

شکل‌دهی پرتو و تسهیم توان در سیستم‌های نسل پنجم مشارکتی مبتنی بر NOMA، SWIPT و برداشت انرژی خورشیدی

حامد زائری^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ محسن حجازی^۲، استادیار؛ محمدرضا ذوقی^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران - hamedz2020@yahoo.com

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران - hejazi.mohsen@kashanu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران - zoghi@kashanu.ac.ir

چکیده: در شبکه‌های بی‌سیم نسل پنجم (5G)، به منظور بهبود بازدهی طیفی و پایداری ارتباط می‌توان به ترتیب از روش‌های دسترسی چندگانه غیرمتعامد (NOMA) و انتقال همزمان داده و توان بی‌سیم (SWIPT) استفاده نمود. در این مقاله، یک پروتکل SWIPT NOMA مشارکتی در حالت چند آنتنی MISO فرسوده مورد بررسی قرار گرفته است که در آن یک کاربر با شرایط کانال قوی (کاربر دوم) به عنوان رله برداشت‌کننده انرژی با یک کاربر با شرایط کانال ضعیف‌تر (کاربر اول) مشارکت می‌نماید. همچنین برای بهبود عملکرد، غیر از برداشت انرژی از سیگنال‌های رادیویی، برداشت انرژی خورشیدی نیز در کاربر دوم در نظر گرفته شده است. در ادامه، یک طراحی بهینه‌سازی روی ضریب تسهیم توان در رله و بردار شکل‌دهی پرتو در فرستنده به منظور بیشینه کردن نرخ داده کاربر دوم و رفع نیازهای کیفیت سرویس (QoS) کاربر اول انجام شده است. پس از فرمول‌بندی مسأله بهینه‌سازی، عملکرد سیستم از نظر نرخ مجموع و احتمال امکان‌پذیری بهینه‌سازی به ازای سطوح مختلفی از سطح توان برداشت شده از خورشید، شبیه‌سازی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، می‌توان گفت برداشت انرژی خورشید، بخصوص در SNRهای پایین، بهبود قابل توجهی را برای روش SWIPT NOMA مشارکتی از نظر نرخ مجموع و احتمال قطعی به همراه دارد.

واژه‌های کلیدی: دسترسی چندگانه غیرمتعامد، ارسال همزمان داده و توان بی‌سیم، بهینه‌سازی گذردهی، شکل‌دهی پرتو، مخابرات مشارکتی.

Beamforming and Power Splitting in Cooperative 5G systems based on SWIPT, NOMA, and Sun Energy Harvesting

H. Zaeri¹, MSc Student; M. Hejazi², Assistant Professor; M. R. Zoghi³, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, Email: hamedz2020@yahoo.com

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, Email: hejazi.mohsen@kashanu.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, Email: zoghi@kashanu.ac.ir

Abstract: In 5G wireless communication networks, the non-orthogonal multiple access (NOMA) and the simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) methods can be exploited to improve the spectral efficiency and link reliability, respectively. This paper focuses on a cooperative SWIPT NOMA protocol in MISO downlink case, where a user with strong channel conditions, i.e. user 2 (U2), acts as an energy harvesting (EH) relay to assist a user with poor channel conditions, i.e. user 1 (U1). Furthermore, U2 exploits sun energy harvesting, along with the RF signal energy harvesting through SWIPT, to improve the system performance. A jointly optimizing design is performed on the power splitting (PS) ratio of the relay and beamforming vector of the transmitter to maximize the data rate of U2 subject to satisfying the QoS requirement of U1. We have formulated the optimization problem and evaluated the system performance for different values of harvested sun powers. Our results show that exploiting the solar energy harvesting provides a considerable improvement for the cooperative SWIPT NOMA method in terms of system sum rate and feasible probability of the optimization, especially at low SNR regimes.

Keywords: Non-orthogonal multiple access (NOMA), Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT), Throughput optimization, Beamforming, Cooperative communications.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۰۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۲۴

نام نویسنده مسئول: محسن حجازی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کاشان - بلوار قطب راوندی - دانشگاه کاشان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

ارزیابی آن پرداخته‌ایم. به طور مشخص، ترکیب روش‌های NOMA و شکل‌دهی پرتو به کمک آنتن‌های چندگانه در BS به منظور بهبود بازدهی طیفی، استفاده از مشارکت کاربران به منظور بهبود عملکرد کاربران در مرز سلول و استفاده از برداشت انرژی از طریق SWIPT و تابش خورشید به منظور بهبود بازدهی انرژی، در نظر گرفته شده است. با طراحی مسأله بهینه‌سازی و ارائه روش حل آن، ضریب تسهیم توان بهینه در رله و همچنین بردار شکل‌دهی پرتو بهینه در فرستنده تعیین می‌گردد. هدف از بهینه‌سازی صورت گرفته، بیشینه کردن نرخ داده کاربر دوم و رفع نیازهای کیفیت سرویس (QoS) کاربر اول است. ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی با معیارهای نرخ مجموع کاربران و احتمال امکان‌پذیری بهینه‌سازی^{۱۳} (معادل احتمال عدم قطعی کاربران)، به کمک نتایج عددی و شبیه‌سازی، صورت گرفته است.

