

بهبود شاخص عدالت جین و بهینه‌سازی مصرف توان فرستنده در سیستم‌های NOMA

فرزاد دهقانی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ جعفر پوررستم^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - f.dehghani95@ms.tabrizu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - j.pourrostam@tabrizu.ac.ir

چکیده: در این مقاله روشی برای تخصیص توان سیستم‌های دسترسی چندگانه نامتعامل^۱ (NOMA) در لینک فروسو ارائه شده‌است، به گونه‌ای که عدالت بین کاربران از نظر ظرفیت هر کاربر تأمین شده و همچنین توان فرستنده نیز به صورت بهینه مصرف شود. در پژوهش‌های گذشته برای این منظور عمدتاً به تعریف مسائل بهینه‌سازی و حل آن‌ها پرداخته شده‌است و یا مانند روشی با عنوان Fair-NOMA تنها به بیشینه‌کردن ظرفیت کاربران در مقایسه با یک سیستم دسترسی چندگانه متعامل^۲ (OMA) توجه شده اما اختلاف ظرفیت کاربران و همچنین بهینه‌بودن مصرف توان فرستنده در نظر گرفته نشده است. در این مقاله یک سیستم NOMA در لینک فروسو با ۲ و بیشتر از ۲ کاربر در نظر گرفته شده‌است. در حالت ۲ کاربری با مساوی قراردادن ظرفیت کاربران، شاخص عدالت جین^۳ بیشینه و عدالت بین کاربران در مصرف توان فرستنده برقرار گشته است و مشکل اختلاف ظرفیت کاربران حل شده‌است. همچنین با شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای نشان داده می‌شود که ظرفیت کاربر با شرایط کانال ضعیف‌تر با این روش بهبود قابل قبولی می‌یابد. علاوه بر این، در سیستم NOMA با بیش از ۲ کاربر با تخصیص یک ضریب توان ثابت به کاربری که ضعیف‌ترین شرایط کانال را دارد، توان به گونه‌ای به سایر کاربران تخصیص داده می‌شود که مصرف توان فرستنده بهینه شود. شبیه‌سازی‌های مختلف برای مقایسه و نشان دادن موثر بودن ایده‌های پیشنهادی ارائه شده‌است.

واژه‌های کلیدی: دسترسی چندگانه نامتعامل، تخصیص توان، شاخص عدالت جین، ظرفیت متوسط، احتمال وقفه

Improving Jain Fairness Index and Optimizing Transmitter Power Consumption in NOMA Systems

F. Dehghani¹, MSc Student; J. Pourrostam², Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: f.dehghani95@ms.tabrizu.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: j.pourrostam@tabrizu.ac.ir

Abstract: In this paper, an approach is proposed for power allocation in Non-orthogonal multiple access (NOMA) systems in downlink to achieve user fairness from user capacity perspective and to optimize transmitter power consumption as well. In recent works, researchers have defined optimization problems and solved them, as in a method called Fair-NOMA, to maximize the capacity of each user in NOMA compared to OMA but the difference between the capacity of users and optimizing the transmitter power consumption are not considered. In this paper, a NOMA system with 2 and more than 2 users in downlink is considered. In the 2-user scenario by equating capacities of users, the Jain fairness index is maximized, fairness is achieved in transmitter power consumption and the difference between the capacities of users is eliminated. In addition, computer simulations show that the capacity of the user with weaker channel gain improves noticeably. Moreover, in a NOMA system with more than 2 users a fixed power coefficient is allocated to the user with the weakest channel condition, and power allocation to the other users is done in a way that the transmitter power consumption is optimized. Computer simulations is carried out to verify the effectiveness of the suggested methods.

Keywords: Non orthogonal multiple access (NOMA), power allocation, jain fairness index, ergodic capacity, outage probability

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۷/۲۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۸/۱/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۳/۱۲

نام نویسنده مسئول: جعفر پوررستم

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

مسئله تخصیص توان در سیستم‌های مخابرات بی‌سیم همواره مورد توجه بوده است. به‌عنوان مثال در [۱] با استفاده از تخصیص توان بهینه در ایستگاه مرکزی، سعی شده که تأخیر ارسال داده‌ها کمینه شود. همچنین در [۲] روش‌هایی برای کنترل توان در شبکه‌های مخابرات رله‌ای با چندین منبع گیرنده و فرستنده پیشنهاد شده است. در سال‌های اخیر نیز با افزایش تقاضا برای اینترنت همراه و اینترنت اشیاء^۴ (IoT)، چالش‌هایی از قبیل بازدهی طیفی بالا مطرح شده است که یکی از فناوری‌هایی که برای حل این چالش‌ها در نظر گرفته شده، NOMA است و با توجه به این‌که برخلاف OMA، در NOMA تخصیص منابع به‌صورت نامتعادل است و تسهیم کاربران در حوزه توان انجام می‌شود، مسئله تخصیص توان مهم‌تر از گذشته نیز گشته است.

در پژوهش‌های مختلف چندین روش برای تخصیص توان در سیستم‌های NOMA پیشنهاد شده‌اند که به‌طور عمده به دو گروه تخصیص توان ثابت و تخصیص توان پویا تقسیم می‌شوند [۳].

با توجه به تسهیم کاربران در حوزه توان در NOMA از کدگذاری جمع آثار^۵ (SC) در فرستنده و حذف متوالی تداخل^۶ (SIC) در گیرنده استفاده می‌شود. به روش‌های دسترسی نامتعادل با استفاده از کدگذاری جمع آثار (SC) در [۴] به‌عنوان روشی برای افزایش نرخ داده هر یک از کاربران در مقایسه با CDMA^۷ اشاره شده است. در [۵]، عملکرد سیگنال‌دهی نامتعادل با استفاده از کدگذاری جمع آثار (SC) و حذف متوالی تداخل (SIC) در سیستم‌های OFDMA^۸ بررسی شده و با استفاده از آن در [۶] نرخ داده کاربرانی که در لبه سلول قرار دارند، محاسبه شده است. همچنین الگوریتمی پیشنهاد شده که نرخ داده را افزایش داده و عدالت بین کاربران را تأمین می‌کند. در پژوهش‌هایی که اشاره شد، وجود اطلاعات دقیقی از حالت کانال در فرستنده، در نظر گرفته نشده است. باین‌وجود در [۷] برای لینک فراسو^۹ و [۸] برای لینک فرسو^{۱۰} با در نظر گرفتن اطلاعات حالت کانال در فرستنده، نشان داده شده که نرخ داده سیستم همواره بهتر از OMA است. [۹] یک مسئله بهینه‌سازی را توسعه داده که ضرایب تخصیص توان در یک سیستم NOMA^{۱۱} MIMO با یک ایستگاه پایه^{۱۲} N آنتنی و ۲ کاربر را به‌دست می‌آورد. در [۱۰] این پژوهش برای یک ایستگاه پایه با L آنتن و K زوج کاربر ($L \geq 2$)، با ایجاد یک روش شکل‌دهی پرتو^{۱۳} توسعه داده شده و راه‌حلی به شکل بسته برای محاسبه ضرایب تخصیص توان پیدا شده است. در [۱۱] ظرفیت متوسط سیستم MIMO NOMA هنگامی که فرستنده ایستگاه پایه تنها اطلاعات حالت کانال آماری را در اختیار دارد، محاسبه شده است. همچنین مشخصات ضرایب تخصیص توان به‌دست آمده و یک الگوریتم زیربهینه برای به‌دست آوردن ضرایب تخصیص توان پیشنهاد شده که ظرفیت متوسط را بیشینه می‌کند.

