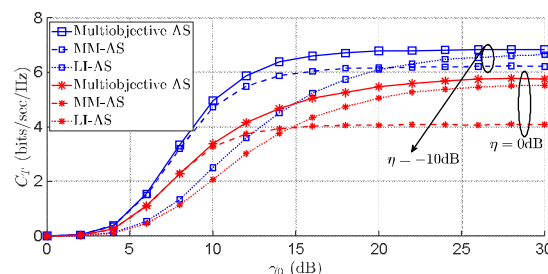
در این مقاله یک معیار جدید برای انتخاب آنتن در یک ایستگاه مرکزی FD ارائه شده است. در این معیار جدید مسئله انتخاب آنتن به صورت یک مسئله بهینه سازی چندهدفی مدل سازی شده است. این مسئله بهینه سازی چندهدفی، هم زمان بیشینه شدن بهره مسیرهای DL و UL به همراه کمینه شدن بهره مسیر تداخلی در نظر گرفته شده و به روش مجموع وزن دار حل شده است. همچنین یک رابطه تجربی برای تنظیم پارامتر، در روش حل مجموع وزن دار ارائه شده است. نتایج

مشاهده شد. بنابراین همان طور که گفتیم، تنظیم صحیح  $w$  با توجه به شرایط کانال مانند  $\gamma_0$  و  $\eta$  از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است.

تنظیم مناسب پارامتر  $w$  اغلب به صورت تجربی و توسط فرد خیره انجام می شود [۲۳، ۲۴]. جهت ساده سازی تنظیم مناسب این پارامتر، با سعی و خطا یک مقدار تجربی مناسب برای  $w$  به صورت

$$w = 0.5\eta^{0.301} + 0.02\gamma_0 - 0.3 \quad (15)$$

پیشنهاد شده است. در این رابطه  $\gamma_0$  مقدار متوسط نسبت سیگنال به نویز را بر حسب دسی بل (dB) نشان می دهد. برای بررسی درستی و تأیید این رابطه تجربی، شبیه سازی های مختلفی بر حسب پارامترهای مختلف مانند  $\eta, \gamma_0, \gamma_{DT}, \gamma_{UT}, M_T$  و  $M_R$  انجام شده است که در همه این موارد، معیار انتخاب چندهدفی عملکرد بهتری نسبت به دو معیار MM-AS و LI-AS داشته است. دو مورد از این شبیه سازی ها در شکل ۴ و ۵ آورده شده و بقیه جهت جلوگیری از تکرار رسم نشده است. دقت شود که رابطه (۱۵) به صورت تجربی برای مقداردهی  $w$  در نظر گرفته شده و با استفاده از شبیه سازی های مختلف تأیید شده است. از آنجا که روش مجموع وزن دار تکنیک بسیار ساده ای جهت حل مسئله بهینه سازی چندهدفی است، بنابراین داشتن یک تخمین مناسب برای  $w$  می تواند حل مسئله چندهدفی را بسیار ساده و سراسر کند. با این حال می توان از روش های دیگر که نیازی به تخمین پارامتر  $w$  ندارند نیز جهت حل مسئله بهینه سازی چندهدفی استفاده کرد و یا پارامتر  $w$  را به صورت تجربی برابر مقادیر دلخواه دیگر تنظیم کرد.



شکل ۴: مقایسه معیار جدید انتخاب با دو معیار قبلی در شرایط

مختلف کانال وقتی تعداد آنتن های فرستنده و گیرنده برابر ۴ است. در شکل ۴ آهنگ گذردهی مجموع بر حسب  $\gamma_0$  رسم شده است. در نمودارهای آبی رنگ با نشانگر مربعی،  $\eta = -10\text{dB}$  و در نمودارهای قرمز رنگ با نشانگر ستاره ای،  $\eta = 0\text{dB}$  فرض شده است. همانند قبل، تعداد آنتن های فرستنده و گیرنده  $M_T = 4$  و  $M_R = 4$  است و در هر بار استفاده از کانال، یک آنتن فرستنده و یک آنتن گیرنده در ایستگاه مرکزی جهت ارسال و دریافت انتخاب می شود. برای رسم آهنگ گذردهی مجموع با معیار انتخاب آنتن چندهدفی، پارامتر  $w$  مطابق رابطه (۱۵) تنظیم شده است. همان طور که مشخص است، عملکرد روش جدید انتخاب آنتن در همه مقادیر  $\gamma_0$  و به ازای هر مقدار  $\eta$ ، بهتر از عملکرد معیارهای متداول MM-AS و LI-AS است. به عنوان مثال به ازای  $\eta = -10\text{dB}$  و در  $\gamma_0 = 10\text{dB}$ ، آهنگ گذردهی مجموع در روش ارائه شده به اندازه  $2.46\text{bits/sec/Hz}$  بهتر از آهنگ گذردهی در