در ادامه این مقاله در بخش ۲، مدل سیستم بر اساس پروتکل SWIPT NOMA مشارکتی در [۱۳] معرفی شده و همچنین روش پیشنهادی ارائه شده است. بخش‌های ۳ و ۴ به بیان مسأله بهینه‌سازی و ارائه راه حل آن می‌پردازد. در بخش ۵، نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد آمده است. در نهایت بخش ۶ به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲- مدل سیستم

یک سیستم ارسال مشارکتی MISO فرسو بر اساس شکل ۱ در نظر گرفته شده است [۱۳]. BS دارای N_t آنتن و کاربران تک آنتنی هستند. کاربران به طور تصادفی در ناحیه مورد نظر قرار می‌گیرند. دو مرحله در ارسال SWIPT NOMA مشارکتی وجود دارد. در مرحله اول یا مرحله ارسال مستقیم، BS به ارسال سیگنال می‌پردازد. کاربر ۱ (کاربر ضعیف‌تر از نظر شرایط کانال) سیگنال را به طور مستقیم دریافت می‌کند. کاربر ۲ (کاربر قوی‌تر از نظر شرایط کانال)، از SWIPT کمک می‌گیرد، به این صورت که سیگنال دریافتی این کاربر به دو بخش تقسیم می‌شود: یک بخش برای کدبرداری اطلاعات و بخش دیگر برای برداشت انرژی. سپس در مرحله دوم یا مرحله ارسال مشارکتی، کاربر ۲ پیام بازیابی شده را توسط انرژی برداشت شده در مرحله اول برای کاربر ۱ ارسال می‌کند. در نهایت، کاربر ۱، سیگنال‌های دریافتی در مراحل اول و دوم را با روش ترکیب بیشترین نسبت^{۱۴} (MRC) ترکیب و سپس کدبرداری می‌کند. جزئیات مراحل ذکر شده در ادامه بیان می‌شود.

۲-۱- مرحله ارسال مستقیم

در این مرحله، BS سیگنال ارسالی را به صورت $X = w_1 x_1 + w_2 x_2$ تولید کرده و برای کاربران ۱ و ۲ می‌فرستد، که در آن $x_1, x_2 \in \mathbb{C}$ به ترتیب پیام‌های مستقل و با توزیع یکسان (i.i.d.) مربوط به کاربر ۱ و ۲ است. توان سمبل‌های ارسالی به صورت $E|x_1|^2 = E|x_2|^2 = 1$ نرمالیزه شده است. بردارهای $w_1, w_2 \in \mathbb{C}^{N_t}$ بردارهای ضرایب شکل‌دهی پرتو ارسالی مربوط به هر پیام هستند که باید قید توان

در سال‌های اخیر روش دسترسی چندگانه غیرمتعامد^۱ (NOMA) به عنوان یک روش توانمند برای افزایش بازدهی طیفی^۲ (SE) در نسل پنجم و همچنین برای پشتیبانی از ارتباطات حجیم در اینترنت اشیا^۳ (IoT) معرفی شده است [۱]. ایده کلیدی در NOMA، دسترسی چندگانه در حوزه توان است که در آن با سرویس‌دهی چند کاربر در یک بلوک مشابه فرکانسی، زمانی یا کد، می‌تواند بازدهی طیفی سیستم را بهبود دهد. با اعمال این روش و روش حذف تداخل پی‌درپی^۴ (SIC) در گیرنده طرح NOMA عملکرد سیستمی بهتر از روش دسترسی چندگانه متعامد^۵ (OMA) خواهد داشت [۲-۴]. ترکیب NOMA و MIMO^۶ منجر به بهبود قابل توجه در بازدهی طیفی و نرخ کاربران می‌گردد. در تحقیقات قبلی، عملکرد حالت MISO^۷-NOMA از نظر میزان بهبود نرخ مورد بررسی قرار گرفته است [۵-۷]. طرح‌های NOMA مشارکتی به کمک رله، شامل کاربران در مرکز سلول با شرایط کانالی قوی و یا رله اختصاصی، به منظور کاهش احتمال قطعی^۸ در کاربران مرز سلول و همچنین پیشنهاد ساختار گیرنده عملی در [۸] بررسی شده است. علاوه بر نیاز به بازدهی طیفی بالا، بازدهی انرژی^۹ (EE) نیز یک شاخص کلیدی عملکرد در 5G است که می‌تواند باعث مصرف انرژی کمتر بخصوص در کاربران بی سیم و ماندگاری طولانی‌تر ارتباطات آن‌ها و در نتیجه بهبود قابلیت اطمینان سیستم گردد. به عنوان یک راه حل امیدوارکننده برای بهبود بازدهی انرژی، برداشت انرژی از محیط به منظور تأمین انرژی سیستم ارتباطی در چند سال گذشته به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [۹]. از آنجا که سیگنال‌های فرکانس رادیویی می‌توانند هم اطلاعات و هم انرژی داشته باشند، روش ارسال همزمان اطلاعات و توان بی سیم^{۱۰} (SWIPT)، که ابتدا در [۱۰] معرفی شده است، در جامعه تحقیقاتی مخابرات، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۱۱، ۱۲]. به طور خاص، با توجه به محدودیت طراحی مدار، دو معماری گیرنده عملی، یعنی گیرنده تقسیم زمان^{۱۱} (TS) و گیرنده تقسیم توان^{۱۲} (PS)، در [۱۲] مورد بررسی قرار گرفته است. طراحی فرستنده برای SWIPT در یک کانال تداخل MISO و همچنین مسأله حداکثرسازی مجموع نرخ برای چهار ساختار گیرنده عملی در [۱۱] مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۳] با ترکیب این روش‌ها، یک ساختار مشارکتی برای بهبود همزمان بازدهی طیفی و قابلیت اطمینان در شبکه‌های بی سیم 5G ارائه و بررسی شده است.

