

## تحلیل شبکه‌های رله‌ای دوطرفه درون باند با برداشت انرژی و انتخاب هم‌زمان آنتن و رله

محسن سلطانی نژاد<sup>۱</sup>، جواد حقیقت<sup>۲</sup>، محسن اسلامی<sup>۳</sup><sup>۱</sup> کارشناسی ارشد برق مخابرات، دانشگاه صنعتی شیراز، M.soltaninezhad@sutech.ac.ir<sup>۲</sup> استادیار دانشکده برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز<sup>۳</sup> استادیار دانشکده برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز

## چکیده

ارتباط دوطرفه درون باند (IBFD) به دلیل ارسال و دریافت اطلاعات به صورت هم‌زمان و در یک باند فرکانسی توجه زیادی را جلب کرده است؛ چراکه نسبت به سیستم‌های یک‌طرفه سنتی (HF) تا دو برابر بهره‌وری طیفی و ظرفیت سیستم را افزایش می‌دهد. اما تداخل خودی قدرتمند ایجاد شده ناشی از ارسال و دریافت در یک باند فرکانسی و به صورت هم‌زمان، یک مانع در عملی بودن سیستم‌های IBFD است که با پیشرفت روش‌های حذف تداخل خودی این مانع برطرف شده است. در این مقاله، یک سیستم رله‌ای دوطرفه درون باند با انتقال هم‌زمان اطلاعات بی‌سیم و توان (SWIPT) معرفی شده است که از چند رله برای انتقال اطلاعات بهره می‌گیرد. بنابراین، استفاده از طرح انتخاب هم‌زمان آنتن و رله منجر به کاهش پیچیدگی و افزایش ظرفیت متوسط می‌شود. در نهایت، با شبیه‌سازی معیارهای احتمال قطعی و ظرفیت متوسط نتیجه می‌شود که برای توان‌های کوچک تداخل خودی عملکرد سیستم IBFD بهتر از سیستم HD است.

## کلیدواژه

ارتباط دوطرفه درون باند، انتقال هم‌زمان اطلاعات بی‌سیم و توان، روش‌های حذف تداخل خودی، برداشت انرژی، انتخاب هم‌زمان آنتن و رله، احتمال قطعی، ظرفیت متوسط.

## مقدمه

متعامد به عنوان یکی از روش‌های انتقال پیشرفته پرداخته شده است. یکی از روش‌های انتقال غیرمتعامد، انتقال دوطرفه درون باند (IBFD) است که در آن به دلیل ارسال و دریافت هم‌زمان اطلاعات و در یک باند فرکانسی، بهره‌وری طیفی افزایش می‌یابد. در حالی که در سیستم‌های متعارف سنتی که از ارتباط یک‌طرفه (HD) استفاده می‌کنند بهره‌وری طیفی دچار افت می‌شود. در نتیجه سیستم‌های IBFD به دلیل استفاده کارآمدتر از منابع، تا دو برابر بهره‌وری طیفی و ظرفیت متوسط بیشتری نسبت به سیستم‌های HD دارند. مهم‌ترین چالش در اجرای سیستم‌های IBFD، تداخل خودی قدرتمند ناشی از ارسال و دریافت هم‌زمان و در یک باند فرکانسی است. برای عملی بودن سیستم IBFD باید از طرح‌های حذف تداخل خودی (SIC) استفاده کرد، که شامل طرح‌های غیرفعال و فعال می‌شوند. در اولین مرحله طرح‌های غیرفعال اجرا می‌شوند که در

امروزه با توجه به رشد سریع کاربران مخابرات سلولی و ظهور فناوری‌هایی همچون اینترنت اشیا و شهرهای هوشمند، نسل‌های بعدی مخابرات سلولی و ساختارهای آینده (5G) نیازمند ویژگی‌هایی مانند افزایش ترافیک موبایل تا ۱۰۰۰ برابر، حمایت از تعداد ۱۰ الی ۱۰۰ برابر بیشتر دستگاه‌های متصل به شبکه، افزایش بیش از ۱۰۰ برابری نرخ واقعی و کاهش ۵ برابری تأخیر نسبت به شبکه‌های موجود هستند [۱، ۲]. فناوری‌های رادیویی متعددی برای دستیابی به این ویژگی‌ها پیشنهاد داده شده است. به عنوان مثال می‌توان به فناوری‌های موج میلی‌متری، مخابرات ماشین به ماشین، سیستم‌های چند ورودی چند خروجی حجیم و دستگاه‌های هوشمند اشاره کرد [۳]. در [۴] دو راه‌حل به منظور افزایش بهره‌وری طیفی پیشنهاد شده است: جستجو برای یافتن طیف جدید با استفاده از روش‌های به اشتراک‌گذاری و سنجش طیف، و به کارگیری روش‌های انتقال پیشرفته. سپس به معرفی روش‌های انتقال غیر

<sup>۱</sup> In-Band Full-Duplex<sup>۲</sup> Half Duplex<sup>۳</sup> Self-Interference Cancellation

امروزه به دلیل محدودیت های انرژی در سیستم های مخابراتی از جمله طول عمر باتری ها و عدم وجود ضریب اطمینان بالا در استفاده از انرژی های سبز به دلیل شرایط متغیر آب و هوایی، انتقال هم زمان اطلاعات بی سیم و توان (SWIPT<sup>۵</sup>) توجه زیادی به خود جلب کرده است؛ چراکه نیاز به منبع تغذیه جداگانه برای رله نیست [۱۰، ۱۳]. در [۱۳] بهره وری انرژی در سیستم های OFDMA با SWIPT در سیستم های چند کاربره و شبکه های معمولی انجام گرفته است. اما در کارهای ذکر شده در بالا، از رله های HD استفاده شده است که باعث کاهش بهره وری طیفی می شود. بنابراین در [۱۴] از یک سیستم رله ای IBFD استفاده شده است که در آن رله دوطرفه با آنتن های مجزا است. در همین راستا در [۱۰] نیز محققان از یک سیستم چند رله ای با طرح انتخاب هم زمان آنتن و رله استفاده کرده اند. در این روش، رله ها چند ورودی چند خروجی و با پروتکل کدگشایی و ارسال (DF<sup>۶</sup>) در نظر گرفته شده اند و از SWIPT استفاده شده است. در نتیجه، علاوه بر بهبود عملکرد سیستم نسبت به سیستم های با یک رله، بهره وری انرژی سیستم نیز به واسطه برداشت انرژی<sup>۷</sup> از سیگنال های ارسالی، بهبود یافته است.