عدالت بین کاربران^{۱۴} در سیستم‌های NOMA در بعضی از پژوهش‌ها مورد توجه قرار گرفته است. عدالت بین کاربران در سیستم‌های OFDMA در لینک فراسو در [۱۲] بررسی شده و با

استفاده از الگوریتمی، تلاش می‌شود تا نرخ داده کل بیشینه شود. در [۱۳] از یک روش تخصیص توان برای هر زوج کاربر و برنامه‌ریز منصفانه نسبی^{۱۵} استفاده شده تا عدالت بین کاربران از نظر زمان و نرخ داده فراهم شود. [۱۴] عدالت بین کاربران را از جنبه بیشینه-کمینه^{۱۶} بررسی کرده، به این‌صورت که با تعریف دو مسئله بهینه‌سازی و حل آن‌ها سعی شده کم‌ترین نرخ داده در شبکه، بیشینه و بیش‌ترین احتمال وقفه، کمینه گردد. در [۱۵]، NOMA با ضرایب تخصیص توان ثابت (F-NOMA) و NOMA رادیوشناختی^{۱۷} (CR-NOMA) بررسی شده‌اند و نشان داده شده در F-NOMA، هرچه شرایط کانال دو کاربری که باهم جفت^{۱۸} می‌شوند، یعنی دو کاربری که با یک پرتو سرویس‌دهی می‌شوند، متفاوت‌تر باشد، عملکرد سیستم نسبت به OMA بهتر می‌شود، درحالی‌که در CR-NOMA با جفت‌کردن کاربرانی که شرایط کانال نزدیک‌تری نسبت به هم دارند، عملکرد سیستم بهبود می‌یابد. در [۱۶] دو حالت دوکاربره و چندکاربره برای یک سیستم NOMA در لینک فرسو در نظر گرفته شده و در هر حالت، ضرایب تخصیص توان به‌گونه‌ای به‌دست آمده که ظرفیت هر یک از کاربران حداقل برابر با OMA باشد و از این روش تخصیص توان با عنوان Fair-NOMA نام برده شده است. یکی از معایب روش به‌کاررفته در Fair-NOMA و همین‌طور OMA، اختلاف بین ظرفیت و احتمال وقفه کاربران و همچنین عدم استفاده بهینه از توان فرستنده است به‌طوری‌که در OMA تمام توان فرستنده به کاربران تخصیص داده می‌شود اما در این مقاله نشان داده می‌شود که با استفاده از روش پیشنهادی می‌توان با استفاده از توان بسیار کمتر فرستنده به ظرفیت مجموعی بیشتر دست یافت.

در این مقاله، در بخش ۲، یک سیستم NOMA در لینک فرسو با ۲ کاربر در نظر گرفته و به‌طور مختصر روش استفاده‌شده در Fair-NOMA شرح داده می‌شود و سپس با معرفی شاخصی با عنوان شاخص عدالت جین که بیان‌گر میزان اختلاف ظرفیت کاربران است و با برابر قراردادن ظرفیت دو کاربر این شاخص بهبود می‌یابد؛ در بخش ۳ با در نظر گرفتن یک سیستم NOMA با K کاربر که $K > 2$ است، ابتدا به‌اختصار روش مطرح‌شده در Fair-NOMA شرح داده‌شده و سپس در روش پیشنهادی یک ضریب توان ثابت برای کاربری که ضعیف‌ترین شرایط کانال را دارد (کاربر اول) در نظر گرفته می‌شود و با برابر قراردادن ظرفیت سایر کاربران، ضرایب تخصیص توان سایر کاربران به‌دست می‌آید. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و در بخش ۵ نتیجه‌گیری و بیان مزایای روش پیشنهادی نسبت به روش Fair-NOMA و همچنین OMA آمده است.

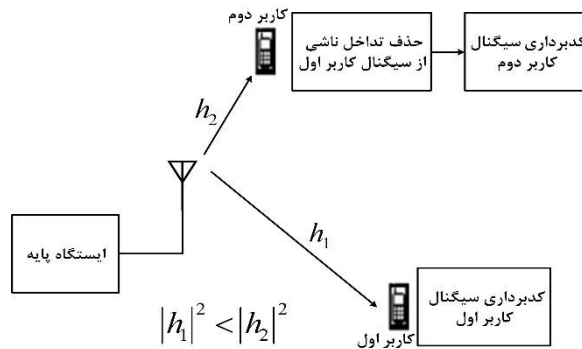
۲- سیستم NOMA با ۲ کاربر

در این بخش یک سیستم NOMA با یک ایستگاه پایه و دو کاربر در لینک فرسو مانند شکل ۱ در نظر گرفته شده است که فرستنده ایستگاه پایه و گیرنده هر یک از کاربران با یک آنتن تجهیز شده‌اند. کانال بین ایستگاه پایه و کاربران دارای فیدینگ ریلی است، در نتیجه

بهره SNR^{19} کانال دارای توزیع نمایی با تابع چگالی احتمال رابطه (۱) است.

$$f_{|h|^2}(x) = \frac{1}{\beta} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، β میانگین توزیع نمایی است.



شکل ۱: یک سیستم NOMA با یک ایستگاه پایه و ۲ کاربر در لینک فروسو

همچنین نویز گیرنده کاربران دارای توزیع نرمال مختلط به صورت رابطه (۲) است.

$$z_i \sim CN(0,1) \quad (2)$$

فرض شده است که کاربر اول دارای شرایط کانال ضعیف‌تری نسبت به کاربر دوم باشد یعنی $|h_1|^2 < |h_2|^2$ است. ضریب توان تخصیص داده شده به کاربر دوم با a نشان داده شده و با توجه به این که مجموع ضرایب توان دو کاربر برابر یک است، ضریب توان کاربر اول برابر با $1-a$ می‌شود. ایستگاه پایه، سیگنال رابطه (۳) را به صورت هم‌زمان برای هر دو کاربر ارسال می‌کند [۱۶].

$$y_i = \sqrt{(1-a)\xi} h_1 x_1 + \sqrt{a\xi} h_2 x_2 + z_i, i=1,2 \quad (3)$$

که در رابطه (۳)، ξ توان کل فرستنده ایستگاه پایه، x_1 سیگنال کاربر اول، x_2 سیگنال کاربر دوم، h_1 بهره کانال کاربر اول، h_2 بهره کانال کاربر دوم و z_1 و z_2 به ترتیب نویز گیرنده کاربر اول و دوم هستند. در گیرنده با استفاده از حذف متوالی تداخل (SIC)، سیگنال کاربران بازیابی می‌شود. همچنین فرض می‌شود که رابطه (۴) برقرار باشد.

$$E[|x_i|^2] = 1, i=1,2 \quad (4)$$

ظرفیت کاربر اول و کاربر دوم به ترتیب از روابط (۵) و (۶) به دست می‌آید [۱۶].

