

بهینه‌سازی توأم اختصاص توان در یک شبکه مخابرات همکارانه با استفاده از دسترسی چندگانه غیرمتعامد

حمید امیری آرا* محمدباقر مسرور** محمدرضا ذهابی***

* دکتري، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

** کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

*** استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۷

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

در این مقاله یک شبکه فراسو با دو کاربر به ترتیب در نقش فرستنده و رله، و یک ایستگاه مرکزی به عنوان گیرنده در نظر گرفته شده است. هدف این است که ضریب بهینه سمبل‌های سیگنال غیرمتعامد و اختصاص توان بهینه در منبع-رله به منظور بیشینه کردن متوسط مجموع نرخ در یک سیستم مخابرات همکارانه با استفاده از تکنیک دسترسی چندگانه غیرمتعامد، تعیین شود. برای دستیابی به این اهداف، ابتدا متوسط مجموع نرخ سیستم مخابرات همکارانه با استفاده از دسترسی چندگانه غیرمتعامد با رله کدگشایی و ارسال، در کانال مستقل رایلی محاسبه گردید. سپس در گام اول، مسئله بهینه‌سازی ضریب سمبل‌های سیگنال غیرمتعامد در این سیستم به ازای هر اختصاص توانی به صورت ریاضی بیان شده و رابطه بسته برای حل تقریبی آن پیشنهاد شده است. در گام دوم، مسئله بهینه‌سازی اختصاص توان بهینه آرسالی از منبع-رله، به ازای ضرایب سیگنال مشخص معرفی و حل گردید. در انتها، مسئله بهینه‌سازی توأم ضریب سمبل‌های سیگنال غیرمتعامد و اختصاص توان بررسی می‌شود و الگوریتمی برای بهینه‌سازی توأم این دو پارامتر پیشنهاد شده است. الگوریتم پیشنهادی این مقاله نشان می‌دهد که بهینه‌سازی توأم ضریب سمبل‌های سیگنال غیرمتعامد و اختصاص توان منجر به دستیابی به متوسط نرخ بالاتری نسبت به بهینه‌سازی جداگانه هر یک از این پارامترها می‌شود. همچنین، شبیه‌سازی و نتایج عددی برای تأیید روابط تئوری ارائه گردیده است، که شبیه‌سازی‌ها بهره 3 dB را برای سیستم بهینه شده توأم با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سیستم غیر بهینه نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: مخابرات همکارانه، دسترسی چندگانه غیرمتعامد، بهینه‌سازی، اختصاص توان.

ظرفیت سیستم را افزایش دهد. راه حل استفاده از گوناگونی بهره‌گیری از سیستم مخابرات همکارانه (CRS) است.

در مراجع [۱]، [۲] نشان داده شده است که سیستم مخابرات همکارانه با یک رله نیمه‌دوسویه که در آن مقصد دو کپی از یک سیگنال یکسان را در دو فاز مختلف از منبع و رله، دریافت و ترکیب می‌کند، باعث بهبود در کیفیت سیگنال دریافتی می‌شود. با

۱. مقدمه

گوناگونی همکارانه فناوری شاخصی در شبکه‌های بیسیم است که می‌تواند با محوشدگی مقابله کند، ناحیه پوششش را گسترش و

نویسنده مسئول: محمد رضا ذهابی zahabi@nit.ac.ir

ترکیب NOMA و کدهای فضا-زمان الموتی به نتایج قابل توجهی دست پیدا کردند. در این طرح برخلاف طرح‌های قبلی از چند آنتن در فرستنده و رله استفاده شده است، و نویسندگان توانستند رابطه بسته برای مجموع ظرفیت ارگودیک و احتمال قطع بدست آورند. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که این طرح در سیگنال به نویز متوسط و بالا، به نتایج بهتری نسبت به آنچه که در مراجع [۴] و [۱۱] انجام شده است کسب کرده است.

با توجه به دانش نویسندگان، هیچ مرجع قبلی تاکنون به بهینه‌سازی توأم ضرایب سمبل‌های سیگنال متعامد و اختصاص توان به منبع-رله در سیستم‌های همکارانه با استفاده از NOMA با هدف بیشینه‌سازی مجموع نرخ قابل دستیابی پرداخته است. در مقاله حاضر، علاوه بر بهینه‌سازی ضرایب سمبل‌های سیگنال متعامد در تکنیک NOMA، بهینه‌سازی اختصاص توان برای منبع-رله در سیستم همکارانه نیز انجام گرفته است. با کمک روابط بسته بدست آمده در این مقاله، این امکان فراهم شده تا بهینه‌سازی توأم در سیستم همکارانه با استفاده از NOMA صورت گیرد که این باعث بهبود متوسط مجموع نرخ^{۱۰} (ASR) سیستم نسبت به کارهای گذشته شده است.

در ادامه مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است:

- بخش دوم مدل سیستم را معرفی می‌کند.
- در بخش سوم، متوسط مجموع نرخ برای شبکه مخابرات همکارانه با استفاده از NOMA در حالت فرا سو، در کانال رایلی محاسبه گردید.
- در بخش چهارم، به بهینه‌سازی توأم ضرایب سمبل‌های سیگنال متعامد و اختصاص توان منبع-رله برای رسیدن به حداکثر مجموع نرخ پرداخته شده است.
- نتایج و بررسی آن‌ها در بخش پنجم قرار داده شده است.

۲. مدل سیستم

یک سیستم رله همکارانه فرا سو^{۱۱} (U-CRS) مطابق شکل (۱) شامل یک کاربر به عنوان منبع (S)، کاربری دیگر در نقش رله نیمه دوسویه (R)، و یک ایستگاه پایه به عنوان مقصد (D) را در نظر بگیرید.

در این مقاله فرض شده تمام مسیرها (منبع-رله، منبع-مقصد و رله-مقصد) قابل دسترسی باشند. ضرایب کانال در مسیرهای S-D، S-R و R-D به ترتیب با h_{SR} ، h_{SD} و h_{RD} نام‌گذاری و این ضرایب،

این‌حال، این نوع ارسال همکارانه رله‌ای، راندمان طیفی سیستم را به خاطر انتقال در دو فاز جداگانه محدود می‌کند. مرجع [۳] یک سیستم دسترسی چندگانه غیرمتعامد^۱ (NOMA) فراسو^۲ را پیشنهاد می‌کند، که در آن کاربران بسته‌های خود را با استفاده از کد فضا-زمان ارسال می‌کنند تا در گیرنده بهره‌برداری کامل را از گوناگونی فضایی^۳ ببرند. در مرجع [۴] یک سیستم همکارانه با NOMA ارائه شده است که با ارسال چندگانه سیگنال‌ها، بهره‌وری طیفی را بهبود بخشد. تکنیک NOMA به فرستنده اجازه می‌دهد که چندین سیگنال اطلاعات را به طور هم‌زمان به چند گیرنده که در همکاری با هم هستند برساند، بنابراین در مخابرات همکارانه به جهت افزایش کارایی طیف می‌توان توأم دو سیگنال داده را از منبع ارسال کرد [۵]. در این طرح، اختصاص توان در منبع برای دو سیگنال انجام می‌شود و با کدینگ برهم‌نهی^۴ برای مقصد و رله ارسال می‌شوند. در فاز اول سیگنال با توان بالاتر با توجه به سیگنال به نویز بالایی که دارد در مقصد آشکار سازی می‌شود و در رله ابتدا سیگنال با توان بالا آشکار سازی می‌شود و سپس سیگنال با توان پایین با استفاده از حذف تداخل پیاپی^۵ (SIC) آشکار سازی می‌شود. در فاز دوم سیگنال با توان پایین تر آشکار سازی شده در رله برای مقصد ارسال می‌شود. بنابراین در دو فاز دو سیگنال از منبع به مقصد ارسال می‌شود.