در این نوشتار یک سیستم چند رله ای با SWIPT در نظر گرفته شده است که در آن رله ها IBFD هستند و از پروتکل تقویت و ارسال (AF<sup>۸</sup>) استفاده شده است. هر گره به چند آنتن مجهز شده است. در فرستنده از طرح انتخاب آنتن و در گیرنده از MRC<sup>۹</sup> استفاده شده است. برای عدم نیاز رله ها به منبع تغذیه خارجی، SWIPT به کاررفته که در آن برای برداشت انرژی در رله ها از پروتکل PSR<sup>۱۰</sup> استفاده شده است. نوآوری های اصلی این مقاله را می توان به شرح زیر، فهرست کرد:

- معرفی یک سیستم رله ای IBFD با پروتکل AF و با SWIPT که در آن الگوریتم انتخاب بهترین آنتن مبدأ، بهترین رله و بهترین آنتن از بهترین رله اجرا شده است.
- لحاظ کردن اثر تداخل خودی در محاسبات و شبیه سازی ها و مقایسه سیستم معرفی شده در این مقاله با سیستم های HD موجود و سیستم های بدون SWIPT.
- ارائه نتایج شبیه سازی ها برای پارامترهای ظرفیت متوسط و احتمال قطعی برحسب پارامترهای مختلف برای دو سیستم IBFD و HD.

سیستم های با آنتن های مجزا شامل افت مسیر، آنتن های جهت دار و پلاریزاسیون متقابل هستند و در سیستم های با آنتن مشترک از سیرکولاتور برای حذف تداخل خودی استفاده می شود. سپس طرح های حذف فعال قبل از وارد شدن سیگنال به مبدل آنالوگ به دیجیتال اعمال می شوند. بعد از اعمال این روش ها، توان تداخل خودی در حد توان نویز کاهش می یابد [۵، ۶]. با پیشرفت روش های حذف تداخل خودی، اهمیت سیستم های IBFD بیش از پیش آشکار شده است؛ به طوری که این سیستم ها به عنوان یکی از اصلی ترین فناوری ها برای رفع مشکل افت بهره وری طیفی در نسل های بعد مخابرات سلولی شناخته می شوند [۶-۴].

استفاده از رله ها نیز به دلیل گسترده کردن پوشش دهی، افزایش ظرفیت و کاهش مصرف توان سیستم، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. بنابراین، استفاده از رله های IBFD به بهبود عملکرد سیستم های مخابراتی منجر می شود [۷-۱۰]. در [۷] به معرفی یک الگوریتم تخصیص توان برای یک سیستم رله ای IBFD با تعداد بسیار زیاد آنتن در رله پرداخته شده است که منجر به کاهش پیچیدگی و افزایش عملکرد سیستم شده است. به دلیل استفاده از رله IBFD بهره وری انرژی سیستم بیشتر شده و به ازای آنتن های بیشتر، سیستم نسبت به احتمال خطای بیت مقاوم شده است. در [۱۱] به آنالیز عملکرد و بهینه سازی نرخ واقعی در سیستم های رله ای چند-ورودی چند-خروجی IBFD پرداخته شده است.

استفاده از سیستم های چند رله ای و به کارگیری طرح های انتخاب بهترین آنتن و بهترین رله به صورت کارآمدی دایورسیتی فضایی سیستم را افزایش می دهد [۸-۱۰]. در [۸] یک طرح انتخاب هم زمان آنتن و رله برای سیستم های رله ای IBFD پیشنهاد شده است. هر رله به صورت وفقی آنتن ارسالی و آنتن دریافتی را بر اساس شرایط لحظه ای کانال انتخاب می کند و سپس رله بهینه انتخاب می شود تا عملکرد ترمینال به ترمینال سیستم انتقال بهینه شود. با انتخاب بهترین آنتن در رله بهینه، دایورسیتی فضایی بیشتری نسبت به سیستم های سنتی با انتخاب رله IBFD که در آن ها آنتن فرستنده و گیرنده رله ثابت هستند، به دست آمده است. در [۹] یک سیستم رله ای IBFD دومسیره<sup>۴</sup> معرفی شده است که فقط طرح انتخاب رله بهینه به کار گرفته شده است و آنتن های رله بهینه ثابت هستند. در این کار سیگنال تداخل به صورت یک نویز گوسی سفید جمع شونده در نظر گرفته شده است و نشان داده شده که به ازای توان های کوچک تداخل خودی، سیستم رله ای دومسیره IBFD کارآمدتر از سیستم رله ای دومسیره HD است.

۵ Simultaneous Wireless Information and Power Transfer

۶ Decode-and-Forward

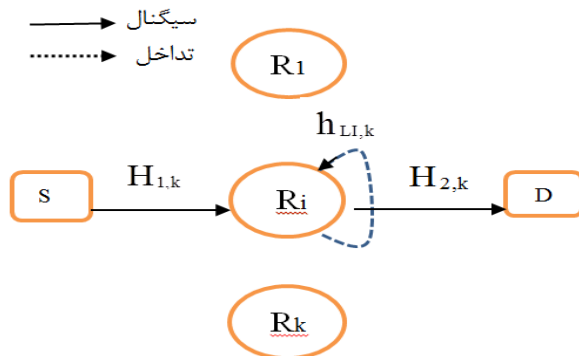
۷ Energy Harvesting

۸ Amplify-and-Forward

۹ Maximum Ratio Combining

۱۰ Power Splitting-based Relaying

۴ Two-way relay



شکل ۱: مدل سیستم چند رله‌ای IBFD با استفاده از SWIPT

که در آن  $S[t]$  و  $X_i[t]$  به ترتیب سیگنال ارسالی از S با توان نرمالیزه شده یک و سیگنال ارسالی از  $R_i$  در زمان t ام هستند،  $\mathbf{n}_{1,i} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{1,i}^2 \mathbf{I}_N)$  بردار AWGN برای نویز مشاهده شده در  $R_i$  است. بخش  $h_{LI,i} X_i[t]$  بیان کننده تداخل خودی باقیمانده در  $R_i$  است و توسط یک AWGN با میانگین صفر و واریانس  $\sigma_{LI,i}^2$  مدل شده است [۷، ۱۵].