$$C_1^N(a) = \log_2 \left(1 + \frac{(1-a)\xi|h_1|^2}{a\xi|h_1|^2 + 1} \right) \quad (5)$$

$$C_2^N(a) = \log_2(1 + a\xi|h_2|^2) \quad (6)$$

در Fair-NOMA، نویسندگان برای به دست آوردن ضرایب تخصیص توان در این حالت (سیستم NOMA با ۲ کاربر) تنها یک روش ارائه داده‌اند، بدین ترتیب که ظرفیت هر یک از دو کاربر (روابط (۵) و (۶)) را بزرگ‌تر از ظرفیت این دو کاربر در یک سیستم OMA قرار داده و ضرایب تخصیص توان را محاسبه کرده و بازه‌ای را برای ضریب توان کاربر دوم یافته‌اند که در این بازه ظرفیت هر یک از دو کاربر بیش‌تر از ظرفیت معادل در OMA گشته است، اما این روش تخصیص توان از پایین‌تر بودن ظرفیت و بیش‌تر بودن احتمال وقفه کاربری که کانال ضعیف‌تری بین خود و فرستنده دارد، رنج می‌برد. برای بررسی میزان اختلاف ظرفیت کاربران در یک شبکه از شاخص با عنوان شاخص عدالت جین استفاده می‌شود که رابطه این شاخص به صورت رابطه (۷) است [۱۷].

$$J(c) = \frac{[\sum_{i=1}^n c_i]^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n c_i^2} \quad (7)$$

که در رابطه (۷)، c_i ها ظرفیت هر یک از کاربران و n تعداد کاربران است. مقدار شاخص عدالت جین همواره عددی بین صفر و یک است که صفر نشان‌دهنده کم‌ترین میزان عدالت و بیش‌ترین اختلاف ظرفیت‌ها و یک نشان‌دهنده بیش‌ترین میزان عدالت و کم‌ترین اختلاف ظرفیت‌ها است و در صورتی که ظرفیت کاربران برابر باشد، به دست می‌آید. برای به دست آوردن بیش‌ترین شاخص عدالت جین و حل اشکال Fair-NOMA که در بالا به آن اشاره شد، ظرفیت دو کاربر سیستم NOMA برابر قرار داده شده و ضریب تخصیص توان کاربر دوم یعنی a به دست می‌آید:

$$C_1^N(a) = C_2^N(a) \quad (8)$$

$$\Rightarrow \log_2 \left(1 + \frac{(1-a)\xi|h_1|^2}{a\xi|h_1|^2 + 1} \right) = \log_2(1 + a\xi|h_2|^2) \quad (9)$$

$$\Rightarrow a = \frac{-\frac{(|h_1|^2 + |h_2|^2)}{\xi|h_1|^2|h_2|^2} + \sqrt{\frac{(|h_1|^2 + |h_2|^2)^2}{\xi^2|h_1|^4|h_2|^4} + \frac{4}{\xi|h_2|^2}}}{2} \quad (10)$$

می‌توان نشان داد مقدار a به دست آمده در رابطه بالا همواره بین صفر و یک قرار دارد (پیوست الف).

در ادامه با توجه به ضریب تخصیص توان به دست آمده برای کاربر دوم، ظرفیت متوسط و احتمال وقفه هر یک از دو کاربر محاسبه شده است.

۲-۱- ظرفیت متوسط کاربران

با استفاده از ضریب توان به‌دست‌آمده برای کاربر دوم یعنی a در بخش ۲، ظرفیت هر دو کاربر و در نتیجه ظرفیت متوسط هر دو کاربر برابر می‌گردد. با توجه به این‌که کانال ۲ کاربر متغیرهای تصادفی مستقل با توزیع یکسان^{۲۰} (i.i.d.) هستند، تابع چگالی احتمال توأم بهره SNR دو کانال به‌صورت رابطه (۱۱) است [۱۸].

$$f_{|h_1|^2, |h_2|^2}(x_1, x_2) = \frac{2}{\beta^2} e^{-\frac{(x_1+x_2)}{\beta}} \quad (11)$$

هم‌چنین با توجه به این‌که $0 < |h_1|^2 < |h_2|^2$ مقدار $|h_1|^2$ بین صفر و $|h_2|^2$ و مقدار $|h_2|^2$ بین صفر و بی‌نهایت است.

با توجه به آن‌چه گفته شد، ظرفیت متوسط هر یک از این دو کاربر با انتگرال‌گیری از ضرب تابع چگالی احتمال توأم $|h_1|^2$ و $|h_2|^2$ در ظرفیت کاربر دوم و جایگزینی مقدار به‌دست‌آمده برای a در (۱۰)، در (۱۲) محاسبه شده‌است [۱۶].

$$\begin{aligned} E[C_1^N(a)] &= E[C_2^N(a)] \\ &= \int_0^\infty \int_0^{x_2} \frac{2}{\beta^2} e^{-\frac{(x_1+x_2)}{\beta}} \log_2(1+a\xi x_2) dx_1 dx_2 \\ &= \int_0^\infty \int_0^{x_2} \frac{2}{\beta^2} e^{-\frac{(x_1+x_2)}{\beta}} \left(-\frac{x_1+x_2}{x_1} + \sqrt{\frac{(x_1+x_2)^2}{x_1^2} + 4\xi x_2} \right) dx_1 dx_2 \end{aligned} \quad (12)$$

که به‌ازای مقادیر بالای SNR یعنی $\xi \gg 1$ ، رابطه (۱۲) را می‌توان به‌صورت رابطه (۱۳) نوشت.

$$\begin{aligned} E[C_1^{N-high-snr}(a)] &= E[C_2^{N-high-snr}(a)] \\ &= \int_0^\infty \int_0^{x_2} \frac{2}{\beta^2} e^{-\frac{(x_1+x_2)}{\beta}} \cdot \log_2(\sqrt{\xi x_2}) dx_1 dx_2 \end{aligned} \quad (13)$$

برای محاسبه انتگرال دوگانه رابطه‌های (۱۲) و (۱۳) می‌توان از نرم‌افزارهای محاسباتی مانند MATLAB استفاده کرد.

۲-۲- احتمال وقفه کاربران

احتمال این‌که سیگنال دریافتی در حدی نباشد که حداقل نرخ ارسال سیگنال (در اینجا R_0) را تأمین نماید، احتمال وقفه نامیده می‌شود. با توجه به این‌که ظرفیت هر دو کاربر برابر است، احتمال وقفه برای هر دو کاربر برابر بوده و از رابطه (۱۴) به‌دست می‌آید [۱۶].

$$p_{N,1}^{out}(a) = p_{N,2}^{out}(a) = 1 + e^{-\frac{2\alpha_2}{\beta}} - \frac{2}{\beta} \int_{\alpha_2}^\infty e^{-\frac{x+\alpha_1}{\beta}} dx \quad (14)$$

که در رابطه (۱۴)، α_1 و α_2 از روابط (۱۵) و (۱۶) به‌دست می‌آیند.

$$\alpha_1 = \frac{x(2^{R_0+2} - 4)}{4\xi x + 2^{R_0+2} - 2^{2R_0+2}} \quad (15)$$

$$\alpha_2 = \frac{2^{2R_0+2} - 4}{4\xi} \quad (16)$$

اثبات رابطه به‌دست‌آمده برای احتمال وقفه کاربران در پیوست (ب) آمده است.

۳- سیستم NOMA با چندین کاربر

در این بخش، یک سیستم NOMA در لینک فروسو با K کاربر مانند شکل ۲ در نظر گرفته شده‌است که $K > 2$ بوده و فرستنده ایستگاه پایه و گیرنده هر یک از کاربران تک‌آنتنی هستند. هم‌چنین بهره SNR کانال کاربران به‌صورت $|h_K|^2 < \dots < |h_2|^2 < |h_1|^2$ می‌باشد. در Fair-NOMA برای این حالت دو نوع روش برای تخصیص توان پیشنهاد می‌شود.