در مرجع [۶]، یک رابطه بسته برای محاسبه احتمال قطع شبکه NOMA همکارانه تقویت و ارسال^۶ (AF) پیشنهاد شده است. در مرجع [۷]، احتمال قطع و ظرفیت مجموع ارگودیک در یک سیستم NOMA همکارانه با رله رمزگشایی و ارسال^۷ (DF) اندازه‌گیری شد. در مراجع [۸] و [۹] یک استراتژی انتخاب رله برای بررسی عملکرد احتمال قطع و مرتبه چندگانگی سیستم همکارانه NOMA پیشنهاد شده است. در این روش کاربر دومی را با شرایط بهتر کانال به عنوان یک رله همکار DF برای انتقال اطلاعات با روش NOMA انتخاب می‌کنند. در مرجع [۱۰]، مفهوم NOMA همکارانه در مخابرات سلولی با کمک کاربر برای تقویت قابلیت اطمینان ارتباطات در لبه سلول ارائه شده است. در مرجع [۱۱] نویسندگان، گیرنده استفاده شده در مرجع [۴] را بهبود بخشیدند. در این مدل سیستم گیرنده می‌تواند به طور توأم هر دو سمبل ارسالی از مبدأ را به وسیله ترکیب‌کننده بیشینه نرخ^۸ (MRC) و SIC کدگشایی کند. این طرح نسبت به طرح مطرح شده در مرجع [۴] دارای ظرفیت ارگودیک بهتر و احتمال قطع^۹ پایین‌تری است. در مرجع [۱۲] نویسندگان با

^۷ Decode and forward

^۸ Maximum Ratio Combining

^۹ Outage Probability

^{۱۰} Average sum rate

^{۱۱} Uplink-Cooperative Relay System

^۱ Non Orthogonal Multiple Access

^۲ Uplink

^۳ Space diversity

^۴ Super Position Coding

^۵ Signal Interference Cancellation

^۶ Amplify and forward

$$\gamma_{SD} = \frac{|h_{SD}|^2 a_1 b P_T}{|h_{SD}|^2 a_2 b P_T + \sigma^2} \quad (5)$$

بیان کرد. در فاز زمانی دوم، رله سمبل کدگشایی شده S_2 را با توان $(1-b)P_T$ برای مقصد ارسال می‌کند. فرض بر این است که رله به درستی سمبل S_2 را کدگشایی می‌کند، سیگنال دریافتی در مقصد در فاز زمانی دوم به صورت

$$r_{RD} = h_{RD} \sqrt{(1-b)P_T} S_2 + n_{RD} \quad (6)$$

بیان می‌شود، که در آن نویز سفید گوسی اضافه‌شونده با واریانس σ^2 است. سیگنال به نویز دریافتی برای سمبل S_2 در رابطه (۶) برابر با

$$\gamma_{RD} = \frac{|h_{RD}|^2 (1-b)P_T}{\sigma^2} \quad (7)$$

می‌شود. در نتیجه در مخابرات همکارانه با NOMA، مقصد می‌تواند دو سمبل S_1 و S_2 را در دو بازه زمانی دریافت کند، بر خلاف مخابرات همکارانه معمول که در آن گیرنده در دو بازه زمانی تنها یک سیگنال داده را دریافت می‌کند.

۳. محاسبه متوسط مجموع نرخ

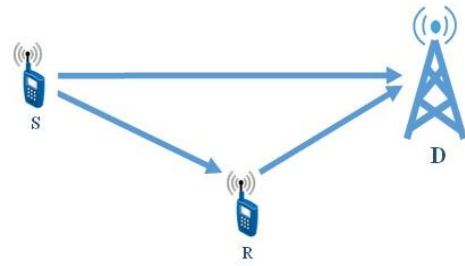
عبارت $\lambda \triangleq |h_{RD}|^2$ ، $\lambda_{SR} \triangleq |h_{SR}|^2$ ، $\lambda_{SD} \triangleq |h_{SD}|^2$ و $\rho \triangleq \frac{P_T}{\sigma^2}$ را در نظر بگیرید که ρ سیگنال به نویز ارسالی می‌باشد. توجه شود که $\frac{bP_T}{\sigma^2}$ سیگنال به نویز ارسالی در منبع و $\frac{(1-b)P_T}{\sigma^2}$ سیگنال به نویز ارسالی در رله می‌باشد. همچنین واریانس ضرایب کانال نیز بصورت $\beta_{SD} = E|h_{SD}|^2$ ، $\beta_{SR} = E|h_{SR}|^2$ و $\beta_{RD} = E|h_{RD}|^2$ بیان می‌شود. از آنجایی که سمبل S_1 باید هم در مقصد و هم با روش SIC در رله کدگشایی شود، نرخ قابل دستیابی برای سمبل S_1 از طریق روابط (۳) و (۵) به صورت

$$\begin{aligned} C_{S_1} &= \frac{1}{\gamma} \min\{\log_2(1 + \gamma_{SD}), \log_2(1 + \gamma_{SR}^1)\} \\ &= \frac{1}{\gamma} \log_2 \left\{ 1 + \frac{\min\{\lambda_{SD}, \lambda_{SR}\} (1 - a_2) b \rho}{\min\{\lambda_{SD}, \lambda_{SR}\} b \rho a_2 + 1} \right\} \\ &= \frac{1}{\gamma} \log_2 \{1 + \min\{\lambda_{SD}, \lambda_{SR}\} b \rho\} - \\ &\quad \frac{1}{\gamma} \log_2 \{1 + \min\{\lambda_{SD}, \lambda_{SR}\} a_2 \rho\} \end{aligned} \quad (8)$$

قابل محاسبه است. باید به این نکته توجه شود که خط دوم رابطه (۸) بر اساس افزایشی بودن γ_{SD} و γ_{SR} نوشته شده است. همچنین در مرحله آخر از $a_2 = 1 - a_1$ استفاده شده است. بر این اساس که نرخ نقطه به نقطه رله کدگشایی و ارسال بر مبنای ضعیف‌ترین مسیر استوار است و با استفاده از روابط (۴) و (۷) نرخ قابل دستیابی برای سمبل S_2 برابر

$$\begin{aligned} C_{S_2} &= \frac{1}{\gamma} \min\{\log_2(1 + \gamma_{SR}), \log_2(1 + \gamma_{RD})\} \\ &= \frac{1}{\gamma} \log_2(1 + \min\{\lambda_{SR} a_2 b \rho, \lambda_{RD} (1-b) \rho\}) \end{aligned} \quad (9)$$

می‌شود. از روابط (۸) و (۹)، مجموع نرخ قابل دستیابی CRS با استفاده از NOMA بدست می‌آید:



شکل ۱. مدل سیستم مخابرات همکارانه پایه در حالت فراسو شامل یک کاربر منبع (S)، یک کاربر به عنوان رله (R) و ایستگاه پایه به عنوان مقصد (D)

متغیرهای تصادفی رایلی با واریانس β_{SD} ، β_{SR} و β_{RD} در نظر گرفته می‌شوند. همچنین به خاطر تأثیرات تلفات مسیر و سایه‌افکنی که مسیر D-S را ضعیف‌تر از مسیر R-S می‌کند، شرایط $\beta_{SD} < \beta_{SR}$ برقرار است.