چالش اساسی روش‌های فوق، عملکرد نامناسب آن‌ها در محدوده SNRهای پایین است که به دلیل توان ارسالی اندک ایستگاه پایه (BS) در این محدوده، برداشت انرژی کافی برای ارسال مشارکتی رله فراهم نشده و عملکرد سیستم از نظر نرخ مجموع و احتمال قطعی کاربران دچار افت قابل توجهی می‌گردد. به عنوان یک راه حل برای این مشکل، در این مقاله روش برداشت انرژی خورشیدی در کنار برداشت انرژی از سیگنال‌های رادیویی از طریق SWIPT را پیشنهاد داده و به تحلیل و

باتوجه به اصول NOMA، فرآیند SIC¹⁵ در کاربر ۲ اجرا می‌شود. یعنی کاربر ۲ ابتدا پیام کاربر ۱ را کدبرداری می‌کند. سپس این پیام را از سیگنال دریافتی، به منظور دستیابی به پیام خود، کم می‌کند. رابطه SINR مربوط به آشکار سازی x_1 در کاربر ۲ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$SINR_{2,x_1}^{(1)} = \frac{(1-\beta)|h_2^H w_1|^2}{(1-\beta)|h_2^H w_2|^2 + 1} \quad (4)$$

مقدار فوق نباید از γ_1 کمتر باشد که حداقل SINR مورد نیاز برای آشکار سازی پیام x_1 با حداقل نرخ لازم (برای تامین کیفیت سرویس مطلوب کاربر ۱) را نشان می‌دهد. در نتیجه یکی دیگر از قیدهای مسأله به این صورت است:

$$\frac{(1-\beta)|h_2^H w_1|^2}{(1-\beta)|h_2^H w_2|^2 + 1} \geq \gamma_1 \quad (5)$$

سپس کاربر ۲، x_1 را از $y_2^{(1)}$ برای کدبرداری پیام x_2 خود کم می‌کند. SNR مربوطه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$SNR_{2,x_2}^{(1)} = (1-\beta)|h_2^H w_2|^2 \quad (6)$$

همچنین انرژی برداشت شده از روش SWIPT [۱۴] و تابش خورشیدی توسط کاربر ۲ در مرحله اول به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E = P_s \beta \left(|\tilde{h}_2^H w_1|^2 + |\tilde{h}_2^H w_2|^2 \right) \tau + P_{sun} \quad (7)$$

که در آن، τ کسر زمان ارسال برای مرحله اول را نشان می‌دهد (زمان مرحله دوم برابر $1-\tau$ است). P_{sun} برابر مقدار توان دریافتی از خورشید است که در همه زمان‌ها (مرحله اول و دوم) دریافت می‌شود. در سمت راست رابطه فوق، عبارت اول و دوم به ترتیب مربوط به انرژی برداشت شده از روش SWIPT و تابش خورشیدی را نشان می‌دهند. با فرض زمان یکسان برای دو مرحله، $\tau = \frac{1}{2}$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین فرض می‌کنیم برای ارسال اطلاعات، فقط از انرژی برداشت شده استفاده شود. بنابراین توان ارسال برای کاربر ۲ به صورت زیر است:

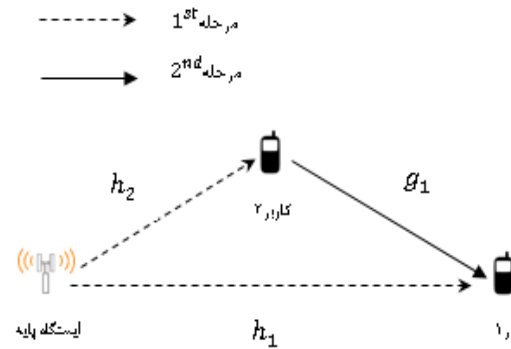
$$P_t = \frac{E}{1-\tau} = P_s \beta \left(|\tilde{h}_2^H w_1|^2 + |\tilde{h}_2^H w_2|^2 \right) + 2P_{sun} \quad (8)$$

۲-۲- مرحله ارسال مشارکتی

در این مرحله، کاربر ۲ با استفاده از انرژی برداشتی سیگنال x_1 را برای کاربر ۱ ارسال می‌کند. در نتیجه، کاربر ۱ سیگنالی به صورت زیر دریافت می‌کند:

$$y_1^{(2)} = \sqrt{P_t} g_1 x_1 + z_1^{(2)} \quad (9)$$

$\|w_1\|^2 + \|w_2\|^2 \leq 1$ را برآورده نمایند. بنابراین سیگنال دریافتی در کاربر ۱ به صورت زیر است:



شکل ۱: مدل سیستم برای ارسال NOMA فرسو دو مرحله‌ای.

$$y_1^{(1)} = \sqrt{P_s} \tilde{h}_1^H (w_1 x_1 + w_2 x_2) + Z_1^{(1)} \quad (1)$$

که در آن، P_s توان ارسالی در BS و $\tilde{h}_1 \in \mathbb{C}^{N_t}$ بردار ضرایب کانال بین BS و کاربر ۱ است. $Z_1^{(1)} \sim CN(0, \sigma_1^2)$ نویز سفید گوسی جمع‌شونده در کاربر ۱ است. در نتیجه، نسبت سیگنال به تداخل به اضافه نویز (SINR) در کاربر ۱ برای آشکار سازی x_1 به صورت زیر قابل محاسبه است:

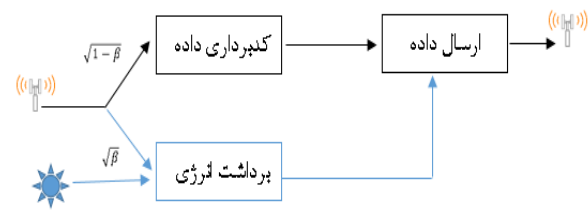
$$SINR_1^{(1)} = \frac{P_s |\tilde{h}_1^H w_1|^2}{P_s |\tilde{h}_1^H w_2|^2 + \sigma_1^2} = \frac{|h_1^H w_1|^2}{|h_1^H w_2|^2 + 1} \quad (2)$$

که در آن $\tilde{h}_1 = \frac{\sqrt{P_s}}{\sigma_1} h_1$ تعریف شده است.

برای کاربر ۲، ساختار تسهیم توان برای انجام SWIPT در شکل ۲ ترسیم شده است. بخش مربوط به کدبرداری اطلاعات از سیگنال دریافتی کاربر ۲ به صورت زیر است:

$$y_2^{(1)} = \sqrt{P_s} \sqrt{1-\beta} \tilde{h}_2^H (w_1 x_1 + w_2 x_2) + Z_2^{(1)} \quad (3)$$

در اینجا ضریب $\beta \in [0, 1]$ نسبت تسهیم توان را نشان می‌دهد. $\tilde{h}_2 \in \mathbb{C}^{N_t}$ بردار ضرایب کانال بین BS و کاربر ۲ و $Z_2^{(1)} \sim CN(0, \sigma_2^2)$ نویز سفید گوسی جمع‌شونده است.



شکل ۲: ساختار تسهیم توان برای کاربر ۲.

P1 یک مسأله غیرمحدب با چالش‌های زیادی از جمله ممزوج بودن ضریب تسهیم توان با جملات درجه ۲ مربوط به ضرایب شکل‌دهی پرتو، در تابع هدف و همین‌طور قیدهای مسأله است. با استفاده از روش آزادسازی نیمه معین^{۱۵} (SDR) و در نهایت با یک الگوریتم تکراری بر اساس تقریب محدب پی‌درپی^{۱۶} (SCA)، مسأله حاضر به صورت تقریبی حل می‌شود.

۳- حل مسأله بهینه‌سازی

در این قسمت ابتدا روش SDR به مسأله بهینه‌سازی P1 اعمال شده [۱۵] و سپس اصلاحاتی بر روی بخش‌های غیرمحدب به منظور تبدیل آن‌ها به تابع هدف و قیود محدب صورت می‌گیرد. در نهایت، یک الگوریتم تکراری بر اساس SCA برای حل تقریبی این مسأله ارائه می‌گردد. ابتدا دو ماتریس نیمه معین مثبت^{۱۷} (PSD)، \mathbf{W}_1 و \mathbf{W}_2 به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{W}_i = \mathbf{w}_i \mathbf{w}_i^H \succeq 0, \quad i=1,2 \quad (17)$$

با این تعریف باید دو قید $i=1,2, \text{rank}(\mathbf{W}_i)=1$ نیز به مسأله بهینه‌سازی اضافه شوند، ولی بر اساس روش SDR، این دو قید غیرمحدب را در نظر نمی‌گیریم. می‌توان نشان داد کنار گذاشتن این دو قید، جواب بهینه مسأله را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد [۱۱ و ۱۳]. با توجه به (۱۷)، قیدهای (۱۳) و (۱۵) به ترتیب به صورت قیدهای محدب زیر قابل بازنویسی‌اند:

$$\text{Tr}(\mathbf{H}_2 \mathbf{W}_1) - \gamma_1 \text{Tr}(\mathbf{H}_2 \mathbf{W}_2) \geq \frac{\gamma_1}{1-\beta} \quad (18)$$

$$0 \leq \text{Tr}(\mathbf{W}_1 + \mathbf{W}_2) \leq 1, \quad \mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2 \succeq 0 \quad (19)$$