در روش اول (ضرایب توان) b_k ، فرایند تخصیص توان از کاربری که قوی‌ترین شرایط کانال را دارد آغاز شده و با بزرگ‌تر قراردادن ظرفیت این کاربر نسبت به ظرفیت معادل در OMA، ضریب تخصیص توان برای این کاربر محاسبه شده‌است و در ادامه نیز با بزرگ‌تر قراردادن ظرفیت

سایر کاربران با ظرفیت معادل در OMA، ضرایب تخصیص توان برای این کاربران نیز محاسبه می‌شود. در روش دوم (ضرایب توان a_k) فرایند تخصیص توان با کاربری که ضعیف‌ترین شرایط کانال را دارد آغاز شده و با برابر قراردادن ظرفیت این کاربر با ظرفیت معادل در OMA، ضریب تخصیص توان برای این کاربر محاسبه شده‌است و در ادامه نیز با برابر قراردادن ظرفیت سایر کاربران با ظرفیت معادل OMA، ضرایب توان سایر کاربران محاسبه شده‌است. در روش دوم در Fair-NOMA، مجموع ضرایب توان تقریباً به‌ازای همه مقادیر SNR برابر یک است اما در روش اول، مجموع ضرایب تخصیص توان بسیار کم‌تر از روش دوم بوده و به همان نسبت نیز ظرفیت متوسط کل شبکه کم‌تر است. مهم‌ترین اشکالات روش‌های Fair-NOMA در این است که بین ظرفیت متوسط کاربران اختلاف زیادی وجود دارد و هم‌چنین مجموع ضرایب تخصیص توان و در نتیجه توان مصرفی فرستنده بسیار به یک (مصرف کل توان فرستنده) نزدیک بوده و یا مجموع ضرایب تخصیص توان بسیار کم‌تر و در نتیجه ظرفیت کل شبکه نیز کم‌تر است. با توجه به آن‌چه گفته شد نیاز به روشی که در آن اختلاف ظرفیت کاربران کم‌تر باشد و توان

باید توجه کرد که با استفاده از ضرایب تخصیص توان به‌دست‌آمده در این بخش، ظرفیت همه کاربران به‌جز کاربری که قوی‌ترین شرایط کانال را دارد (کاربر k ام)، برابر می‌شود زیرا این کاربر پیش از کدبرداری سیگنال خودش، سیگنال سایر کاربران را کدبرداری کرده و از سیگنال دریافتی حذف می‌کند و تداخلی از سایر کاربران دریافت نمی‌کند و به‌این ترتیب شکل رابطه ظرفیت برای این کاربر متفاوت از شکل رابطه ظرفیت سایر کاربران است. بنابراین با توجه به آن چه در بالا گفته شد، با قرار دادن $K=2$ در این بخش نمی‌توان به نتایجی مشابه با نتایج به‌دست‌آمده در بخش ۲ دست‌یافت. همچنین همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، ضرایب تخصیص توان به‌صورت نزولی هستند، یعنی $d_1 > d_2 > \dots > d_K$ که این موضوع با توجه به برابری قرارداد ظرفیت کاربران و توجه به این نکته که با افزایش k ، بهره کانال کاربران افزایش می‌یابد و در نتیجه به توان کمتری از فرستنده نیاز است، مشخص بود. علاوه‌بر آن با دقت در رابطه‌های (۲۰) و (۲۲) و توجه به این نکته که با افزایش k ، D_{k-1} در صورت این روابط کاهش می‌یابد، نزولی بودن ضرایب تخصیص توان واضح است.

در بخش بعد نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی آمده و این نتایج با نتایج شبیه‌سازی سیستم OMA و روش Fair-NOMA از جنبه‌های گوناگون از قبیل شاخص عدالت جین، ظرفیت متوسط هر یک از کاربران، ظرفیت متوسط کل شبکه و احتمال وقفه هر یک از کاربران مقایسه شده‌است.

۴- نتایج شبیه‌سازی و مقایسه روش پیشنهادی، روش Fair-NOMA و یک سیستم OMA

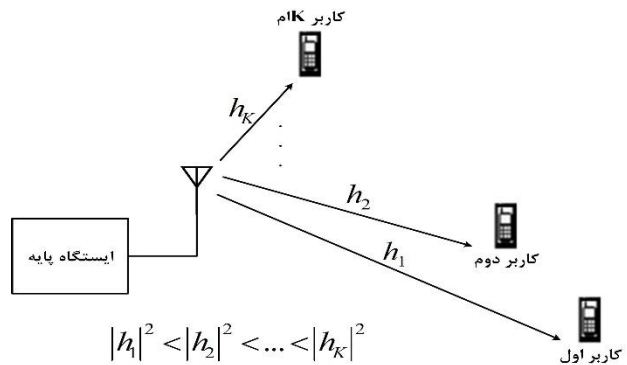
در این بخش عملکرد روش پیشنهادی در شرایطی که ۲ یا تعداد بیش‌تری کاربر در سیستم NOMA حضور دارند، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB مورد بررسی قرار گرفته و نتایج به‌دست‌آمده با روش ارائه‌شده در Fair-NOMA و همچنین سیستم OMA مقایسه می‌شود. در تمام این بخش میانگین تابع چگالی توزیع نمایی یعنی $\beta=1$ در نظر گرفته شده‌است.

۴-۱- سیستم NOMA با ۲ کاربر

در این زیربخش، با بررسی نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، روش پیشنهادی از نظر شاخص عدالت جین، ظرفیت متوسط هر کاربر، ظرفیت متوسط کل شبکه و احتمال وقفه هر کاربر با روش Fair-NOMA و سیستم OMA مقایسه می‌شود.

۴-۱-۱- مقایسه شاخص عدالت جین بین روش پیشنهادی، روش Fair-NOMA و یک سیستم OMA

شکل ۳ شاخص عدالت جین برای روش پیشنهادی، Fair-NOMA و OMA را نشان می‌دهد.



شکل ۲: یک سیستم NOMA با یک ایستگاه پایه و K کاربر در لینک فروسو

مصرفی فرستنده و در نتیجه ظرفیت کل شبکه در آن بین دو روش Fair-NOMA باشد، احساس می‌شود. در ادامه روشی برای تخصیص توان پیشنهاد می‌شود که این اهداف را برآورده می‌سازد.

مجموعه ضرایب تخصیص توان با $\{d_1, \dots, d_K\}$ نشان داده شده که d_k ضریب توان کاربر k است. برای کاربر اول (کاربر با ضعیف‌ترین شرایط کانال) ضریب توان $1/K$ در نظر گرفته شده‌است ($d_1 = 1/K$) که این ضریب توان به این دلیل انتخاب شده که با توجه به نزولی بودن ضرایب تخصیص توان برای کاربران (که در ادامه اثبات می‌شود) شرط $\sum_{k=1}^K d_k \leq 1$ همواره برقرار گردد. برای $2 \leq k \leq K-1$ قرار داده می‌شود:

$$C_k^N(d_1, \dots, d_K) = C_1^N(d_1, \dots, d_K) \quad (17)$$

و ضرایب تخصیص توان به‌دست می‌آید:

$$\Rightarrow \log_2 \left(1 + \frac{d_k \xi |h_k|^2}{1 + [(D_{k-1} - d_k) \xi |h_k|^2]} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{d_1 \xi |h_1|^2}{1 + [(1 - d_1) \xi |h_1|^2]} \right) \quad (18)$$

$$\Rightarrow d_k = \frac{d_1 |h_1|^2 [1 + (D_{k-1} \xi |h_k|^2)]}{|h_k|^2 (1 + \xi |h_1|^2)} \quad 2 \leq k \leq K \quad (19)$$

$$\Rightarrow d_k = \frac{|h_1|^2 [1 + (D_{k-1} \xi |h_k|^2)]}{K |h_k|^2 (1 + \xi |h_1|^2)} \quad 2 \leq k \leq K \quad (20)$$