توان کل ارسال را با $P_T = P_S + P_R$ نمایش می‌دهیم و توان منبع و رله به ترتیب با $P_S = bP_T$ و $P_R = (1-b)P_T$ قابل بیان است که در آن b ضریب اختصاص توان منبع و رله است. در CRS با استفاده از NOMA،

نرخ $\sqrt{a_1 b P_T} S_1 + \sqrt{a_2 b P_T} S_2$ را با توجه به استاندارد NOMA در حین بازه زمانی اول، برای رله و مقصد ارسال می‌کند. که در آن S_i ، i امین سمبل اطلاعات، $E[|S_i|^2] = 1$ و ضریب اختصاص توان برای سمبل‌ها می‌باشد. توجه داشته باشید که مطابق فرضیات NOMA شرایط $a_1 > a_2$ و $a_1 + a_2 = 1$ برقرار است.

سیگنال دریافتی در رله و مقصد در بازه زمانی اول عبارت است از:

$$r_{SR} = h_{SR} (\sqrt{a_1 b P_T} S_1 + \sqrt{a_2 b P_T} S_2) + n_{SR} \quad (1)$$

$$r_{SD} = h_{SD} (\sqrt{a_1 b P_T} S_1 + \sqrt{a_2 b P_T} S_2) + n_{SD} \quad (2)$$

n_{SD} و n_{SR} به عنوان نویز سفید اضافه‌شونده گوسی با واریانس σ^2 و مستقل فرض می‌شود. رله سمبل S_1 را با در نظر گرفتن S_2 به عنوان نویز، کدگشایی، سپس آن را کنار می‌گذارد تا سمبل S_2 را از رابطه (۱) کدگشایی کند، این عمل SIC نام دارد. بنابراین سیگنال به نویز دریافتی برای سمبل S_1 و S_2 در رله به ترتیب برابر با

$$\gamma_{SR}^1 = \frac{|h_{SR}|^2 a_1 b P_T}{|h_{SR}|^2 a_2 b P_T + \sigma^2} \quad (3)$$

$$\gamma_{SR} = \frac{|h_{SR}|^2 a_2 P_T}{\sigma^2} \quad (4)$$

می‌شود، که علامت I در رابطه (۳) بر این نکته اشاره می‌کند که آشکارسازی S_1 در رله با وجود تداخل ناشی از S_2 می‌باشد. همچنین با فرض اینکه عمل SIC سمبل S_1 را به طور کامل و بدون خطا حذف کرده، رابطه (۴) محقق می‌شود. در سمت دیگر، مقصد S_2 را به عنوان نویز شناخته تا سمبل S_1 را از رابطه (۲) بدست آورد. پس سیگنال به نویز دریافتی برای سمبل S_1 در سمت مقصد را می‌توان به صورت

$$\ln\left(\frac{\sigma^2}{abP_T\beta_{SR}} + \frac{\sigma^2}{a(1-b)P_T\beta_{RD}}\right)$$

همانطور که مشاهده می‌شود بر خلاف رابطه دقیق متوسط مجموع نرخ (رابطه ۱۴)) که بصورت انتگرالی است، حد بالای بدست آمده در رابطه (۱۵) تابع ساده‌ای از ضریب سمبل‌های سیگنال نامتعامد (a) و توان اختصاص یافته به منبع-رله (b) است. همچنین از کران بالا برای متوسط مجموع نرخ بدست آمده ملاحظه می‌شود که بر خلاف سیستم‌های متعامد حتی در سیگنال به نویز بی‌نهایت، متوسط مجموع نرخ سیستم NOMA مقدار محدودی به دست می‌آید که این ناشی از وجود تداخل سمبل‌های سیگنال نامتعامد می‌باشد. در ادامه مقاله از روابط (۱۴) و (۱۵) برای ارزیابی عملکرد متوسط مجموع نرخ سیستم به صورت دقیق و مجانبی استفاده می‌شود.

۴. محاسبه ضرایب اختصاص توان بهینه

در این بخش، تعیین ضریب سمبل‌های سیگنال نامتعامد و اختصاص توان بهینه منبع-رله سیستم همکارانه با هدف بیشینه نمودن متوسط مجموع نرخ بیت برای ساختار شبکه همکارانه با استفاده از NOMA مد نظر می‌باشد. ابتدا، در زیر بخش اول، رابطه بسته برای بهینه‌سازی اختصاص توان منبع-رله به ازای هر ضریب سمبل‌های سیگنال متعامد، به جهت بهینه‌سازی سیستم همکارانه شروع می‌شود. در زیر بخش دوم، ضریب سمبل‌های سیگنال متعامد به ازای هر اختصاص توانی از منبع-رله بهینه می‌گردد، تا عملکرد تکنیک NOMA بیشینه گردد. در انتها بهینه‌سازی توأم ضریب سمبل‌های سیگنال متعامد و توان منبع-رله به صورت ریاضی بیان شده و یک الگوریتم برای تعیین جواب بهینه مسئله بهینه‌سازی توأم پیشنهاد می‌شود.

۴-۱ بهینه‌سازی اختصاص توان منبع-رله

در این بخش هدف بهینه‌سازی اختصاص توان منبع-رله در شبکه‌های مخابرات همکارانه که بصورت

$$P_s^*, P_r^* = \operatorname{argmin} \bar{C}^{NOMA}$$

$$\text{subject to: } P_s + P_r = P_T$$

قابل تعریف است، آن‌که در آن P_T نشان دهنده توان کل انتقال یا به عبارت دیگر حداکثر توانی که یک بسته مجاز است در سرا سر انتقال از منبع به مقصد مصرف کند، می‌باشد. بدین منظور با کمک نسبت توان (b) و جایگذاری توان منبع $P_s = rP$ و توان رله $P_r = (1-r)P$ در رابطه (۱۵)، تابع هدف مسئله به صورت

$$\bar{C}_{\rho \rightarrow \infty}^{NOMA} = \{E_C + \ln\left(\frac{\sigma^2}{abP_T(\beta_{SD} + \beta_{SR})}\right) \times \quad (16)$$

$$C^{NOMA} = C_{S_1} + C_{S_2} \quad (10)$$

در ادامه برای سهولت نگارش a_r را با a نشان می‌دهیم. با تعریف $Y \triangleq \min\{\lambda_{SR}b\rho a, \lambda_{RD}(1-b)\rho\}$ و $X \triangleq \min\{\lambda_{SD}, \lambda_{SR}\}$ و استفاده از تابع چگالی احتمال $f_{\lambda_\delta}(x) = e^{-x/\beta_\delta}$ برای $\delta \in \{SD, SR, RD\}$ ، تابع توزیع تجمعی X و Y به ترتیب $F_X(x) = 1 - e^{-x(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}})}$ و $F_Y(y) = 1 - e^{-y(\frac{1}{\beta_{SR}b\rho a} + \frac{1}{\beta_{RD}(1-b)\rho})}$ می‌شود. با مشتق‌گیری از $F_X(x)$ و $F_Y(y)$ ، تابع چگالی احتمال X و Y به ترتیب می‌شود:

$$f_X(x) = \left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}}\right) e^{-x(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}})} \quad (11)$$

$$f_Y(y) = \left(\frac{1}{\beta_{SR}b\rho a} + \frac{1}{\beta_{RD}(1-b)\rho}\right) \times e^{-y(\frac{1}{\beta_{SR}b\rho a} + \frac{1}{\beta_{RD}(1-b)\rho})} \quad (12)$$