که در آن $i=1,2, \mathbf{H}_i = \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H$ است. همچنین عملگر $\text{Tr}(\mathbf{A})$ مجموع عناصر روی قطر اصلی ماتریس \mathbf{A} را نشان می‌دهد. به کمک تعریف یک متغیر کمکی $x \geq 0$ ، قید (۱۴) را نیز می‌توان با دو قید زیر جایگزین نمود:

$$x \text{Tr}(\mathbf{H}_1 \mathbf{W}_2) \geq \text{Tr}(\mathbf{H}_1 \mathbf{W}_1) - x \quad (20)$$

$$\text{Tr}(\mathbf{H}_2 \mathbf{W}_1) + \text{Tr}(\mathbf{H}_2 \mathbf{W}_2) \geq \frac{\gamma_1 - x - \frac{2gP_{sum}}{\sigma_1^2}}{\beta g} \quad (21)$$

این دو قید غیر محدب هستند. قید (۲۰) با استفاده از روش مبتنی بر تکرار SCA و نامساوی میانگین هندسی-حسابی^{۱۸} (AGM) به صورت قید محدب زیر تقریب زده می‌شود:

$$\left(a^{(n)}x\right)^2 + \left(\text{Tr}(\mathbf{H}_1 \mathbf{W}_2) / a^{(n)}\right)^2 \leq 2\text{Tr}(\mathbf{H}_1 \mathbf{W}_1) - 2x \quad (22)$$

که در آن $a^{(n)}$ مقدار a در تکرار n ام بوده و توسط رابطه زیر به روزرسانی می‌شود:

که در آن، $g_1 \in \mathbb{C}$ ضریب کانال بین کاربر ۲ و کاربر ۱ و $Z_1^{(2)} \sim CN(0, \sigma_1^2)$ نویز جمع‌شونده گوسی در کاربر ۱ است. در نتیجه SNR برای آشکارسازی x_1 به صورت زیر قابل بیان است:

$$\text{SNR}_{1,x_1}^{(2)} = \beta g \left(\left| \mathbf{h}_2^H \mathbf{w}_1 \right|^2 + \left| \mathbf{h}_2^H \mathbf{w}_2 \right|^2 \right) + \frac{2gP_{sum}}{\sigma_1^2} \quad (10)$$

که در آن $g = |g_1|^2$.

در پایان مرحله ۲، کاربر ۱ پیام x_1 را به طور مشترک بر اساس سیگنال‌های دریافتی از BS و کاربر ۲ روش MRC کدبرداری می‌کند. از این رو، معادله SINR در کاربر ۱ به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\begin{aligned} \text{SINR}_{1,x_1} &= \text{SINR}_{1,x_1}^{(1)} + \text{SINR}_{1,x_1}^{(2)} \\ &= \frac{\left| \mathbf{h}_1^H \mathbf{w}_1 \right|^2}{\left| \mathbf{h}_1^H \mathbf{w}_2 \right|^2 + 1} + \beta g \left(\left| \mathbf{h}_2^H \mathbf{w}_1 \right|^2 + \left| \mathbf{h}_2^H \mathbf{w}_2 \right|^2 \right) + \frac{2gP_{sum}}{\sigma_1^2} \end{aligned} \quad (11)$$

۳-۲- مسأله بهینه‌سازی

هدف از طراحی سیستم، بیشینه‌سازی نرخ داده کاربر ۲ و همچنین تضمین الزامات QoS برای کاربر ۱ به وسیله تعیین بهینه ضریب تسهیم توان در رله و ضرایب شکل‌دهی پرتو در فرستنده است. لازم به ذکر است که بیشینه‌سازی نرخ کاربر ۲ معادل حداکثرسازی SNR آن است. در نهایت روابط فوق به مسأله بهینه‌سازی زیر منجر می‌شود:

$$P1: \max_{\beta, \mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2} (1-\beta) \left| \mathbf{h}_2^H \mathbf{w}_2 \right|^2 \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \frac{(1-\beta) \left| \mathbf{h}_2^H \mathbf{w}_1 \right|^2}{(1-\beta) \left| \mathbf{h}_2^H \mathbf{w}_2 \right|^2 + 1} \geq \gamma_1 \quad (13)$$

$$\frac{\left| \mathbf{h}_1^H \mathbf{w}_1 \right|^2}{\left| \mathbf{h}_1^H \mathbf{w}_2 \right|^2 + 1} + \beta g \left(\left| \mathbf{h}_2^H \mathbf{w}_1 \right|^2 + \left| \mathbf{h}_2^H \mathbf{w}_2 \right|^2 \right) + \frac{2gP_{sum}}{\sigma_1^2} \geq \gamma_1 \quad (14)$$

$$0 \leq \left\| \mathbf{w}_1 \right\|^2 + \left\| \mathbf{w}_2 \right\|^2 \leq 1 \quad (15)$$

$$0 \leq \beta \leq 1 \quad (16)$$

در مسأله بهینه‌سازی فوق، در رابطه (۱۲)، هدف بیشینه کردن SINR در آشکارسازی پیام x_2 است که معادل حداکثر کردن نرخ کاربر ۲ است. قیدهای (۱۳) و (۱۴)، مربوط به آشکارسازی پیام x_1 به ترتیب در کاربر ۲ و کاربر ۱ به منظور تضمین حداقل نرخ لازم (معادل حداقل SINR لازم γ_1) هستند. لازم به ذکر است پیام x_1 ، یک بار در کاربر ۲ و یک بار هم در کاربر ۱ آشکارسازی می‌شود. از آنجایی که نرخ آشکارسازی نهایی پیام x_1 ، برابر کمینه نرخ‌های دو مرحله خواهد بود، پس در هر دو مرحله باید SINR مربوط به x_1 ، بیشتر از γ_1 باشد. قید (۱۵)، قید حداکثر توان ارسالی در ایستگاه پایه و قید (۱۶) محدوده مجاز ضریب تسهیم توان در روش SWIPT را نشان می‌دهد.