که در رابطه (۲۰)، D_{k-1} مجموع ضرایب تداخل برای کاربر $k-1$ است و از رابطه (۲۱) به‌دست می‌آید.

$$D_{k-1} = 1 - \sum_{l=1}^{k-1} d_l \quad (21)$$

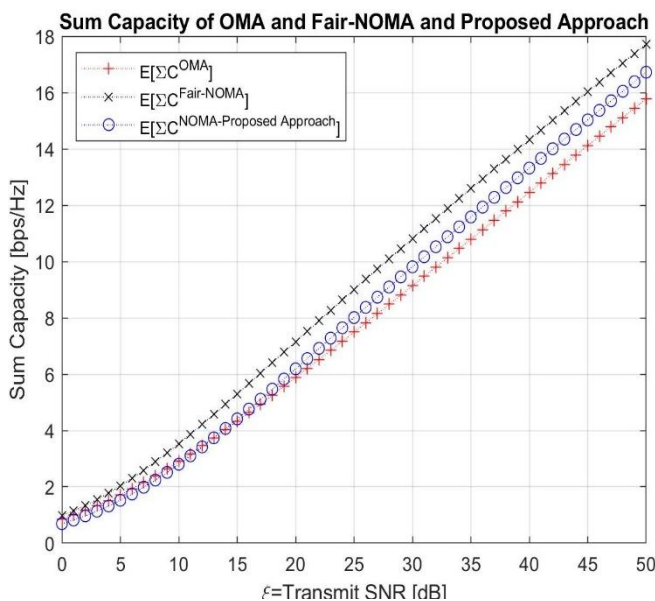
هم‌چنین برای مقادیر بالای SNR یعنی $\xi \gg 1$ ، رابطه (۲۰) را می‌توان به‌صورت رابطه (۲۲) نوشت.

$$\xi \gg 1 \Rightarrow d_k^{high-SNR} \approx \frac{D_{k-1}}{K} \quad (22)$$

برای روش پیشنهادی ظرفیت کاربر اول و دوم به‌ازای همه مقادیر SNR ارسالی برابر بوده و این ظرفیت برای کاربر اول به‌ازای همه مقادیر ξ ، بیش‌تر از ظرفیت کاربر اول در سیستم OMA است و نسبت به روش Fair-NOMA برای ξ های کم‌تر از ۳۵ dB اندکی بیش‌تر و برای سایر مقادیر ξ ، ظرفیت متوسط تقریباً برابر است. در مورد کاربر دوم، ظرفیت متوسط همواره کم‌تر از روش Fair-NOMA بوده و نسبت به سیستم OMA برای ξ های کم‌تر از ۳۵ dB، ظرفیت متوسط کاربر دوم اندکی کم‌تر و برای سایر مقادیر ξ ، ظرفیت متوسط تقریباً برابر است. همچنین از شکل ۴ مشخص است که نتایج شبیه‌سازی کاملاً بر نتایج تئوری منطبق است و درستی روابط به‌دست‌آمده را تأیید می‌کند.

۳-۱-۴- مقایسه ظرفیت متوسط کل شبکه در روش پیشنهادی، روش Fair-NOMA و یک سیستم OMA

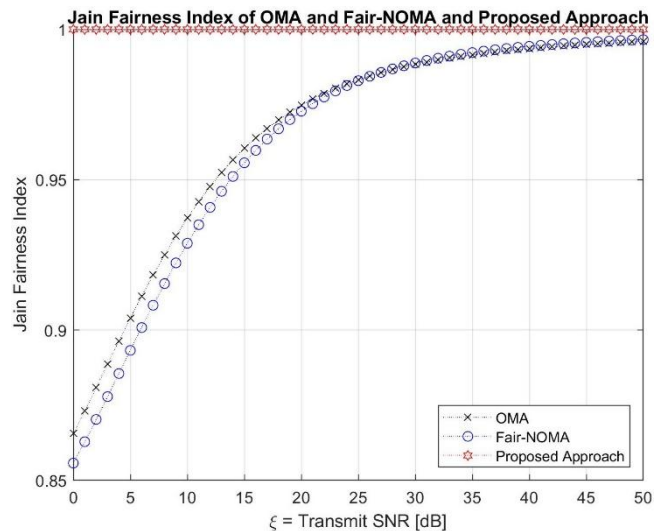
شکل ۵ ظرفیت متوسط کل شبکه در روش پیشنهادی، سیستم OMA و روش Fair-NOMA را برحسب SNR ارسالی نشان می‌دهد که ظرفیت متوسط کل شبکه در روش پیشنهادی تقریباً همواره کم‌تر از روش Fair-NOMA بوده اما در مقایسه با سیستم OMA برای SNR کم‌تر از ۱۱ dB، ظرفیت متوسط کل شبکه تقریباً برابر بوده و برای مقادیر بیش‌تر SNR، ظرفیت متوسط کل شبکه در روش پیشنهادی بیش‌تر است.



شکل ۵: ظرفیت متوسط کل شبکه در روش پیشنهادی، سیستم OMA و روش Fair-NOMA

۴-۱-۴- مقایسه احتمال وقفه هر یک از ۲ کاربر در روش پیشنهادی، روش Fair-NOMA و یک سیستم OMA

شکل ۶ شبیه‌سازی احتمال وقفه هر یک از کاربران را برحسب SNR ارسالی برای روش پیشنهادی، سیستم OMA و روش Fair-NOMA نشان می‌دهد.

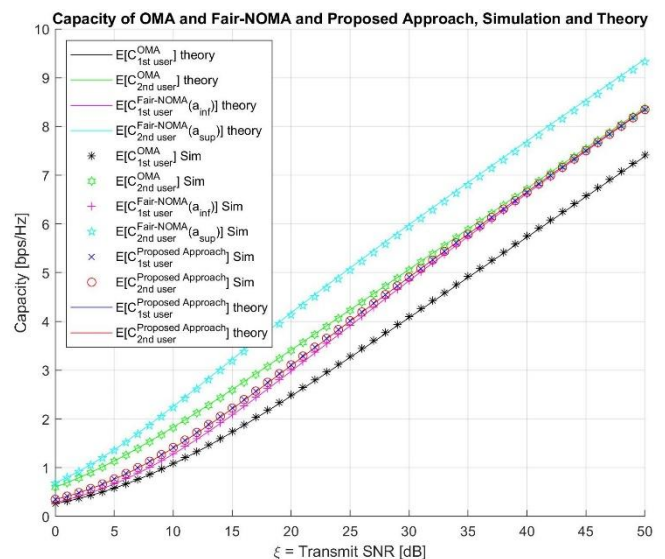


شکل ۳: شاخص عدالت جین برای روش پیشنهادی، سیستم OMA و روش Fair-NOMA

برای محاسبه شاخص عدالت جین در این شکل، از رابطه (۷) و ظرفیت متوسط هر یک از دو کاربر در رابطه (۱۲) استفاده شده‌است. همان‌طور که از قبل نیز مشخص بود، با توجه به برابری ظرفیت هر دو کاربر برای تمام مقادیر توان فرستنده، شاخص عدالت جین برای روش پیشنهادی همواره یک بوده که از مقدار این شاخص برای روش Fair-NOMA و سیستم OMA به‌خصوص برای مقادیر SNR کم‌تر از ۲۰ dB بیش‌تر است.