به دلیل استفاده از فناوری SWIPT در همه رله‌ها برداشت انرژی با پروتکل PSR صورت می‌گیرد. با استفاده از این پروتکل، سیگنال دریافت شده در رله با نسبت  $1-\lambda$  تقسیم می‌شود که  $\lambda$  برای برداشت انرژی در رله و  $1-\lambda$  برای پردازش اطلاعات است ( $0 \leq \lambda \leq 1$ ). برای مثال  $\lambda = 1$  به معنی برداشت کامل انرژی در رله است و اطلاعات ارسال نمی‌شود. بنابراین انرژی برداشت شده از  $\mathbf{y}_{R_i}^m$  برابر است با:

$$P_{R_i}^m = \eta \lambda P_s \|\mathbf{h}_{1,i}^m\|^2 \quad (2)$$

که در آن  $0 \leq \eta \leq 1$  بیانگر ضریب تبدیل انرژی است [۱۴] و سیگنال اطلاعات پردازش شده در  $R_i$  به شکل زیر است:

$$\mathbf{y}_{R_i}^m[t] = \sqrt{(1-\lambda)} \mathbf{y}_{R_i}^m[t] \quad (3)$$

هم‌زمان با دریافت اطلاعات توسط رله، اطلاعات دریافت شده از زمان قبلی با پروتکل AF توسط رله IBFD تقویت و ارسال می‌شود. بنابراین سیگنال ارسال شده از  $R_i$  با رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$\mathbf{X}_i[t] = \sqrt{P_{R_i}^m} \beta_{R_i} \mathbf{y}_{R_i}^m[t-1] \quad (4)$$

که در آن  $\beta_{R_i}$  ضریب تقویت مربوط به  $R_i$  است. مانند [۸] با در نظر گرفتن محدودیت توان ارسالی در  $R_i$ ، ضریب تقویت  $\beta_{R_i}$  تضمین می‌کند که توان متوسط سیگنال  $\mathbf{X}_i[t]$  محدودیت توان ارسالی در  $R_i$  را طبق رابطه زیر اغنا می‌کند:

$$E[\|\mathbf{X}_i[t]\|^2] = \beta_{R_i}^2 P_{R_i}^m (1-\lambda) \left( \|\mathbf{h}_{1,i}^m\|^2 P_s + |h_{LI,i}|^2 P_{R_i}^m + \sigma_{1,i}^2 \right) \leq P_{R_i}^m \quad (5)$$

که  $\sigma_{1,i}^2$  در رابطه (۵) از  $(0, \sigma_{1,i}^2 \mathbf{I}_N)$  که بردار AWGN است، حاصل می‌شود و همان‌طور که در [۱۶] بحث

بخش‌های مختلف این مقاله به شرح زیر تنظیم شده‌اند. در بخش ۲ به معرفی مدل سیستم پرداخته است. در بخش ۳ الگوریتم انتخاب هم‌زمان آنتن و رله معرفی و به آنالیز عملکرد سیستم پرداخته شده است. در بخش‌های ۴ و ۵ به ترتیب نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری کلی آورده شده است.

## مدل سیستم

در این مقاله یک سیستم رله‌ای IBFD با پروتکل AF و برداشت انرژی بررسی می‌شود که در شکل ۱ نمایش داده شده است. سیستم شامل K رله،  $R_i, i=1,2,\dots,K$ ، یک گره مبدأ، S، و یک گره مقصد، D، است. هر گره مجهز به چند آنتن است که تعداد آنتن‌های S،  $R_i$  و D به ترتیب M، N و L است. توان ارسالی از S و توان ارسالی از  $R_i$  به ترتیب با  $P_s$  و  $P_{R_i}$  نشان داده شده‌اند. علاوه بر این، فرض شده که اطلاعات وضعیت کانال به صورت کامل در فرستنده قابل دسترس است. همچنین فرض می‌شود به دلیل اثرات سایه، لینک مستقیم بین مبدأ و مقصد وجود ندارد.