تکرار روش تا زمانی که فاصله بین مقدار تابع هدف در دو تکرار متوالی از مقدار آستانه ϵ_1 کمتر شود ادامه پیدا می‌کند.

الگوریتم ۱: روش مبتنی بر SCA برای حل مسأله P1 [13]

- Set $n=0, u_0=-\infty, v_0=1, t_0=1$,
 1: Initialization: $a_0=1, \Delta=1$, and the tolerance $\epsilon=10^{-4}$
 2: while $\Delta \geq \epsilon$ do
 3: update $\beta^{(n)}, \mathbf{W}_1^{(n)}$ and $\mathbf{W}_2^{(n)}$ by solving P2
 4: update $a^{(n)}$ based on (23)
 5: update $\Delta = |u^{(n)} - u^{(n-1)}|$
 6: set $n \leftarrow n+1$
 7: end while
 Ensure: $\beta^{(n)}, \mathbf{W}_1^{(n)}$ and $\mathbf{W}_2^{(n)}$

۴- نتایج شبیه‌سازی

به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی و مقایسه آن با حالت بدون برداشت انرژی خورشیدی از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری کمک می‌گیریم. در شبیه‌سازی‌ها تعدادی کاربر در یک ناحیه با ابعاد ۵ متر در ۶ متر به طور تصادفی در اطراف یک BS با مختصات (۲۵، ۰) متر قرار گرفته‌اند. افت مسیر وابسته به فاصله با $P_L = 10^{-3} d^{-\alpha}$ مدل‌سازی می‌شود. d فاصله به متر و α نمای افت مسیر است. نمای افت مسیر برای کاربر ۱ برابر $\alpha_1=4$ و برای کاربر ۲ برابر $\alpha_2=2$ فرض می‌شود. همچنین چگالی یک طرفه نویز برابر $N_0 = -90 \text{ dBm/Hz}$ و پهنای باند 1 MHz در نظر گرفته می‌شوند و بنابراین توان نویز برابر -30 dBm خواهد بود. با اعمال مدل کانال محوشدگی رایسین، مدل کانال فروسو به صورت زیر قابل بیان است:

$$\tilde{\mathbf{h}}_2 = \sqrt{\frac{K}{K+1}} \mathbf{h}_2^{LOS} + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \mathbf{h}_2^{NLOS}$$

$$\tilde{g}_1 = \sqrt{\frac{K}{K+1}} g_1^{LOS} + \sqrt{\frac{1}{K+1}} g_1^{NLOS}$$

که در آن، ضریب $K=3$ پارامتر توزیع رایسین، \mathbf{h}_2^{LOS} و g_1^{LOS} مولفه یقینی LOS و $\tilde{\mathbf{h}}_1$ ، \mathbf{h}_2^{NLOS} ، g_1^{NLOS} مولفه محوشدگی رایلی با میانگین صفر و واریانس واحد است. تمام نتایج شبیه‌سازی روی هزار بار تکرار مستقل کانال میانگین‌گیری شده است. در این بخش برای مقایسه عملکرد، از توان‌های مختلف برداشت شده از خورشید استفاده شده است.

در شکل (۳) عملکرد روش SWIPT NOMA مشارکتی با استفاده از برداشت انرژی خورشیدی بررسی شده است. در این نمودار، نرخ مجموع کاربران بر حسب توان ارسالی BS به ازای سطوح توان خورشیدی مختلف رسم شده است. همان‌طور که می‌توان مشاهده نمود سیستم در حالت بدون استفاده از انرژی خورشیدی از نظر نرخ مجموع در توان‌های ارسالی BS پایین، عملکرد مناسبی ندارد. اما با توجه به این نمودار، افزایش چشمگیر نرخ مجموع بخصوص در توان‌های پایین و بهبود عملکرد قابل توجه، حتی به ازای مقادیر برداشت انرژی

$$a^{(n)} = \sqrt{\left(\text{Tr}(\mathbf{H}_1 \mathbf{W}_2) \right)^{(n-1)} / x^{(n-1)}} \quad (23)$$

قید (۲۱) را نیز می‌توان با دو قید زیر، شامل یک قید درجه دوم و یک قید نامساوی ماتریس خطی^{۱۹} (LMI) جایگزین کرد:

$$t^2 \geq \gamma_1 - x - \frac{2gP_{sum}}{\sigma_1^2} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} \beta g & t \\ t & \text{Tr}(\mathbf{H}_2(\mathbf{W}_1 + \mathbf{W}_2)) \end{bmatrix} \succeq 0 \quad (25)$$

قید (۲۵) یک قید محدب است. اما قید (۲۴) غیرمحدب بوده که در ادامه به آن خواهیم پرداخت.