۴-۱-۲- مقایسه ظرفیت متوسط هر یک از ۲ کاربر در روش پیشنهادی، روش Fair-NOMA و یک سیستم OMA

شکل ۴ ظرفیت متوسط هر کاربر را در روش پیشنهادی، سیستم OMA و روش Fair-NOMA نشان می‌دهد.

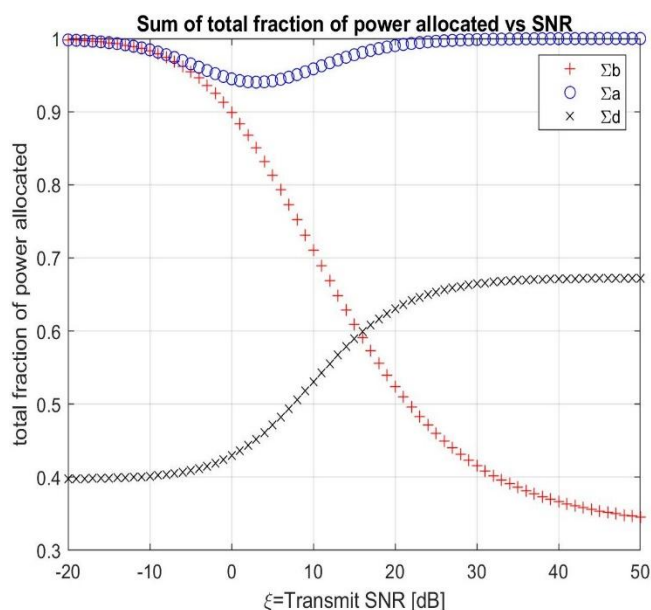


شکل ۴: ظرفیت متوسط هر یک از دو کاربر در روش پیشنهادی، سیستم OMA و روش Fair-NOMA

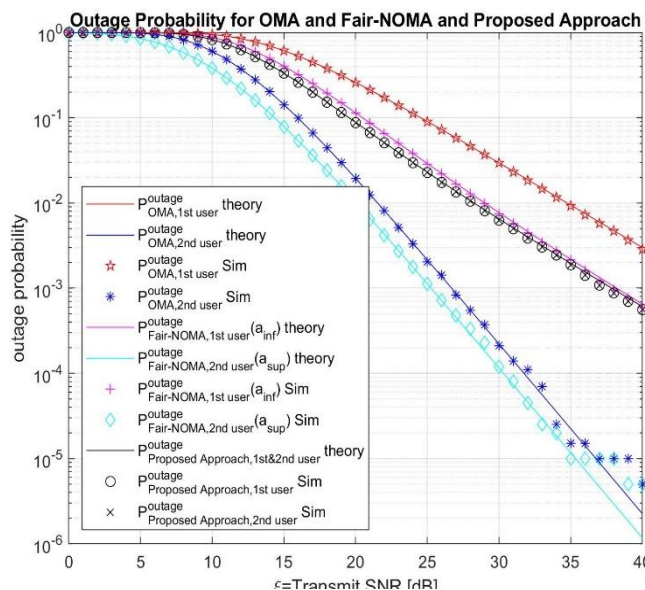
روش Fair-NOMA است. علاوه بر آن، مجموع ضرایب تخصیص توان (توان مصرفی فرستنده) در روش پیشنهادی برای مقادیر SNR کمتر از ۱۵ dB، کمتر و برای مقادیر بیش‌تر SNR، بیش‌تر از مجموع ضرایب تخصیص توان b در روش Fair-NOMA است. هم‌چنین در سیستم OMA، همواره تمام توان فرستنده به کاربران اختصاص می‌یابد که بدین‌ترتیب تمام توان مصرفی فرستنده در OMA بسیار بیش‌تر از روش پیشنهادی است.

۴-۲-۲- مقایسه ظرفیت متوسط کل شبکه در روش پیشنهادی، روش Fair-NOMA و یک سیستم OMA

شکل ۸، ظرفیت متوسط کل شبکه در روش پیشنهادی، سیستم OMA و روش Fair-NOMA را نشان می‌دهد. ظرفیت متوسط کل شبکه برای مقادیر SNR بیش‌تر از ۱۲ dB، بیش‌تر از ظرفیت متوسط کل شبکه در روش Fair-NOMA با ضرایب تخصیص توان b و سیستم OMA می‌باشد که با توجه به تخصیص کل توان فرستنده به کاربران در سیستم OMA، در روش پیشنهادی می‌توان با توان بسیار کمتر فرستنده به ظرفیت متوسط کل بیش‌تری دست یافت.



شکل ۷: مجموع ضرایب تخصیص توان (توان مصرفی فرستنده) در روش پیشنهادی و روش Fair-NOMA



شکل ۶: احتمال وقفه هر یک از کاربران در روش پیشنهادی، سیستم OMA و روش Fair-NOMA

در این شبیه‌سازی، برای محاسبه احتمال وقفه هر یک از کاربران در $R_0 = 2$ bps/Hz نظر گرفته شده است.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، احتمال وقفه هر دو کاربر با توجه به برابری ظرفیت‌های متوسط، برابر است. هم‌چنین از شکل ۶ مشخص است که احتمال وقفه کاربر اول در روش پیشنهادی کمتر از سیستم OMA و روش Fair-NOMA بوده اما احتمال وقفه کاربر دوم نسبت به سیستم OMA و روش Fair-NOMA بیش‌تر است که در نتیجه اختلاف بین احتمال وقفه کاربران جبران شده و احتمال وقفه برای کاربری که شرایط ضعیف‌تر کانال را دارد به میزان قابل‌توجهی کاهش یافته است. هم‌چنین نتایج شبیه‌سازی کاملاً بر نتایج تئوری منطبق بوده و درستی روابط به‌دست‌آمده را تأیید می‌کند.

۴-۲-۲- سیستم NOMA با چندین کاربر

در اینجا یک سیستم NOMA در لینک فروسو با ۵ کاربر ($K=5$) در نظر گرفته شده و با شبیه‌سازی رایانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، روش پیشنهادی در بخش ۳ با روش Fair-NOMA و سیستم OMA از نظر مجموع ضرایب تخصیص توان (توان مصرفی فرستنده) و ظرفیت متوسط کل شبکه، مقایسه می‌شود.