با استفاده از روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) متوسط مجموع نرخ به صورت

$$\bar{C}^{NOMA} = \int_0^\infty \left\{ \frac{1}{\gamma} \log_\gamma(1 + xb\rho) - \log_\gamma(1 + xb\rho a) \right\} f_X(x) dx + \int_0^\infty \left\{ \log_\gamma(1 + y) \right\} f_Y(y) dy \quad (13)$$

قابل محاسبه است. با استفاده از رابطه $\int_0^\infty e^{-\mu x} \ln(1 + \eta x) dx = -\frac{1}{\mu} e^{\mu/\eta} \operatorname{Ei}(-\mu/\eta)$ حل انتگرال رابطه (۱۳) به صورت

$$\bar{C}^{NOMA} = -\frac{\log_\gamma e}{\gamma} \left\{ e^{\frac{1}{b\rho}(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}})} \times \operatorname{Ei}\left(-\frac{1}{b\rho}(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}})\right) - e^{\frac{1}{b\rho a}(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}})} \operatorname{Ei}\left(-\frac{1}{b\rho a}(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}})\right) + e^{\frac{1}{\beta_{SR}b\rho a} + \frac{1}{\beta_{RD}(1-b)\rho}} \times \operatorname{Ei}\left(-\frac{1}{\beta_{SR}b\rho a} - \frac{1}{\beta_{RD}(1-b)\rho}\right) \right\} \quad (14)$$

قابل بیان است، که در آن $\operatorname{Ei}(\cdot)$ نشان‌دهنده تابع انتگرال نمایی است. با استفاده از تقریب‌های $1 + x \approx e^x$ برای x کوچک و $\operatorname{Ei}(-x) \approx E_C + \ln(x)$ [مرجع ۱۳ معادله (۸,۲۱۲,۱)]، که E_C نشان دهنده ثابت اوپلر است، و با در نظر گرفتن $\rho_t = \frac{bP_T}{\sigma^2}$ و $\rho_r = \frac{(1-b)P_T}{\sigma^2}$ یک عبارت مجانبی برای رابطه (۱۴) بدین گونه بدست می‌آید:

$$\bar{C}_{\rho \rightarrow \infty}^{NOMA} = -\frac{\log_\gamma e}{\gamma} \times \left\{ E_C + \ln\left(\frac{\sigma^2}{bP_T(\beta_{SD} + \beta_{SR})}\right) - \ln\left(\frac{\sigma^2}{abP_T(\beta_{SD} + \beta_{SR})}\right) + \right\} \quad (15)$$

۴-۲ بهینه‌سازی ضریب سمبل‌های سیگنال متعامد

ضریب اختصاص توان سمبل‌های سیگنال متعامد تأثیر بسیاری بر عملکرد تکنیک دسترسی چندگانه غیرمتعامد دارد و با بهینه‌سازی آن می‌توان متوسط نرخ را بیشینه نمود. این مسئله بهینه‌سازی به صورت

$$S_1^*, S_2^* = \operatorname{argmin} \bar{C}^{NOMA}$$

$$\text{subject to: } S_1 + S_2 = P_S$$

قابل بیان است، مشابه روند بخش قبلی، بدین منظور با تعریف $g \triangleq \gamma \left(\frac{1}{\beta_{SR} b \rho a} + \frac{1}{\beta_{RD} (1-b) \rho} \right)$ و با مشتق‌گیری از رابطه (۱۳) نسبت به a رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\partial \bar{C}^{NOMA}}{\partial a} = -\frac{\log_2 e}{2a} \left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}} \right) \times \int_0^\infty \frac{x}{\left(\frac{1}{b \rho a} + x \right)} e^{-x \left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}} \right)} dx + \frac{\log_2 e}{2} \left(\frac{1}{\beta_{SR} b \rho a^2} \right) \times \left(\frac{1}{\beta_{SR} b \rho a} + \frac{1}{\beta_{RD} (1-b) \rho} \right)^{-1} \times \int_0^\infty \left(\frac{g}{\frac{1}{\beta_{SR} b \rho a} + \frac{1}{\beta_{RD} (1-b) \rho} + g} \right) e^{-g} dg \quad (20)$$

با استفاده از [مرجع ۱۳ معادله (۵، ۳۵۳، ۳)]، رابطه (۲۰) را می‌توان به صورت

$$\frac{\partial \bar{C}^{NOMA}}{\partial a} = \frac{\log_2 e}{2} \left\{ - \left(\frac{1}{b \rho a} \right) \left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}} \right) \times e^{\frac{1}{b \rho a} \left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}} \right)} \operatorname{Ei} \left(- \frac{1}{b \rho a} \left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}} \right) \right) - \frac{1}{a} + \left(\frac{1}{\beta_{SR} b \rho a} \right) e^{\left(\frac{1}{\beta_{SR} b \rho a} + \frac{1}{\beta_{RD} (1-b) \rho} \right)} \times \operatorname{Ei} \left(- \frac{1}{\beta_{SR} b \rho a} - \frac{1}{\beta_{RD} (1-b) \rho} \right) + \left(\frac{1}{\beta_{RD} a (1-b)} + \frac{1}{\beta_{SR} b \rho a} \right) \right\} \quad (21)$$

بازنویسی کرد. سپس با اعمال تقریب‌های $e^x \approx 1 + x$ و $\operatorname{Ei}(-x) \approx E_c + \ln(x)$ که تقریب برای سیگنال به نویز بالا هستند، و $\beta_{SR} a + \beta_{RD} \approx \frac{1}{\beta_{SR} b \rho a} + \frac{1}{\beta_{RD} (1-b) \rho} \approx \frac{1}{\beta_{SR} b \rho a}$ و β_{RD} برای a و b های کوچک، رابطه (۲۱) به صورت

$$\frac{\partial \bar{C}^{NOMA}}{\partial a} = -\frac{\log_2 e}{2 b \rho a} \left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}} \right) \times \left\{ E_c + \ln \left(\frac{1}{b \rho a} \left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}} \right) \right) \right\} + \frac{\log_2 e}{2 \beta_{SR} b \rho a} \times \left\{ E_c + \ln \left(\frac{1}{\beta_{SR} b \rho a} \right) \right\} - \frac{(\log_2 e) \beta_{SR} b}{2 \beta_{RD} (1-b)} \quad (22)$$

قابل بیان است. با مشتق گرفتن مجدد از رابطه (۲۲) نسبت به a داریم:

$$\left. \left(\frac{\sigma^2}{ab P_T \beta_{SR}} + \frac{\sigma^2}{a(1-b) P_T \beta_{RD}} \right) \right\} = \frac{-\log_2 e}{2} \left\{ E_c + \ln \left(\frac{\sigma^2}{P_T} \right) + \ln \left(\frac{1}{b \beta_{SR}} + \frac{a}{(1-b) \beta_{RD}} \right) \right\} = \frac{1}{2} \log_2 \frac{P_T}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \log_2 e E_c - \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{1}{b \beta_{SR}} + \frac{a}{(1-b) \beta_{RD}} \right)$$