همه کانال‌های بی‌سیم، رایلی با محوشدگی بلوکی و با نویز سفید جمع‌شونده گوسی هستند. در اینجا به دلیل وجود K رله و چند آنتن، برای کانال‌ها ماتریس تعریف شده است. ماتریس کانال  $N \times M$  بین S و  $R_i$  با  $\mathbf{H}_{1,i} = [\mathbf{h}_{1,i}^1, \mathbf{h}_{1,i}^2, \dots, \mathbf{h}_{1,i}^M]$  نشان داده می‌شود که در آن  $\mathbf{h}_{1,i}^m = [\mathbf{h}_{1,i}^m(1), \mathbf{h}_{1,i}^m(2), \dots, \mathbf{h}_{1,i}^m(N)]^T$ ،  $m=1,2,\dots,M$  کانال بین m امین آنتن S و  $R_i$  است. المان‌های  $\mathbf{h}_{1,i}^m$  مستقل از هم هستند و به صورت  $h_{1,i}^m(n) \sim \mathcal{CN}(0, \Omega_{1,i})$ ،  $n=1,2,\dots,N$  ماتریس کانال  $L \times N$  بین  $R_i$  و D نیز با  $\mathbf{H}_{2,i} = [\mathbf{h}_{2,i}^1, \mathbf{h}_{2,i}^2, \dots, \mathbf{h}_{2,i}^M]$  نشان داده می‌شود که در آن  $\mathbf{h}_{2,i}^m = [\mathbf{h}_{2,i}^m(1), \mathbf{h}_{2,i}^m(2), \dots, \mathbf{h}_{2,i}^m(N)]^T$ ،  $m=1,2,\dots,M$  کانال بین n امین آنتن  $R_i$  و D است. المان‌های  $\mathbf{h}_{2,i}^m$  نیز مستقل از هم هستند و با  $h_{2,i}^m(l) \sim \mathcal{CN}(0, \Omega_{2,i})$ ،  $l=1,2,\dots,L$  مدل می‌شوند [۱۰]. تداخل خودی ناشی از ارتباط IBFD توسط روش‌های حذف تداخل خودی، حذف می‌شود اما به دلیل ایده‌آل نبودن این روش‌ها، تداخل خودی کاملاً حذف نمی‌شود که به آن تداخل خودی باقیمانده می‌گویند [۷، ۵]. کانال مربوط به این تداخل با  $h_{LI,i}$  نمایش داده می‌شود.

با فرض ارسال سیگنال از m امین آنتن S به  $R_i$ ، سیگنال دریافتی در  $R_i$  به شکل زیر است:

$$\mathbf{y}_{R_i}^m[t] = \sqrt{P_s} \mathbf{h}_{1,i}^m S[t] + h_{LI,i} \mathbf{X}_i[t] + \mathbf{n}_{1,i} \quad (1)$$

وضعیت کانال در S، بهترین کانال بین S تا  $R_i$  توسط رابطه زیر انتخاب می شود

$$X_i = \max_{m=1,2,\dots,M} \sum_{n=1}^N |h_{1,i}^m(n)|^2 \quad (11)$$

و بهترین کانال بین  $R_i$  تا D توسط رابطه زیر انتخاب می شود

$$Y_i = \max_{n=1,2,\dots,N} \sum_{l=1}^L |h_{2,i}^n(l)|^2 \quad (12)$$

و سپس بهترین رله با جایگذاری روابط (11) و (12) در رابطه های (8) و (9) به صورت زیر انتخاب می شود:

$$\hat{k} = \arg \max_{i=1,2,\dots,K} \left( \frac{(1-\lambda)P_s X_i}{\sigma_{L,i}^2 + \sigma_{1,i}^2}, \frac{\eta \lambda P_s \beta_{R_i}^2 X_i Y_i}{\sigma_{2,i}^2} \right) \quad (13)$$

در نهایت با توجه به رله انتخاب شده،  $\hat{k}$ ، بهترین آنتن در S از رابطه

$$\hat{m} = \arg \max_{m=1,2,\dots,M} \sum_{n=1}^N |h_{1,k}^m(n)|^2 \quad (14)$$

و بهترین آنتن در R از رابطه

$$\hat{n} = \arg \max_{n=1,2,\dots,N} \sum_{l=1}^L |h_{2,k}^n(l)|^2 \quad (15)$$

به دست می آیند. در نتیجه اطلاعات ارسالی از آنتن  $\hat{m}$  در S، توسط n آنتن در رله  $\hat{k}$  ام دریافت شده و هم زمان اطلاعات زمان قبلی که در رله دریافت شده اند، تقویت شده و توسط آنتن  $\hat{n}$  ام به D ارسال می شوند که در D توسط L آنتن دریافت می شوند.

حال به آنالیز عملکرد سیستم روی پارامترهای احتمال قطعی و ظرفیت متوسط سیستم می پردازیم. مشابه با احتمال قطعی محاسبه شده برای یک سیستم HD در [10]، با استفاده از روابط (8) و (9)، احتمال قطعی سیستم رله ای IBFD به صورت زیر تعریف شده است:

$$P_{out} = \Pr \left\{ \min \left[ \log_2 \left( 1 + \gamma_{1,i}(m) \right), \log_2 \left( 1 + \gamma_{2,i}(m,n) \right) \right] < R_{th} \right\} \quad (16)$$

و  $R_{th}$  نرخ آستانه یا نرخ هدف است.

ظرفیت متوسط سیستم نیز به صورت زیر نمایش داده شده است:

$$\bar{C} = E \left\{ \min \left[ \log_2 \left( 1 + \gamma_{1,i}(m) \right), \log_2 \left( 1 + \gamma_{2,i}(m,n) \right) \right] \right\} \quad (17)$$

که در آن  $E\{\cdot\}$  بیان گر امید ریاضی است.

در مقایسه با سیستم های HD، برای محاسبه احتمال قطعی و ظرفیت متوسط سیستم ارائه شده در این نوشتار از ضریب ۱ به جای ۰/۵ استفاده شده است؛ چراکه در سیستم های رله ای IBFD تلفات بهره وری طیف وجود ندارد و به صورت کامل از منابع استفاده می شود (در حالت آرمانی، ظرفیت دو برابر می شود). در حالی که، در سیستم های HD به علت استفاده از

شده، شامل نویز باند پایه و نویز کانال بین S و  $R_i$  است. بنابراین، ضریب تقویت  $\beta_{R_i}$  برابر است با:

$$\beta_{R_i} = \sqrt{\frac{1}{(1-\lambda) \left( \left| \mathbf{h}_{1,i}^m \right|^2 P_s + \left| \mathbf{h}_{L,i} \right|^2 P_{R_i}^m + \sigma_{1,i}^2 \right)}} \quad (6)$$

در نهایت، سیگنال دریافت شده در D عبارت است از:

$$\mathbf{y}_D[t] = \mathbf{h}_{2,i}^n X_i[t] + \mathbf{n}_{2,i} \quad (7)$$

که در آن  $\mathbf{n}_{2,i}$  بردار AWGN است که در D دریافت شده است.