۴-۲-۱- مقایسه مجموع ضرایب تخصیص توان (توان مصرفی فرستنده) در روش پیشنهادی، روش Fair-NOMA و یک سیستم OMA

شکل ۷، مجموع ضرایب تخصیص توان (توان مصرفی فرستنده) در روش پیشنهادی (ضرایب d) و روش Fair-NOMA (ضرایب a و b) را برحسب مقادیر مختلف SNR نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷، مجموع ضرایب تخصیص توان (توان مصرفی فرستنده) در روش پیشنهادی همواره بسیار کمتر از مجموع ضرایب تخصیص توان a در

هم‌چنین در شرایطی که بیش از ۲ کاربر در شبکه حضور داشته‌باشند، موارد زیر را به‌عنوان مزایای روش پیشنهادی می‌توان نام برد:

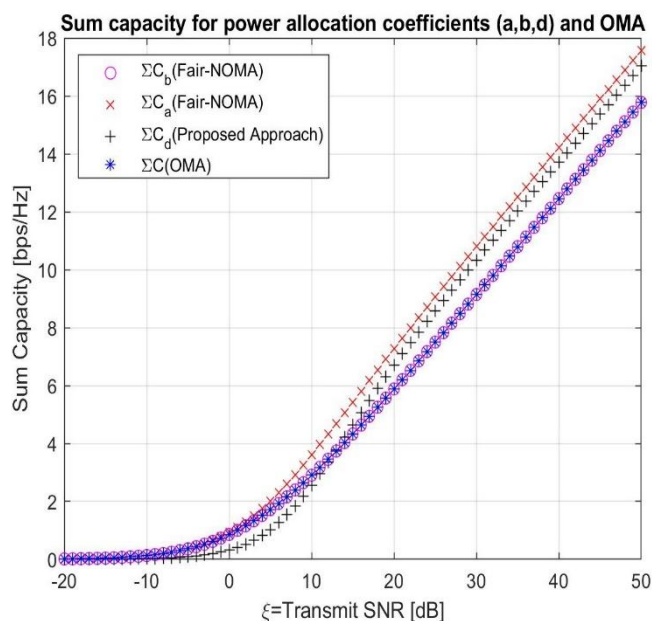
- تساوی ظرفیت متوسط همه کاربران به‌جز کاربری که قوی‌تری شرایط کانال را دارد و در نتیجه برقراری عدالت بین این کاربران.
- افزایش ظرفیت متوسط کل شبکه نسبت به OMA با مصرف بسیار کم‌تر توان فرستنده (در OMA تمام توان فرستنده به کاربران تخصیص داده می‌شود).
- بهینه‌سازی مصرف توان فرستنده نسبت به روش Fair-NOMA به این‌صورت که مجموع ضرایب تخصیص توان و ظرفیت متوسط کل شبکه در روش پیشنهادی، به‌ترتیب بین مجموع ضرایب تخصیص توان و ظرفیت متوسط کل شبکه روش‌های Fair-NOMA قرار می‌گیرند و بدین‌ترتیب تعادل مناسبی بین توان مصرفی فرستنده و ظرفیت متوسط کل شبکه برقرار می‌گردد.

در اینجا متذکر می‌شود که در روش Fair-NOMA با مقایسه ظرفیت کاربران در NOMA با ظرفیت معادل آن کاربران در OMA، ضرایب تخصیص توان محاسبه شده‌است اما در روش پیشنهادی در این مقاله، ضرایب تخصیص توان با مقایسه و برابر قراردادن ظرفیت کاربران در NOMA باهم، ضرایب تخصیص توان محاسبه می‌شود.

در انتها اشاره می‌شود که برای پژوهش‌های آتی می‌توان درحالی‌که $K > 2$ کاربر در شبکه حضور دارند، به‌جای در نظر گرفتن ضریب توان $1/K$ برای کاربر اول (کاربری که ضعیف‌ترین شرایط کانال را دارد)، ضریب توان این کاربر را به‌صورت α/K در نظر گرفته و مقدار بهینه α را که ظرفیت متوسط کل شبکه را بیشینه می‌کند، محاسبه کرد.

مراجع

- [۱] محمد لاری، «تخصیص منابع جهت کمینه‌سازی تأخیر ارسال در سامانه‌های مخابراتی تغذیه شونده به‌صورت بی‌سیم»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۳، صفحات ۱۲۰۵-۱۲۱۲، پاییز ۱۳۹۶.
- [۲] عزیزالله بهمنی و مهرزاد بیغش، «کنترل توان توأمان در شبکه مخابرات رله‌ای با چندین منبع فرستنده و گیرنده، به روش تقویت و ارسال و با در نظر گرفتن مسیر مستقیم»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۸، شماره ۳، صفحات ۱۰۱۱-۱۰۲۴، پاییز ۱۳۹۷.
- [3] F. Liu, P. Mähönen, and M. Petrova, "Proportional fairness-based power allocation and user set selection for downlink NOMA systems," in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1-6, 2016.



شکل ۸: ظرفیت متوسط کل شبکه در روش پیشنهادی، سیستم OMA و روش Fair-NOMA

هم‌چنین ظرفیت متوسط کل شبکه در روش پیشنهادی همواره مقدار اندکی از ظرفیت متوسط کل شبکه در روش Fair-NOMA با ضرایب تخصیص توان a کمتر است که با توجه به این که مجموع ضرایب تخصیص توان در روش پیشنهادی بسیار کم‌تر از مجموع ضرایب تخصیص توان a می‌باشد، عملکرد مطلوبی است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با در نظر گرفتن یک سیستم NOMA در لینک فروسو، دو حالت مختلف در نظر گرفته می‌شود. در حالت اول ۲ کاربر و در حالت دوم بیش‌تر از ۲ کاربر در شبکه حضور دارند. برای حالتی که ۲ کاربر در شبکه حضور دارند، در بخش ۴ روش پیشنهادی، روش Fair-NOMA و OMA از نظر شاخص عدالت جین، ظرفیت متوسط هر کاربر، احتمال وقفه هر کاربر و ظرفیت متوسط کل شبکه مقایسه شدند که مزایای عمده روش پیشنهادی در ادامه به‌طور خلاصه ذکر می‌شود:

- بهبود شاخص عدالت جین نسبت به روش Fair-NOMA و OMA
- افزایش ظرفیت متوسط کاربر با شرایط ضعیف‌تر کانال نسبت به روش Fair-NOMA و OMA
- کاهش احتمال وقفه کاربر با شرایط ضعیف‌تر کانال نسبت به روش Fair-NOMA و OMA
- افزایش ظرفیت متوسط کل شبکه نسبت به OMA

پیوست‌ها

پیوست (الف)

$$a = \frac{-\frac{(|h_1|^2 + |h_2|^2)}{\xi|h_1|^2|h_2|^2} + \sqrt{\frac{(|h_1|^2 + |h_2|^2)^2}{\xi^2|h_1|^4|h_2|^4} + \frac{4}{\xi|h_2|^2}}}{2} \quad (23)$$

$$0 < a < 1 \quad (24)$$

از روابط (۲۳) و (۲۴) نتیجه گرفته می‌شود:

$$\frac{-\frac{(|h_1|^2 + |h_2|^2)}{\xi|h_1|^2|h_2|^2} + \sqrt{\frac{(|h_1|^2 + |h_2|^2)^2}{\xi^2|h_1|^4|h_2|^4} + \frac{4}{\xi|h_2|^2}}}{2} > 0 \quad (25)$$

$$\Rightarrow \frac{4}{\xi|h_2|^2} > 0 \quad (26)$$

$$\frac{-\frac{(|h_1|^2 + |h_2|^2)}{\xi|h_1|^2|h_2|^2} + \sqrt{\frac{(|h_1|^2 + |h_2|^2)^2}{\xi^2|h_1|^4|h_2|^4} + \frac{4}{\xi|h_2|^2}}}{2} < 1 \quad (27)$$

$$\Rightarrow \xi|h_1|^2 > -1 \quad (28)$$

که هر دو رابطه (۲۵) و (۲۷) به ازای $\xi > 0$ همواره برقرارند. در نتیجه ثابت می‌شود که همیشه $0 < a < 1$ است.