قابل بازنویسی است. برای حل مسئله بهینه‌سازی اختصاص توان می‌توان از کلیه عبارات ثابت نسبت به متغیرهای b در رابطه (۱۶) صرف‌نظر نمود و حل مسئله بهینه‌سازی معادل با برابر صفر قرار دادن مشتق رابطه (۱۶) می‌گردد:

$$\frac{\partial \bar{C}_{\rho \rightarrow \infty}^{NOMA}}{\partial b} = -\frac{1}{2 \ln 2} \frac{1}{\frac{1}{b \beta_{SR}} + \frac{a}{(1-b) \beta_{RD}}} = 0 \quad (17)$$

برای اثبات مقعر بودن رابطه (۱۷) از آن یک بار دیگر نسبت به b مشتق گرفته و مشاهده می‌شود:

$$\frac{\partial^2 \bar{C}_{\rho \rightarrow \infty}^{NOMA}}{\partial b^2} = -\frac{1}{2 \ln 2} \times \left(\frac{a^2}{(1-b)^4 \beta_{RD}^2} + \frac{3}{b^4 \beta_{SR}^2} + \frac{2a((1-b)^2 + b^2)}{b^3(1-b)^3 \beta_{SR} \beta_{RD}} \right) \left(\frac{1}{b \beta_{SR}} + \frac{a}{(1-b) \beta_{RD}} \right)^2 \quad (18)$$

رابطه (۱۸) باید همواره کوچک‌تر از صفر باشد، از آنجا که β_{RD} ، β_{SR} و a و b اعدادی مثبت و همچنین b و a اعدادی بین صفر و یک هستند < 0 همواره برقرار است. در نتیجه مقدار بهینه ضریب اختصاص توان منبع-رله را می‌توان با حل معادله رابطه (۱۷) به صورت

$$b^* = \frac{1}{1 + \sqrt{a \left(\frac{\beta_{SD}}{\beta_{RD}} \right)}} \quad (19)$$

بدست آورد. رابطه (۱۹) مقدار بهینه ضریب اختصاص توان منبع-رله b^* برحسب ضریب اختصاص توان سمبل‌های سیگنال متعامد a را ارائه می‌دهد. با استفاده از این نسبت بهینه توان a^* ، توان بهینه منبع و رله به ترتیب از روابط

$$P_S^* = b^* P$$

$$P_R^* = (1 - b^*) P$$

قابل محاسبه است. حال که ضریب اختصاص توان منبع-رله به جهت بهبود عملکرد سیستم همکارانه محاسبه گردید، در ادامه به دنبال بهینه‌سازی ضریب سمبل‌های سیگنال متعامد به جهت بهبود عملکرد تکنیک NOMA برای دستیابی به متوسط نرخ حداکثری هستیم.

جایگذاری آن در رابطه (۲۹) مقدار ضریب اختصاص توان بهینه سیگنال، a^* را محاسبه نمود.

۳-۴ بهینه‌سازی توأم ضریب سمبل‌های سیگنال متعامد و اختصاص توان منبع-رله

در بخش آخر هدف بهینه‌سازی ضریب سمبل‌های سیگنال متعامد به همراه بهینه‌سازی توان برای منبع-رله است، که به کارایی بالاتر برای شبکه در عوض پیچیدگی بیشتر می‌رسد. مسئله بهینه‌سازی توأم به صورت زیر قابل بیان است:

$$a^*, b^* = \operatorname{argmax} C^{NOMA} \quad (31)$$

$$0 \leq a \leq 1$$

$$0 \leq b \leq 1$$

الگوریتم بهینه‌سازی توأم ضرایب اختصاص توان منبع-رله و سمبل‌های سیگنال متعامد
۱- مقدار اولی به برای a در نظر گرفته می‌شود (مثلاً $a = 0.5$)
۲- محاسبه b جدی با استفاده از رابطه $b_{new}^* = \frac{1}{1 + \sqrt{a \times \left(\frac{\beta_{SD}}{\beta_{RD}}\right)}}$
۳- با b بدست آمده در بند ۲ و رابطه $a_{new}^* = e^{(-\frac{1}{\rho}W(\omega) + E_c + \psi)}$ بروزرسانی می‌شود.
۴- تکرار بند دوم و سوم تا به مقدار a^* و b^* بهی نه همگرا شود.

مقرر بودن این مسئله بهینه‌سازی در پیوست اثبات شده است. حال مسئله (۳۱) را می‌توان بدون از دست دادن کلیت مسئله به صورت دو گام جداگانه نمایش داد، یعنی:

$$a^*, b^* = \operatorname{argmax}_{a \in [0,1]} \left(\operatorname{argmax}_{b \in [0,1]} C^{NOMA} \right) \quad (32)$$

با استفاده از رابطه ضریب اختصاص توان بهینه در منبع-رله (رابطه (۱۹)) و جایگذاری آن در رابطه ضریب بهینه سمبل‌های سیگنال متعامد (رابطه (۲۹))، بهینه‌سازی توأم اختصاص توان در منبع-رله و ضریب بهینه سمبل‌های سیگنال متعامد با استفاده از الگوریتم زیر قابل استخراج است.

همچنین در شکل ۲ روندنمای الگوریتم بهینه‌سازی توأم پیشنهادی این مقاله نمایش داده شده است.

$$\frac{\partial^2 \bar{C}^{NOMA}}{\partial a^2} = \frac{\log_2 e}{2\rho b a^2} \left[\frac{2}{\beta_{SD}} \times \left\{ E_c + \ln \left(\frac{1}{b\rho a} \left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}} \right) \right) \right\} + \frac{2}{\beta_{SR}} \ln \left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}} \right) + \frac{1}{\beta_{SD}} - \frac{2}{\beta_{SR}} \left(\ln \frac{1}{\beta_{SR}} \right) \right] < 0 \quad (23)$$

اگر نامساوی رابطه (۲۳) برقرار باشد، اثبات می‌شود رابطه (۲۲) نسبت به a مقعر است. رابطه (۲۳) در صورتی برقرار است که $a > \frac{1}{b\rho} e^{E_c + \ln \left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}} \right) + \frac{\beta_{SD}}{\beta_{SR}} \ln \left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}} \right) + \frac{1}{\beta_{SD}} - \frac{\beta_{SD}}{\beta_{SR}} \ln \left(\frac{1}{\beta_{SR}} \right)}$ باشد، از آنجا ρ عددی بسیار بزرگ می‌باشد، این نامساوی برقرار است و مسئله بهینه‌سازی یک جواب بهینه کلی دارد. با معادل صفر قراردادن رابطه (۲۲)، مقدار a^2 به صورت زیر بدست می‌آید:

$$a^2 = \frac{(1-b)\beta_{RD} \ln a - (1-b)\beta_{RD} E_c - \beta_{SD}\beta_{SR} b^2 \rho}{(1-b)\beta_{RD} (\ln b\rho\beta_{SR}) + \frac{(1-b)\beta_{RD}}{\beta_{SR} b^2 \rho}} \times \left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}} \right) \ln \left(\left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}} \right)^{-1} b\rho \right) \quad (24)$$