با استفاده از فرم اپیگراف^{۲۰} [۱۶]، تابع هدف در P1 به صورت معادل زیر قابل بیان است:

$$\max_{u,v,\beta,\mathbf{W}_2} u \quad (26)$$

$$\text{s.t. } v^2 \geq u \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} (1-\beta) & v \\ v & \text{Tr}(\mathbf{H}_2 \mathbf{W}_2) \end{bmatrix} \succeq 0 \quad (28)$$

که در روابط فوق، تابع هدف جدید خطی است. قید (۲۷) یک نامساوی درجه دوم غیرمحدب و قید (۲۸) یک نامساوی محدب است.

تا به اینجا، تنها دو قید (۲۴) و (۲۷) غیرمحدب هستند که با استفاده از روش SCA و تقریب بسط تیلور مرتبه اول، می‌توان آن‌ها را به ترتیب با قیدهای محدب (۳۱) و (۳۰) در مسأله زیر تقریب زد. بنابراین می‌توان گفت بر اساس روش SCA و مباحث فوق، مسأله بهینه‌سازی P1 به صورت تکراری قابل حل است [۱۷] که در هر تکرار آن مسأله محدب زیر باید حل شود:

$$P2: \max_{u,v,t,x,\mathbf{W}_1,\mathbf{W}_2,\beta} u \quad (29)$$

$$\text{s.t. } 2v^{(n)}v - \left(v^{(n)}\right)^2 \geq u \quad (30)$$

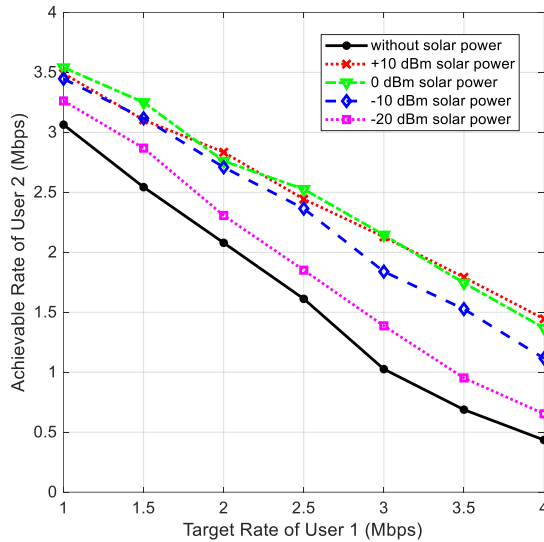
$$2t^{(n)}t - \left(t^{(n)}\right)^2 \geq \gamma_1 - x - \frac{2gP_{sum}}{\sigma_1^2} \quad (31)$$

(۲۸)، (۲۵)، (۲۲)، (۱۹)، (۱۸)، (۱۶)

که در آن $v^{(n)}$ و $t^{(n)}$ نشان‌دهنده مقدار v و t در تکرار n ام است. در مسأله فوق، تابع هدف خطی و تمام هشت قید آن محدب هستند.

مسأله P2 یک مسأله محدب است و با حل‌کننده‌های محدب مانند CVX به سادگی قابل حل است. در ادامه الگوریتم ۱ برای حل مسأله P1 بر مبنای SCA آورده شده است. این الگوریتم براساس تکرار و پیدا کردن یک جواب تقریبی با جایگذاری مقدار اولیه u_0, v_0, t_0, a_0 و به روزرسانی مقدار $a^{(n)}, v^{(n)}, t^{(n)}, u^{(n)}$ بعد از هر تکرار انجام می‌شود.

شکل (۵) نرخ قابل دستیابی برای کاربر ۲ را برحسب نرخ‌های هدف مختلف برای کاربر ۱ و به ازای سطوح توان خورشیدی مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که به ازای برداشت سطوح بالاتر توان خورشیدی، با ارضاء نیازهای QoS کاربر ۱، می‌توان به نرخ بالاتری برای کاربر ۲ رسید. این شکل، بهبود عملکرد سیستم حتی به ازای مقادیر اندک برداشت توان خورشیدی را نشان می‌دهد.



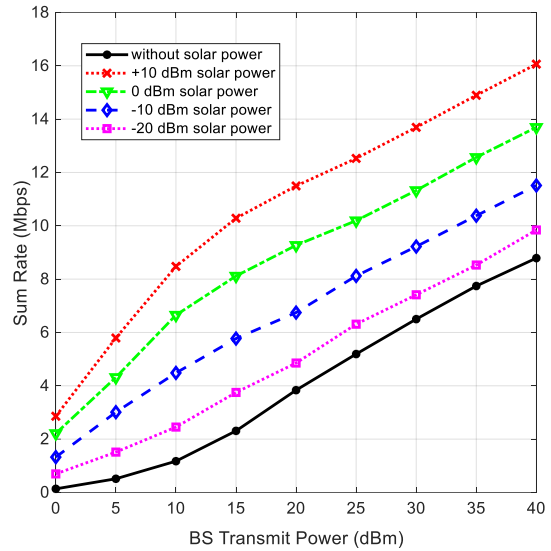
شکل ۵: مصالحه نرخ برای کاربر ۱ و کاربر ۲ با $P_s=20\text{dBm}$