پیوست (ب)

$$p_{N,1}^{out}(a) = p_{N,2}^{out}(a) \quad (29)$$

$$\Rightarrow \Pr\{\log_2(1 + a\xi|h_2|^2) < R_0\} =$$

$$\Pr\{|h_1|^2 < \frac{(2^{R_0+2} - 4)|h_2|^2}{4\xi|h_2|^2 + 2^{R_0+2} - 2^{2R_0+2}}\} \quad (30)$$

باتوجه به این که $|h_1|^2 < |h_2|^2$ است، دو حالت برای $|h_2|^2$ وجود دارد [۱۶]:

$$|h_2|^2 > \frac{(2^{R_0+2} - 4)|h_2|^2}{4\xi|h_2|^2 + 2^{R_0+2} - 2^{2R_0+2}} = \alpha_1 \quad (31)$$

$$|h_2|^2 < \frac{(2^{R_0+2} - 4)|h_2|^2}{4\xi|h_2|^2 + 2^{R_0+2} - 2^{2R_0+2}} = \alpha_1 \quad (32)$$

با حل روابط (۳۱) و (۳۲) برحسب $|h_2|^2$ ، روابط (۳۳) و (۳۴) به دست می‌آیند.

- [4] P. Wang, J. Xiao, and P. L., "Comparison of orthogonal and non-orthogonal approaches to future wireless cellular systems," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 1, no. 3, pp. 4-11, 2006.
- [5] J. Schaefferle and A. Rügge, "Enhancement of throughput and fairness in 4G wireless access systems by non-orthogonal signaling," *Bell Labs Technical Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 59-77, 2009.
- [6] J. Schaefferle, "Throughput of a wireless cell using superposition based multiple-access with optimized scheduling," in *21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 212-217, 2010.
- [7] T. Takeda and K. Higuchi, "Enhanced User Fairness Using Non-Orthogonal Access with SIC in Cellular Uplink," in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, pp. 1-5, 2011.
- [8] S. Tomida and K. Higuchi, "Non-orthogonal access with SIC in cellular downlink for user fairness enhancement," in *International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS)*, pp. 1-6, 2011.
- [9] B. Kimy, S. Lim, H. Kim, S. Suh, J. Kwun, S. Choi, C. Lee, S. Lee, and D. Hong, "Non-orthogonal Multiple Access in a Downlink Multiuser Beamforming System," in *IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, pp. 1278-1283, 2013.
- [10] J. Choi, "Minimum Power Multicast Beamforming With Superposition Coding for Multiresolution Broadcast and Application to NOMA Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 3, pp. 791-800, 2015.
- [11] Q. Sun, S. Han, I. C. L., and Z. Pan, "On the Ergodic Capacity of MIMO NOMA Systems," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 405-408, 2015.
- [12] M. Al-Imari, P. Xiao, M. A. Imran, and R. Tafazolli, "Uplink non-orthogonal multiple access for 5G wireless networks," in *11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS)*, pp. 781-785, 2014.
- [13] F. Liu, P. Mähönen, and M. Petrova, "Proportional fairness-based user pairing and power allocation for non-orthogonal multiple access," in *IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1127-1131, 2015.
- [14] S. Timotheou and I. Krikidis, "Fairness for Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 22, no. 10, pp. 1647-1651, 2015.
- [15] Z. Ding, P. Fan, and H. V. Poor, "Impact of User Pairing on 5G Nonorthogonal Multiple-Access Downlink Transmissions," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 8, pp. 6010-6023, 2016.
- [16] J. A. Oviedo and H. R. Sadjadpour, "A Fair Power Allocation Approach to NOMA in Multiuser SISO Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 9, pp. 7974-7985, 2017.
- [17] M. Köppen, K. Ohnishi, and M. Tsuru, "Multi-Jain Fairness Index of Per-Entity Allocation Features for Fair and Efficient Allocation of Network Resources," in *5th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems*, pp. 841-846, 2013.
- [18] J. A. Oviedo and H. R. Sadjadpour, "A new NOMA approach for fair power allocation," in *IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pp. 843-847, 2013.

$$\Pr\{|h_1|^2 < |h_2|^2, |h_2|^2 < \alpha_2\} = \int_0^{\alpha_2} \int_0^{x_2} \frac{2}{\beta^2} e^{-\frac{x_1+x_2}{\beta}} dx_1 dx_2 \quad (37)$$

$$= 1 + e^{-\frac{2\alpha_2}{\beta}} - 2e^{-\frac{\alpha_2}{\beta}}$$

هم‌چنین احتمال دوم در رابطه (۳۶) از رابطه (۳۸) محاسبه می‌شود.

$$\Pr\{|h_1|^2 < \alpha_1, |h_2|^2 > \alpha_2\} = \int_{\alpha_2}^{\infty} \int_0^{\alpha_1} \frac{2}{\beta^2} e^{-\frac{x_1+x_2}{\beta}} dx_1 dx_2 \quad (38)$$

$$= 2e^{-\frac{\alpha_2}{\beta}} - \frac{2}{\beta} \int_{\alpha_2}^{\infty} e^{-\frac{x_2+\alpha_1}{\beta}} dx_2$$

با ترکیب دو رابطه (۳۷) و (۳۸)، احتمال وقفه از رابطه (۳۹) به‌دست می‌آید.

$$p_{N,1}^{out}(a) = p_{N,2}^{out}(a) = 1 + e^{-\frac{2\alpha_2}{\beta}} - \frac{2}{\beta} \int_{\alpha_2}^{\infty} e^{-\frac{x_2+\alpha_1}{\beta}} dx_2 \quad (39)$$

$$|h_2|^2 > \frac{2^{2R_0+2} - 4}{4\xi} = \alpha_2 \quad (33)$$

$$|h_2|^2 < \frac{2^{2R_0+2} - 4}{4\xi} = \alpha_2 \quad (34)$$

می‌توان پیشامد رابطه (۳۰) را به‌صورت رابطه (۳۵) نوشت [۱۶].

$$\begin{aligned} \{|h_1|^2 < \alpha_1\} &= \{|h_1|^2 < |h_2|^2, |h_2|^2 < \alpha_2\} \cup \\ &\{|h_1|^2 < \alpha_1, |h_2|^2 > \alpha_2\} \end{aligned} \quad (35)$$

هم‌چنین احتمال رابطه (۳۰) را می‌توان به‌صورت رابطه (۳۶) نوشت [۱۶].

$$\begin{aligned} \Pr\{|h_1|^2 < \alpha_1\} &= \Pr\{|h_1|^2 < |h_2|^2, |h_2|^2 < \alpha_2\} \\ &+ \Pr\{|h_1|^2 < \alpha_1, |h_2|^2 > \alpha_2\} \end{aligned} \quad (36)$$

احتمال اول در رابطه (۳۶) از رابطه (۳۷) محاسبه می‌شود.

زیرنویس‌ها:

- ¹ Non-Orthogonal Multiple Access
- ² Orthogonal Multiple Access
- ³ Jain Fairness Index
- ⁴ Internet of Things
- ⁵ Superposition Coding
- ⁶ Successive Interference Cancellation
- ⁷ Code Division Multiple Access
- ⁸ Orthogonal Frequency Division Multiple Access
- ⁹ Uplink
- ¹⁰ Downlink
- ¹¹ Multiple Input Multiple Output
- ¹² Base Station
- ¹³ Beamforming
- ¹⁴ User Fairness
- ¹⁵ Proportional Fair Scheduler
- ¹⁶ Max-Min
- ¹⁷ Cognitive Radio NOMA
- ¹⁸ Pair
- ¹⁹ Signal to Noise Ratio
- ²⁰ Independent and identically distributed