با تغییر متغیر $\zeta \triangleq \ln a$ ، رابطه (۲۴) را می‌توان به صورت:

$$e^{2\zeta} = \frac{(1-b)\beta_{RD} \zeta - (1-b)\beta_{RD} E_c + (1-b)\beta_{RD} \left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}} \right) \times \ln \left(\left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}} \right)^{-1} b\rho \right) - (1-b)\beta_{RD} \ln(b\rho\beta_{SR})}{\beta_{SD}\beta_{SR} b^2 \rho} \quad (25)$$

بازنویسی کرد. حال با استفاده از تابع لمبرت که با تابع $W(\cdot)$ [مرجع ۱۴ رابطه (۱)] بیان می‌شود، می‌توان ζ را از رابطه (۲۵) بدین‌گونه محاسبه نمود:

$$\zeta = -\frac{1}{\rho} W(\omega) + E_c + \psi \quad (26)$$

که در آن:

$$\omega = -\frac{2b^2\beta_{SD}\beta_{SR}\rho}{(1-b)\beta_{RD}} e^{\psi E_c + 2\psi} \quad (27)$$

و

$$\psi = -\left(1 + \frac{\beta_{SD}}{\beta_{SR}} \right) \ln \left(\left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}} \right)^{-1} b\rho \right) + \frac{\beta_{SD}}{\beta_{SR}} \ln(\beta_{SR} b\rho) \quad (28)$$

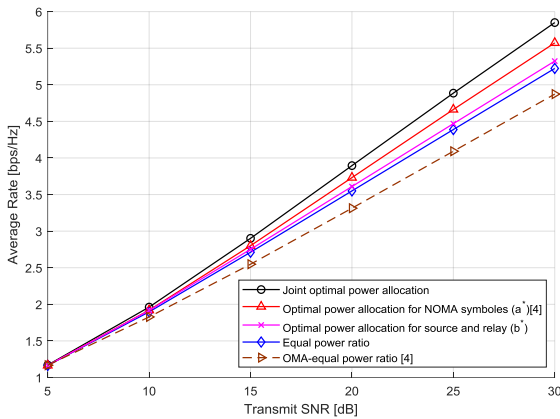
هستند. در نتیجه ضریب بهینه را می‌توان از رابطه

$$a^* = e^{(-\frac{1}{\rho}W(\omega) + E_c + \psi)} \quad (29)$$

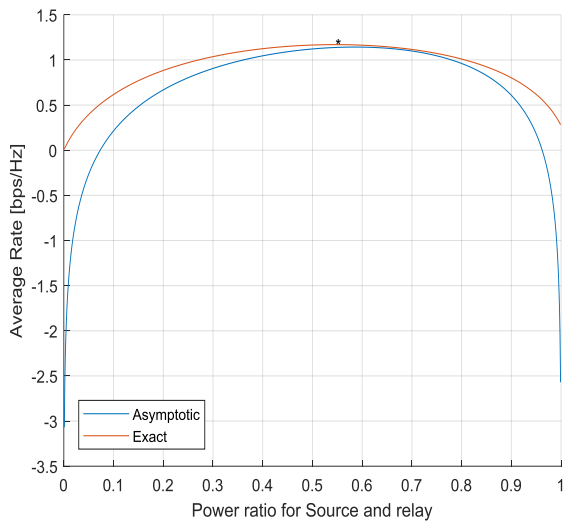
بدست آورد. از آنجا که مقدار ω در رابطه (۲۶) منفی است، از رابطه تقریب لمبرت [۱۴] می‌توان برای تقریب ζ در رابطه (۲۶) به صورت

$$W(\omega) \approx \ln(\omega) - \frac{\gamma}{\alpha} \times \left[1 - \left\{ 1 + \alpha \left(-\frac{1 + \ln(-\omega)}{\gamma} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \right\}^{-1} \right] \quad (30)$$

استفاده کرد، که در آن $\alpha = 0.3205$ است. با کمک رابطه (۳۰) و



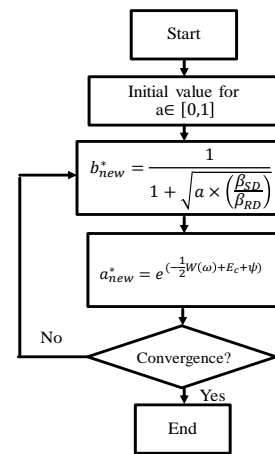
شکل ۳. متوسط نرخ دریافتی نسبت به SNR ارسالی برای چهار طرح: الف) ضریب سمبل‌های سیگنال متعادل برابر ($a = b$) ب) اختصاص توان بهینه در منبع-رله، ج) ضریب سمبل‌های سیگنال متعادل بهینه [۴] و د) بهینه‌سازی توان



شکل ۴. متوسط مجموع نرخ بر حسب ضریب اختصاص توان منبع-رله مختلف در شبکه مخابرات همکارانه NOMA با فرض سیگنال به نویز ۵ dB

بهبود تقریباً ۳ dB در مقایسه حالت الف) یعنی حالت بدون بهینه‌سازی قابل مشاهده است.

برای اینکه اثر رابطه مجانبی (رابطه (۱۴)) و رابطه دقیق (رابطه (۱۵)) متوسط نرخ را در تعیین ضریب اختصاص توان منبع-رله مقایسه کنیم، منحنی شکل (۴) را به نمایش می‌گذاریم. این شکل میزان متوسط نرخ را بر حسب ضریب اختصاص توان منبع-رله مختلف به نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود،



شکل ۲. روندنمای الگوریتم بهینه‌سازی توأم پیشنهادی

۵. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش برای تأیید روابط و الگوریتم بدست آمده در بخش قبل شبیه‌سازی‌هایی انجام شده است. با توجه به ساختار سیستم همکارانه این یک فرض معمول است که میزان بهره کانال بین منبع-رله بهتر از واریانس کانال‌های بین منبع-مقصد و رله-مقصد در نظر گرفته شود. در نتیجه در تمامی شبیه‌سازی‌ها بهره کانال بین گرہ‌ها منبع-مقصد، منبع-رله و رله-مقصد به ترتیب به صورت $\beta_{SD} = 1$, $\beta_{SR} = 10$ و $\beta_{RD} = 5$ فرض شده است.

هدف از شکل (۳) اثبات این است که در صورت بهینه‌سازی توأم ضریب سمبل‌های سیگنال متعادل و اختصاص توان در رله و مقصد، کارایی شبکه با رله همکار و استفاده از NOMA افزایش می‌یابد. در این شکل، متوسط نرخ بر اساس سیگنال به نویز ارسالی برای چهار طرح مورد بررسی قرار گرفته است: الف) ضریب سمبل‌های سیگنال متعادل برابر ($a = 1/2$) و اختصاص توان منبع-رله ($b = 1/2$)، ب) ضریب سمبل‌های سیگنال متعادل برابر ($a = 1/2$) و اختصاص توان منبع-رله بهینه ($b = b^*$)، ج) ضریب سمبل‌های سیگنال متعادل بهینه ($a = a^*$) و اختصاص توان منبع-رله بهینه برابر ($b = 1/2$) [۴] و د) اختصاص بهینه توأم ضریب سمبل‌های سیگنال متعادل و توان منبع-رله. همچنین در این شکل متوسط نرخ بر اساس سیگنال به نویز ارسالی برای سیستم در یک شبکه مخابرات همکارانه با استفاده از دسترسی چندگانه متعادل (OMA) نیز از مرجع [۴] برای مقایسه نشان داده شده است.