- [13] A. Almradi, P. Xiao and K. A. Hamdi, "Hop-by-hop ZF beamforming for MIMO full-duplex relaying with co-channel interference," *IEEE Trans. Commun.*, doi: 10.1109/TCOMM.2018.2863723.
- [14] T. Riihonen, S. Werner and R. Wichman, "Mitigation of loopback self-interference in full-duplex MIMO relays" *IEEE Trans. Signal Proc.*, Vol. 59, No. 12, pp. 5983-5993, Dec. 2011.
- [15] K. Yang, H. Cui, L. Song and Y. Li, "Efficient full-duplex relaying with joint antenna-relay selection and self-interference suppression" *IEEE Trans Wireless Commun.*, Vol. 14, No. 7, pp. 3991-4005, Jul. 2015.
- [16] M. Zhou, L. Song, Y. Li and X. Li, "Simultaneous bidirectional link selection in full duplex MIMO systems" *IEEE Trans Wireless Commun.*, Vol. 14, No. 7, pp. 4052-4062, Jul. 2015.
- [17] S. Jang, M. Ahn, H. Lee and I. Lee, "Antenna selection schemes in bi-directional full-duplex MIMO systems" *IEEE Trans Veh. Technol.*, Vol. 65, No. 12, pp. 10097-10100, Dec. 2016.
- [18] M. Mohammadi, "Analysis of low complexity uplink/downlink full-duplex wireless access" *IET Commun.*, Vol. 10, No. 14, pp. 1777-1785, 2016.
- [19] R. Li, Y. Chen, G. Y. Li and G. Liu, "Full-duplex cellular networks" *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 55, No. 4, pp. 184-191, Apr. 2017.
- [۲۰] فرید محمدی، حمدی عبدی و احسان دهنوی، «حل مسئله توزیع بار اقتصادی هزینه-آلودگی دینامیک همراه با برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری بهینه تحت قیود اثر نقطه-دریچه و ذخیره چرخان»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶ شماره ۱، صفحه ۳۵۶-۳۴۳، بهار ۱۳۹۵.
- [۲۱] یونس سخاوت و حسین زارعی، «تنظیم خودکار سختی بازی‌های توان‌بخشی با استفاده از روش یادگیری تقویتی چندتناوبی (یاقوت)»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۸ شماره ۱، صفحه ۷۰-۶۱، بهار ۱۳۹۷.
- [22] A. Papoulis and S. U. Pillai, Probability, *Random Variables and Stochastic Processes*. McGraw-Hill, 4th ed. 2002.
- [23] K. Miettinen, *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Springer Science+Business Media, 1998.
- [24] K. Deb, *Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Wiley&Sons, 2001.
- [1] L. Zhng, M. Xiao, G. Wu, M. Alam, Y. C. Liang and S. Li, "A survey of advanced techniques for spectrum sharing in 5G networks" *IEEE Wireless Commun.*, Vol. 24, No. 5, pp. 44-51, Oct. 2017.
- [2] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. Soong and J. C. Zhang, "What 5G will be?" *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 32, No. 6, pp. 1065-1082, Jun. 2014.
- [3] W. Xiang, K. Zheng and X. Shen, *5G mobile communications*. Springer, 2017.
- [4] G. Liu, F. Richrd Yu, H. Ji, V. C. Leung, and X. Li, "In-band full-duplex relaying: A survey, research issues and challenges" *IEEE Commun. Surveys&Tutorials*, Vol. 17, No. 2, pp. 500-524, 2015.
- [5] A. Sabharwal, P. Schniter, D. Guo, D. W. Bliss, S. Rangarajan and R. Wichman, "In-band full-duplex wireless: Challenges and Opportunities" *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 32, No. 9, pp. 1637-1652, Sept. 2014.
- [6] F. L. Luo and C. Zhang, *Signal processing for 5G*. IEEE Press, 2016.
- [7] E. Everett, A. Sahai and A. Sabharwal, "Passive self-interference suppression for full-duplex infrastructure nodes," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 2, pp. 680-694, Feb. 2014.
- [8] H. Nawaz and I. Tekin, "Double-differential-fed, dual-polarized patch antenna With 90 dB interport RF isolation for a 2.4 GHz in-band full-duplex transceiver," *IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett.*, vol. 17, no. 2, pp. 287-290, Feb. 2018.
- [9] H. Nawaz and I. Tekin, "Compact dual-polarised microstrip patch antenna with high interport isolation for 2.5 GHz in-band full-duplex wireless applications," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 11, no. 7, pp. 976-981, Jun. 2017.
- [10] D. Kim, H. Lee and D. Hong, "A survey of in-band full-duplex transmission: from the perspective of PHY and MAC layers," *in IEEE Commun. Surveys&Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2017-2046, 2015.
- [11] P. Aquilina and T. Ratnarajah, "Linear interference alignment in full-duplex MIMO networks with imperfect CSI," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 12, pp. 5226-5243, Dec. 2017.
- [12] A. Almradi and K. A. Hamdi, "MIMO full-duplex relaying in the presence of co-channel interference," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 6, pp. 4874-4885, Jun. 2017.

## مراجع

## زیرنویس‌ها

- <sup>12</sup> Downlink
- <sup>13</sup> Uplink
- <sup>14</sup> Multi-Objective
- <sup>15</sup> Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)
- <sup>16</sup> Resource block
- <sup>17</sup> SINR
- <sup>18</sup> Max-Max Antenna Selection (MM-AS)
- <sup>19</sup> Loopback Interference Antenna Selection (LI-AS)
- <sup>20</sup> Pareto
- <sup>21</sup> Weighted sum method
- <sup>1</sup> Full-Duplex (FD)
- <sup>2</sup> Half-Duplex (HD)
- <sup>3</sup> Self-Interference (SI)
- <sup>4</sup> RF
- <sup>5</sup> Dynamic range
- <sup>6</sup> Analog to Digital Converter (ADC)
- <sup>7</sup> Interference Alignment (IA)
- <sup>8</sup> Degree of Freedom (DoF)
- <sup>9</sup> Amplify and Forward (AF)
- <sup>10</sup> Bi-directional
- <sup>11</sup> Base station