در ادامه و در بخش بعدی به معرفی روش پیشنهادی انتخاب هم زمان آنتن و رله پرداخته شده است.

### روش پیشنهادی انتخاب هم زمان آنتن و رله

در سیستم های چند رله ای استفاده از طرح انتخاب بهترین رله یک روش مؤثر برای کاهش پیچیدگی است؛ چراکه یک رله از بین چند رله موجود انتخاب می شود. از طرفی، انتخاب بهترین آنتن از بین چند آنتن موجود سبب افزایش دایورسیتی فضایی سیستم می شود. بنابراین، طرح انتخاب هم زمان آنتن و رله در سیستم ارائه شده در این نوشتار که شامل چند رله و گره های مجهز به چند آنتن است، سبب کاهش پیچیدگی و افزایش دایورسیتی فضایی می شود.

با در نظر گرفتن MRC در  $R_i$ ، SINR بین m امین آنتن S و  $R_i$  به شکل زیر به دست می آید:

$$\gamma_{1,i}(m) = \sum_{n=1}^N \frac{(1-\lambda)P_s |h_{1,i}^m(n)|^2}{\sigma_{L,i}^2 + \sigma_{1,i}^2} \quad (8)$$

فرض شده است که n امین آنتن از  $R_i$  انتخاب شود تا سیگنال دریافت شده را به D ارسال کند و D با L آنتن دریافت کند؛ بنابراین، با در نظر گرفتن MRC در D، SNR بین  $R_i$  و D برابر است با:

$$\gamma_{2,i}(m,n) = \sum_{l=1}^L \frac{P_{R_i} \beta_{R_i}^2 |h_{2,i}^n(l)|^2}{\sigma_{2,i}^2} \quad (9)$$

با استفاده از معیار max-min معرفی شده در [10] و طرح انتخاب رله معرفی شده در [9]، انتخاب آنتن و رله به صورت زیر انجام می گیرد:

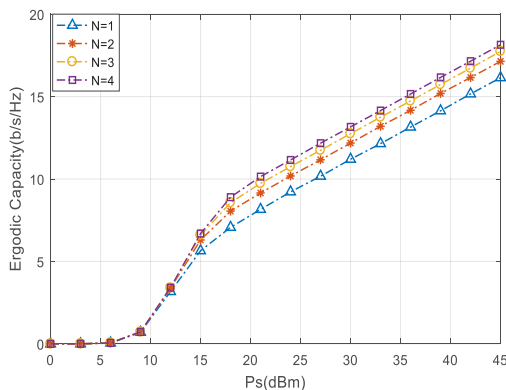
$$\left( \hat{m}, \hat{k}, \hat{n} \right) = \max_{\substack{i=1,2,\dots,K \\ m=1,2,\dots,M \\ n=1,2,\dots,N}} \min \left( \gamma_{1,i}(m), \gamma_{2,i}(m,n) \right) \quad (10)$$

که در آن  $\hat{m}$  شماره آنتن ارسالی انتخاب شده در S،  $\hat{k}$  شماره رله انتخاب شده و  $\hat{n}$  شماره آنتن ارسالی انتخاب شده از رله  $\hat{k}$  است. شیوه کار بدین صورت است که ابتدا با استفاده از اطلاعات

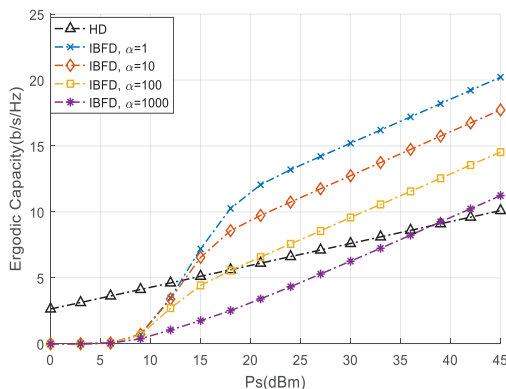
گرفتن اندازه توان تداخل خودی در سیستم IBFD، می‌توان از بین دو سیستم IBFD یا HD سیستمی را انتخاب کرد که عملکرد بهتری داشته باشد.

شکل‌های ۳ و ۴ ظرفیت متوسط سیستم را برحسب توان ارسالی نمایش داده‌اند. در سیستم‌های IBFD به دلیل استفاده کامل از منابع، افت بهره‌وری طیفی وجود ندارد. بنابراین، در حالی که تداخل خودی به صورت کامل حذف شود، بهره‌وری طیفی و ظرفیت متوسط سیستم IBFD نسبت به سیستم‌های HD دو برابر بیشتر است. اما با در نظر گرفتن اثر تداخل خودی، عملکرد سیستم IBFD تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

در شکل ۳ ظرفیت متوسط سیستم IBFD برحسب توان ارسالی و به ازای مقادیر مختلف تعداد آنتن‌های رله رسم شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، ظرفیت متوسط سیستم با افزایش توان ارسالی، افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش تعداد آنتن‌های رله و در یک مقدار مشخص توان ارسالی، ظرفیت متوسط سیستم بالاتر است و این نشان‌دهنده افزایش دایورسیتی فضایی سیستم است. هم‌چنین، چنان‌چه به‌طور معمول، شیب منحنی در توان‌های ارسالی بالا به‌عنوان بهره سیستم در نظر گرفته شود، از شکل ۳



شکل ۳: ظرفیت متوسط سیستم IBFD برحسب توان ارسالی با  $d_1 = d_2 = 5m$ ،  $\lambda = 0.5$  و برای مقادیر مختلف  $N$ .