با توجه به شکل مشخص است که در سیگنال به نویز ۳۰ dB اختصاص توان منبع-رله بهینه و ضریب اختصاص توان سمبل‌های سیگنال متعادل برابر در حالت ب)، متوسط نرخ نزدیک به ۱ dB بهبود نسبت به حالت بدون بهینه‌سازی الف) دارد. بعلاوه، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی توأم ضریب سمبل‌های سیگنال متعادل و توان منبع-رله در حالت د)، در شکل میزان

^۱ Orthogonal Multiple Access

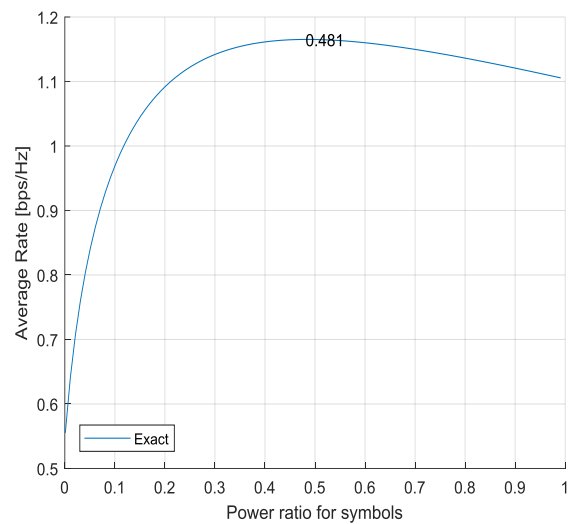
مقدار اختصاص توان بهینه محاسبه شده از رابطه تقریبی (رابطه (۱۹)) کاملاً بر مقدار بهینه رابطه دقیق (که از جستجوی سراسری بدست آمده است) انطباق دارد. همچنین از این شکل مشخص است که اختصاص توان منبع-رله به شدت بر کارایی متوسط مجموع نرخ شبکه تأثیرگذار است و هرچه قدر از مقدار اختصاص توان بهینه فاصله گرفته شود میزان متوسط نرخ کمتر می‌شود و کارایی کاهش پیدا می‌کند.

شکل (۵) میزان متوسط نرخ را به ازای ضریب سمبل‌های سیگنال متعامد مختلف نشان می‌دهد. مشابه شکل (۴)، در این شکل می‌توان تأثیر بهینه‌سازی ضریب سمبل‌های سیگنال متعامد در افزایش متوسط مجموع نرخ در شبکه مخابرات همکارانه NOMA را مشاهده نمود. در این نمودار بر خلاف شکل (۴) تنها رابطه دقیق متوسط مجموع نرخ رسم شده است، زیرا از این رابطه برای محاسبه ضریب سمبل‌های سیگنال متعامد بهینه (a^*) استفاده شده است. همان‌طور که از رابطه (۱۴) مورد انتظار بود ضریب سمبل‌های سیگنال متعامد بر کارایی شبکه NOMA به شدت تأثیرگذار است، به ویژه زمانی که مقدار ضریب بسیار کوچک $a \rightarrow 0$ در نظر گرفته شود.

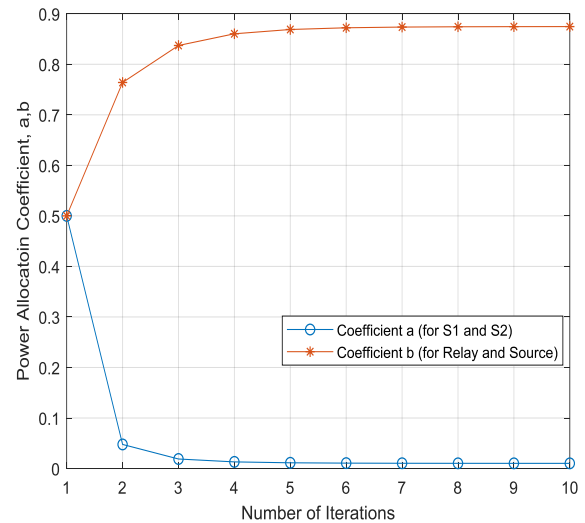
در انتها، به بررسی همگرایی الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی توأم ضریب سمبل‌های سیگنال متعامد و توان منبع-رله می‌پردازد. به عنوان مثالی از رفتار همگرایی الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، مقدار ضریب سمبل‌های سیگنال متعامد (a) و ضرایب اختصاص توان منبع-رله (b) را در هر مرحله از الگوریتم در شکل (۶) نشان دادیم. این شکل مقدار این ضرایب اختصاص توان را بر حسب تکرارهای مختلف الگوریتم نشان می‌دهد که در نهایت به مقادیر $a^* = 0.0103$ و $b^* = 0.874$ همگرا می‌شود. از شکل مشخص است که الگوریتم با تعداد تکرار معقول (تقریباً ۵ تکرار) همگرا می‌شود و ضرایب بهینه محاسبه می‌شوند، بنابراین الگوریتم پیشنهادی در این مقاله از سرعت همگرایی خوبی برخوردار است. البته می‌توان نشان داد که این سرعت همگرایی برای سایر شرایط کانال نیز برقرار است.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سیستم مخابرات همکارانه با استفاده از دسترسی چندگانه غیرمتعامد (NOMA) با رله DF در کانال‌های با محوشوندگی رای‌لی ارائه شده است. در بخش اول عملکرد متوسط مجموع نرخ (ASR) این سیستم محاسبه گردید. در بخش بعد، از آنجایی که اختصاص توان سمبل‌های سیگنال غیرمتعامد تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد سیستم NOMA می‌گذارد، طراحی بهینه ضریب سمبل‌های سیگنال متعامد بیان شد. همچنین از آنجا که کنترل توان در شبکه‌های همکارانه با رله



شکل ۵. متوسط مجموع نرخ نسبت به ضرایب سمبل‌های سیگنال متعامد مختلف در شبکه مخابرات همکارانه NOMA. با فرض سیگنال به نویز ۵ dB.



شکل ۶. همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی توأم ضریب سمبل‌های سیگنال متعامد (a) و اختصاص توان منبع-رله (b). مقادیر ضرایب اختصاص توان بهینه بر حسب تعداد تکرار الگوریتم

Computing Electronics and Control, ۱۶(۵), ۱۹۶۶-۱۹۷۳.

- [۷] Liu, H., Ding, Z., Kim, K. J., Kwak, K. S., & Poor, H. V. (۲۰۱۸). Decode-and-forward relaying for cooperative NOMA systems with direct links. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, ۱۷(۱۲), ۸۰۷۷-۸۰۹۳.
- [۸] Wang, Z., & Peng, Z. (۲۰۱۹). Secrecy performance analysis of relay selection in cooperative NOMA systems. *IEEE Access*, ۷, ۸۶۲۷۴-۸۶۲۸۷.
- [۹] Zou, D., Deng, D., Rao, Y., Li, X., & Yu, K. (۲۰۱۹). Relay selection for cooperative NOMA system over correlated fading channel. *Physical Communication*, ۳۵, ۱۰۰۷۰۲.
- [۱۰] Ghous, M., Abbas, Z. H., Abbas, G., Hassan, A. K., & Moinuddin, M. (۲۰۲۰). Transmit beamformer based performance analysis and diversity gains of cell edge user in cooperative MISO-NOMA system. *Physical Communication*, ۱۰۱۱۰۲.
- [۱۱] Xu, M., Ji, F., Wen, M., & Duan, W. (۲۰۱۶). Novel receiver design for the cooperative relaying system with non-orthogonal multiple access. *IEEE Communications Letters*, ۲۰(۸), ۱۶۷۹-۱۶۸۲.
- [۱۲] Kader, M. F., & Shin, S. Y. (۲۰۱۶). Cooperative relaying using space-time block coded non-orthogonal multiple access. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, ۶۶(۷), ۵۸۹۴-۵۹۰۳.
- [۱۳] Jeffrey, A., & Zwillinger, D. (Eds.). (۲۰۰۷). *Table of integrals, series, and products*. Elsevier.
- [۱۴] Chatzigeorgiou, I. (۲۰۱۳). Bounds on the Lambert function and their application to the outage analysis of user cooperation. *IEEE Communications Letters*, ۱۷(۸), ۱۵۰۵-۱۵۰۸.
- [۱۵] Gilbert, G. T. (۱۹۹۱). Positive definite matrices and Sylvester's criterion. *The American Mathematical Monthly*, ۹۸(۱), ۴۴-۴۶.

دارای اهمیت است، تخصصی بهی‌توان بی‌منبع و رله نیز محقق شده است. در انتها، الگوریتمی برای حل مسئله بهی‌توان سازی توأم ضربی سمبل‌های سی‌گنال متعامد و اختصاص توان منبع-رله در شبکه‌های همکارانه NOMA، به منظور تضمین عملکرد بهی‌توان و مطمئن این سیستم‌ها در عمل پی‌شهاد شده است. نتایج نشان می‌دهند که اگر اختصاص توان به سمبل‌های NOMA بهی‌توان صورت‌نگی‌رد و با اختصاص توان بی‌منبع و رله بصورت بهی‌توان در نظر گرفته نشود، عملکرد متوسط مجموع نرخ سیستم کاهش می‌یابد. همچنین نتایج شبیه‌سازی بهی‌توان سازی توأم اختصاص توان با الگوریتم پی‌شهادی، بهره ۱dB در مقایسه با حالتی که در آن تنها اختصاص توان برای سی‌گنال صورت گرفته باشد و بهره ۲dB در مقایسه با حالتی که فقط اختصاص توان برای منبع-رله انجام شده باشد، را نشان می‌دهد.

مراجع

- [۱] Amiriara, H., Zahabi, M. R., & Meghdadi, V. (۲۰۱۸, December). Joint Power and Location Optimization of Relay for Amplify-and-Forward Cooperative Relaying. In ۲۰۱۸ International Conference on Internet of Things, Embedded Systems and Communications (IINTEC) (pp. ۹۷-۱۰۲). IEEE.
- [۲] Amiriara, H., Zahabi, M. R., & Meghdadi, V. (۲۰۲۰). Joint power-location optimization in AF cooperative relay systems with Nakagami-m channel. *Physical Communication*, ۱۰۱۰۶۷.
- [۳] Seo, J. B., Jin, H., Joung, J., & Jung, B. C. (۲۰۲۰). Uplink NOMA Random Access Systems With Space-Time Line Code. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, ۶۹(۴), ۴۵۲۲-۴۵۲۶.
- [۴] Kim, J. B., & Lee, I. H. (۲۰۱۵). Capacity analysis of cooperative relaying systems using non-orthogonal multiple access. *IEEE Communications Letters*, ۱۹(۱۱), ۱۹۴۹-۱۹۵۲.
- [۵] Zeng, M., Hao, W., Dobre, O. A., & Ding, Z. (۲۰۲۰). Cooperative NOMA: State of the Art, Key Techniques, and Open Challenges. *IEEE Network*, ۳۴(۵), ۲۰۵-۲۱۱.
- [۶] Do, D. T., & Nguyen, T. T. T. (۲۰۱۸). Exact Outage Performance Analysis of Amplify-and-Forward-Aware Cooperative NOMA. *TELKOMNIKA Telecommunication*

$$\frac{\partial^2 C(a, b)}{\partial a \partial b} = -\frac{1}{\gamma \ln \gamma} \times \left(\frac{1}{b^\gamma (1-b)^\gamma \beta_{RD} \beta_{SD} \left[\frac{1}{b \beta_{SR}} + \frac{a}{(1-b) \beta_{RD}} \right]^\gamma} \right) < 0.$$

$$\frac{\partial^2 C(a, b)}{\partial b^2} = -\frac{1}{\gamma \ln \gamma} \times \left(\frac{a^\gamma \left(\frac{1}{(1-b)^\gamma \beta_{RD}} + \frac{\gamma}{b^\gamma \beta_{SR}} + \frac{\gamma a ((1-b)^\gamma + b^\gamma)}{b^\gamma (1-b)^\gamma \beta_{SR} \beta_{RD}} \right)}{\left(\frac{1}{b \beta_{SR}} + \frac{a}{(1-b) \beta_{RD}} \right)^\gamma} \right) < 0.$$

هر چهار درایه با توجه به مقادیر $a, b \in \{0, 1\}$ کاملاً منفی می‌باشند، همچنین دترمینان ماتریس H نیز که به صورت $\det[H] = \left(\frac{\partial^2 C(a, b)}{\partial a^2} \times \frac{\partial^2 C(a, b)}{\partial b^2} - \left(\frac{\partial^2 C(a, b)}{\partial a \partial b} \right)^2 \right)$ نوشته می‌شود، مقداری کاملاً منفی دارد. از آنجایی که ماتریس H یک ماتریس هرمیتی است و با توجه به معیار سیلوستر^۱ در مرجع [۱۵]، چون تمام درایه‌ها مقادیر کاملاً منفی دارند و مقدار دترمینان آن نیز منفی است، بنابراین مقادیر ویژه H نیز کوچک‌تر از صفر است و تابع نسبت به a و b مقعر است.

پیوست‌ها

اثبات مقعر بودن رابطه (۳۱):

برای بررسی مقعر بودن مسئله بهینه‌سازی، ابتدا ماتریس هسین $C(a, b)$ را بصورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 C(a, b)}{\partial a^2} & \frac{\partial^2 C(a, b)}{\partial a \partial b} \\ \frac{\partial^2 C(a, b)}{\partial a \partial b} & \frac{\partial^2 C(a, b)}{\partial b^2} \end{bmatrix}$$

درایه‌های این ماتریس عبارتند از:

$$\frac{\partial^2 C(a, b)}{\partial a^2} = \frac{\log_\gamma e}{\gamma p b a^\gamma} \left[\frac{\gamma}{\beta_{SD}} \left\{ E_c + \ln \left(\frac{1}{b p a} \left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}} \right) \right) \right\} + \frac{\gamma}{\beta_{SR}} \ln \left(\frac{1}{\beta_{SD}} + \frac{1}{\beta_{SR}} \right) + \frac{1}{\beta_{SD}} - \frac{\gamma}{\beta_{SR}} \left(\ln \frac{1}{\beta_{SR}} \right) \right] < 0.$$

^۱ Sylvester's criterion