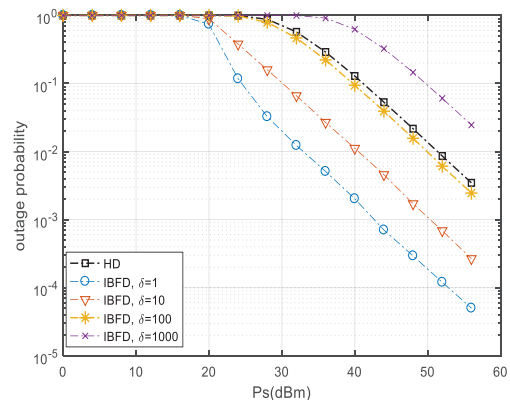
شکل ۴: ظرفیت متوسط دو سیستم HD و IBFD برحسب توان ارسالی برای مقادیر مختلف توان تداخل خودی با  $d_1 = d_2 = 5m$ ،  $\lambda = 0.5$  و  $M = N = L = 3$ .

روش‌های تقسیم زمانی یا فرکانسی، بهره‌وری طیفی نسبت به سیستم‌های IBFD نصف می‌شود. در بخش بعدی با ارائه نتایج شبیه‌سازی به بررسی عملکرد روش پیشنهادی می‌پردازیم.

## نتایج شبیه‌سازی و بحث

در این بخش برای نشان دادن عملکرد سیستم رله‌ای IBFD پیشنهادی با برداشت انرژی، از شبیه‌سازی به روش Monte-Carlo استفاده شده است. فرض شده است که رله‌ها به صورت یک شبکه همگن متراکم بین S و D و روی یک خط قرار گرفته‌اند. با در نظر گرفتن  $d$  به‌عنوان فاصله بین S و  $D$ ،  $d_1$  به‌عنوان فاصله بین S و R، و  $d_2$  به‌عنوان فاصله بین D و R داریم:  $\Omega_{1,i} = 10^{-3} d_1^{-\alpha}$ ،  $\Omega_{2,i} = 10^{-3} d_2^{-\alpha}$ ،  $i=1,2,\dots,K$  که در آن  $\alpha$  مؤلفه افت مسیر است. بدون از دست رفتن کلیت مسئله و برای سادگی  $\sigma_{1,i}^2 = \sigma_{2,i}^2 = \sigma^2 = -65dBm$  در نظر گرفته شده‌اند. توان تداخل خودی باقیمانده به صورت  $\sigma_{LI}^2 = \delta \sigma^2$  تعریف شده است که در آن  $\delta$  یک ضریب ثابت است. برای مثال  $\delta = 10$  به معنی ده برابر بودن توان تداخل باقیمانده نسبت به توان نویز است. علاوه بر این، در شبیه‌سازی‌ها  $R_{th} = 2$  bps/Hz،  $\eta = 0.9$ ،  $\alpha = 3$  و  $d = 10m$  انتخاب شده‌اند.

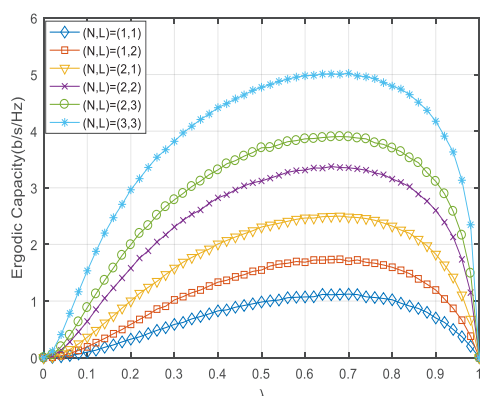
شکل ۲ احتمال قطعی سیستم برحسب توان ارسالی را برای دو سیستم HD و IBFD با تعداد آنتن‌های  $M=N=L=3$  و تعداد رله‌های  $K=2$  نشان داده است و به مقایسه این دو سیستم پرداخته است. احتمال قطعی در شکل ۲ برای سیستم IBFD به ازای مقادیر مختلف تداخل خودی (مقادیر مختلف  $\delta$ ) رسم شده است که در آن  $\delta = 1, 10, 100, 1000$  است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود به ازای توان‌های کوچک تداخل خودی عملکرد سیستم IBFD بهتر از سیستم HD است و با افزایش توان تداخل خودی به اندازه  $30dB$  ( $\delta = 1000$ )، عملکرد سیستم IBFD بدتر از سیستم HD می‌شود. بنابراین، با در نظر



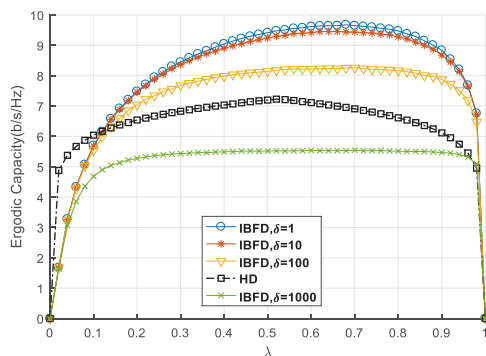
شکل ۲: احتمال قطعی دو سیستم HD و IBFD برحسب توان ارسالی با  $d_1 = d_2 = 5m$ ،  $\lambda = 0.5$  و برای مقادیر مختلف  $\delta$ .

جدول ۱- ظرفیت متوسط سیستم بر حسب توان ارسالی برای دو سیستم HD و IBFD و به ازای توان های مختلف تداخل خودی

$P_s$		۳	۹	۱۵	۲۱	۲۷	۳۳	۳۹	۴۵
IBFD	$\delta = 1$	۰/۰۰۱	۰/۲۶	۵/۱۶	۸/۸۵	۱۰/۸۷	۱۲/۸۹	۱۴/۸۹	۱۶/۸۶
	$\delta = 10$	۰/۰۰۱	۰/۲۴۴	۴/۰۲۳	۶/۴۳۷	۸/۴۴۴	۱۰/۴۴	۱۲/۴۲	۱۴/۴۳
	$\delta = 100$	۰/۰۰۱	۰/۱۹۱	۱/۷	۳/۳۸۲	۵/۲۷۱	۷/۲۶۱	۹/۲۱۵	۱۱/۲۳
	$\delta = 1000$	۰/۰۰۱	۰/۰۵۹	۰/۳۰۸	۰/۹۶۶	۲/۲۶۳	۴/۰۱۱	۵/۹۴۸	۷/۹۱۳
HD		۱/۵۴۴	۲/۴۷۸	۳/۴۵۹	۴/۴۴۳	۵/۴۵	۶/۴۴۶	۷/۴۴۳	۸/۴۳



شکل ۵: ظرفیت متوسط سیستم IBFD بر حسب  $\lambda$  با  $P_s = 28dBm$ ،  $\delta = 10$ ،  $d_1 = d_2 = 5m$  و برای مقادیر مختلف  $N$  و  $L$ .



شکل ۶: ظرفیت متوسط دو سیستم HD و IBFD بر حسب  $\lambda$  با  $P_s = 28dBm$ ،  $d_1 = d_2 = 5m$ ،  $N = L = 3$  و مقادیر مختلف  $\delta$

تمام انرژی سیگنال دریافتی، در رله برداشت شده و سهم پردازش اطلاعات در رله صفر می شود و در نتیجه سیگنالی از رله ارسال نشده و در این حالت نیز ظرفیت متوسط صفر می شود. بنابراین، با در نظر گرفتن یک مصالحه بین برداشت انرژی و پردازش اطلاعات، مقدار بهینه  $\lambda$  قابل انتخاب است. بعلاوه، شکل ۵ نشان دهنده افزایش ظرفیت متوسط سیستم با افزایش تعداد آنتن های رله و  $D$  است.

شکل ۶ به مقایسه ظرفیت متوسط دو سیستم HD و IBFD بر حسب  $\lambda$  پرداخته است. در این شکل، ظرفیت متوسط

نتیجه می شود که با افزایش تعداد آنتن های رله، بهره سیستم نیز افزایش پیدا کرده است.

در شکل ۴ به مقایسه ظرفیت متوسط دو سیستم HD و IBFD بر حسب توان ارسالی پرداخته شده است. با توجه به این شکل، به ازای مقادیر کوچک توان تداخل خودی ظرفیت متوسط سیستم IBFD بیشتر از سیستم HD است و با افزایش توان تداخل خودی، ظرفیت سیستم کاهش می یابد. هم چنین در توان های ارسالی کم، ظرفیت متوسط سیستم IBFD کمتر از سیستم HD است و با افزایش توان ارسالی، ظرفیت متوسط سیستم نیز افزایش یافته و سیستم IBFD عملکرد بهتری نسبت به سیستم HD خواهد داشت. بنابراین، با در نظر گرفتن یک توان تداخل خودی مشخص می توان یک نقطه سوئیچ بین دو سیستم HD و IBFD یافت که به ازای توان های ارسالی کوچک از سیستم HD استفاده کرد و از آن نقطه به بعد سیستم IBFD به کار برده شود تا عملکرد کلی سیستم مخابراتی بهبود یابد. در جدول ۱ نیز مقادیر مربوط به مقایسه ظرفیت متوسط سیستم های HD و IBFD بر حسب توان ارسالی آورده شده است. با توجه به جدول ۱ به ازای توان های ارسالی بزرگتر از ۱۵dB و برای توان های کوچک تداخل خودی ظرفیت متوسط سیستم IBFD نسبت به سیستم HD افزایش می یابد. بنابراین نقطه سوئیچ بین دو سیستم HD و IBFD قابل دستیابی است.

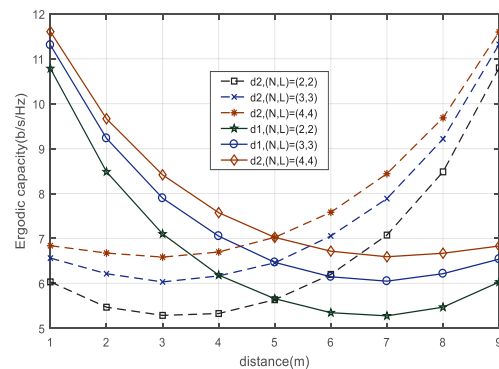
شکل های ۵ و ۶ به بررسی ظرفیت متوسط سیستم بر حسب نسبت تقسیم توان  $\lambda$  پرداخته اند. طبق تعریف پروتکل PSR،  $\lambda$  نشان دهنده یک مصالحه بین انرژی برداشت شده و توان سیگنال ارسالی از رله است.

در شکل ۵ ظرفیت متوسط بر حسب  $\lambda$  برای تعداد آنتن های رله،  $N$ ، و تعداد آنتن های مقصد،  $L$ ، رسم شده است. با توجه به شکل، برای  $\lambda = 0$  و  $\lambda = 1$  ظرفیت متوسط برابر با صفر است. چراکه در حالت  $\lambda = 0$  توان برداشت شده در رله صفر است و تمام انرژی سیگنال صرف پردازش اطلاعات در رله می شود؛ اما به علت وجود تضعیف در کانال بین رله و  $D$  و صفر بودن توان سیگنال ارسالی از رله، ظرفیت متوسط صفر می شود. در حالت

داشتن منحنی‌های ظرفیت متوسط برحسب  $\lambda$  و فاصله رله‌ها از S یا D می‌توان بهترین انتخاب را برای  $\lambda$  و همچنین بهترین انتخاب را برای  $d_1$  و  $d_2$  داشت تا عملکرد سیستم بهینه شود.

## مراجع

- [1] A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braunm, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka, H. Tullberg, M. A. Uusitalo, B. Timus and M. Fallgren., "Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, pp. 26–35, May 2014.
- [2] G. Wunder, P. Jung, M. Kasparick, T. Wild, F. Schaich, Y. Chen, S. T. Brink, I. Gaspar, N. Michailow, A. Festag, L. Mendes, N. Cassiau, D. Ktenas, M. Dryjanski, S. Pietrzyk, B. Eged, P. Yago and F. Wiedmann, "SGNOW: Non-Orthogonal, Asynchronous Waveforms for Future Mobile Applications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, pp. 97–105, February 2014.
- [3] Federico Boccardi, Robert W. Heath Jr., Angel Lozano, Thomas L. Marzetta, and Petar Popovski, "Five Disruptive Technology Directions for 5G," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, pp. 74–80, May 2014.
- [4] D. Kim, H. Lee and D. Hong, "A Survey of In-band Full-duplex Transmission: From the Perspective of PHY and MAC Layers," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2017-2046, 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 Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 9, pp. 1637-1652, 2014.
- [6] G. Liu, F.R. Yu, H. Ji, V. C. M. Leung and X. Li, "In-Band Full-Duplex Relaying for 5G Cellular Networks with Wireless Virtualization," *IEEE Network*, vol. 29, no. 6, pp. 54-61, 2015.
- [7] J. Lemos, F. Rosário, F. A. Monteiro, J. Xavier and A. Rodrigues, "Massive MIMO Full-Duplex Relaying with Optimal Power Allocation for Independent Multipairs," *IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, pp. 306-310, 2015.
- [8] K. Yang, H. Cui, L. Song and Y. Li, "Joint Relay and Antenna Selection for Full-Duplex AF Relay Networks," *IEEE Communication(ICC)*, 2014.
- [9] H. Cui, M. Ma, L. Song and B. Jiao, "Relay Selection for Two-Way Full Duplex Relay Networks with Amplify-and-Forward Protocol," *IEEE Transaction on Wireless Communication*, vol.13, pp.3768-3777, 2014.
- [10] J. Men, J. Ge and C. Zhang, "A Joint Relay-and-Antenna Selection Scheme in Energy Harvesting MIMO Relay Networks," *IEEE Signal Processing Letter*, pp. 532-536, 2016.
- [11] M. Mohammadi, B. K. Chalise, H. A. Suraweera, C. Zhong, G. Zheng and I. Krikidis, "Throughput Analysis and Optimization of Wireless-Powered Multiple Antenna Full-Duplex Relay Systems," *IEEE Transaction on communication*, vol. 64, pp. 1769-85, 2016.
- [12] W. Lumpkins, "Nikola Tesla's dream realized: Wireless power energy harvesting," *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 3, no. 1, pp. 39–42, Jan. 2014.
- [13] D. W. K. Ng, E. S. Lo, and R. Schober, "Wireless information and power transfer: Energy efficiency optimization in OFDMA systems," *IEEE Transaction Wireless Communication*, vol. 12, no. 12, pp. 6352–6370, Dec. 2013.
- [14] C. Zhong, H. A. Suraweeta, G. Zheng, I. Krikidis and Z. Zhang, "Wireless Information and Power Transfer With



شکل ۷: ظرفیت متوسط برحسب فاصله  $R_i$  ها از S و D با  $\lambda = 0.5$

$d = 10m$ ،  $P_s = 40dBm$ ،  $\delta = 10$  و برای مقادیر مختلف N و L.

سیستم IBFD برای مقادیر مختلف  $\delta$  رسم شده است. ملاحظه می‌شود که در مقایسه با سیستم HD، به ازای توان‌های کوچک تداخل خودی ظرفیت متوسط بیشتر است. همچنین برای مقادیر بزرگ‌تر  $\lambda$  ظرفیت متوسط سیستم IBFD بیشتر شده و از این منحنی نیز می‌توان مقدار بهینه‌ای برای  $\lambda$  انتخاب نمود. شکل ۷ نشان‌دهنده تغییرات ظرفیت متوسط برحسب فاصله رله از S،  $d_1$ ، و فاصله رله از D،  $d_2$ ، است که توان تداخل خودی به صورت ده برابر توان نویز در نظر گرفته شده و  $\lambda = 0.5$  و  $d = 10m$  است. با توجه به شکل دیده می‌شود که با افزایش فاصله رله‌ها از S، ظرفیت متوسط کاهش می‌یابد و با افزایش فاصله رله‌ها از D، ظرفیت متوسط افزایش می‌یابد؛ بدین صورت که با افزایش  $d_1$ ،  $d_2$  کاهش می‌یابد و برعکس. بنابراین، با توجه به شکل ۷ و با در نظر گرفتن یک مصالحه بین فاصله رله از S یا D می‌توان فاصله مناسب رله از S و D را انتخاب کرد. با توجه به شکل ۷ فاصله مناسب برای رله‌ها  $d_1 = d_2 = 5m$  که محل تلاقی نمودارها در شکل ۷ است، انتخاب شده است.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سیستم رله‌ای IBFD با پروتکل AF و با استفاده از SWIPT پیاده‌سازی شده است که در رله‌ها برداشت انرژی صورت می‌گیرد. سیستم چند رله‌ای در نظر گرفته شده و طرح انتخاب هم‌زمان آنتن و رله استفاده شده است که منجر به کاهش پیچیدگی و افزایش دایورسیتی فضایی سیستم می‌شود. از طرفی با شبیه‌سازی معیارهای احتمال قطعی و ظرفیت متوسط سیستم برحسب پارامترهای مختلف، بهتر بودن عملکرد سیستم IBFD نسبت به سیستم‌های HD به‌ویژه در توان‌های کوچک تداخل خودی نشان داده شده است. با در نظر گرفتن توان تداخل خودی می‌توان یک نقطه سوییچ بین دو سیستم IBFD و HD در نظر گرفت و با توجه به موجود سیستم، از حالت IBFD یا HD استفاده کرد. علاوه‌براین، با

information processing,” *IEEE Transaction on Wireless Communications*, vol. 12, no. 7, pp. 3622–3636, July 2013.

- Full Duplex Relaying,” arXiv:1409.3904[cs,IT], Submitted on 13 Sep 2014.
- [15] T. Riihonen, S. Werner, and R. Wichman, “Hybrid full-duplex/half-duplex relaying with transmit power adaptation,” *IEEE Transaction on Wireless Communications*, vol. 10, no. 9, pp. 3074–3085, Sep. 2011.
- [16] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani and R. A. Kennedy, “Relaying protocols for wireless energy harvesting and