در شکل (۶)، احتمال امکان‌پذیری بهینه‌سازی برحسب نرخ هدف کاربر ۱ به ازای سطوح توان برداشت شده خورشیدی مختلف، شبیه‌سازی شده است. چنانکه در این شکل مشاهده می‌شود، در یک احتمال امکان‌پذیری مشخص، در مقایسه با SWIPT NOMA مشارکتی بدون برداشت انرژی خورشیدی، راه‌حل پیشنهادی همواره از یک نرخ هدف بزرگتر در کاربر اول پشتیبانی می‌کند. به طور خاص، با احتمال امکان‌پذیری ۰.۸۰٪، نرخ هدف پشتیبانی شده توسط کاربر اول با استراتژی SWIPT NOMA مشارکتی حدود ۲.۳ Mbps است، در حالی که با استفاده از استراتژی پیشنهادی، تنها به ازای توان خورشیدی -10dBm ، می‌تواند به حدود ۸ Mbps برسد. از منظر دیگر، با یک نرخ هدف مشخص برای کاربر اول، استراتژی پیشنهادی احتمال امکان‌پذیری بالاتری را فراهم می‌نماید. این بدین معناست که استراتژی SWIPT NOMA مشارکتی پیشنهادی با برداشت مقادیر اندک توان خورشیدی، می‌تواند به طور قابل توجهی احتمال عدم قطعی و در نتیجه قابلیت اطمینان ارتباطات کاربران را، بخصوص در محدوده نرخ‌های لازم بالاتر برای کاربر ۱، بهبود بخشد.

۵- نتیجه‌گیری

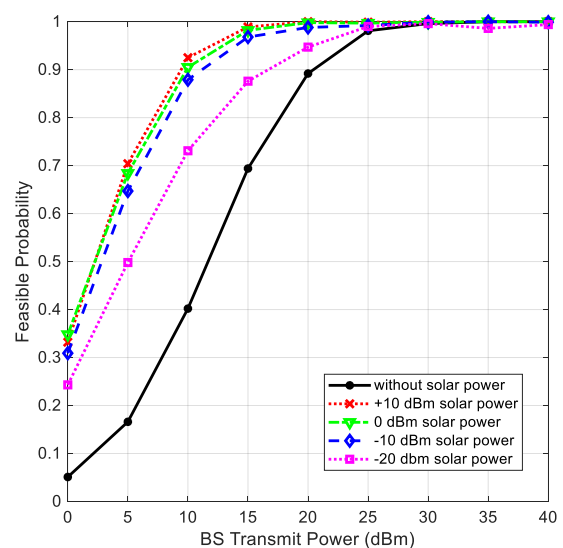
در این مقاله استفاده از برداشت انرژی خورشیدی به همراه روش SWIPT NOMA مشارکتی را به منظور بهبود عملکرد در شبکه‌های مخابراتی نسل پنجم پیشنهاد دادیم. مسأله بهینه‌سازی به منظور

خورشیدی کم، بسیار امیدوارکننده است. به عنوان نمونه، فقط به ازای -10dBm توان خورشیدی، نرخ مجموع به ازای $P_s=5\text{dBm}$ از حدود ۰.۵ Mbps در حالت بدون توان خورشیدی، به حدود ۳ Mbps یعنی حدود ۶ برابر، افزایش می‌یابد.



شکل ۳: استفاده از انرژی خورشیدی در پروتکل SWIPT NOMA مشارکتی.

در شکل (۴)، احتمال امکان‌پذیری بهینه‌سازی برحسب توان ارسالی BS در روش SWIPT NOMA مشارکتی به ازای سطوح مختلف از سطح توان برداشت شده از خورشید، رسم شده است. افزایش قابل توجه احتمال امکان‌پذیری در توان‌های ارسالی BS پایین، که به معنای کاهش احتمال قطعی کاربران است، حتی به ازای مقادیر اندک برداشت توان خورشیدی، مزیت استفاده از الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۴: احتمال امکان‌پذیری بهینه‌سازی در حالت MISO برای سطح توان‌های برداشت شده مختلف از خورشید با $\gamma_1=1$.

Transactions on Wireless Communications, vol. 15, no. 1, pp. 537-552, 2015.

- [6] Y. Lan, A. Benjebboiu, X. Chen, A. Li, and H. Jiang, "Considerations on downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) combined with closed-loop SU-MIMO," in *2014 8th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, 2014, pp. 1-5: IEEE.
- [7] Q. Sun, S. Han, I. Chin-Lin, and Z. Pan, "On the ergodic capacity of MIMO NOMA systems," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 405-408, 2015.
- [8] Z. Ding, M. Peng, and H. V. Poor, "Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 8, pp. 1462-1465, 2015.
- [9] O. Ozel, K. Tutuncuoglu, J. Yang, S. Ulukus, and A. Yener, "Transmission with energy harvesting nodes in fading wireless channels: Optimal policies," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 29, no. 8, pp. 1732-1743, 2011.
- [10] L. R. Varshney, "Transporting information and energy simultaneously," in *2008 IEEE International Symposium on Information Theory*, 2008, pp. 1612-1616: IEEE.
- [11] C. Shen, W.-C. Li, and T.-H. Chang, "Wireless information and energy transfer in multi-antenna interference channel," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, no. 23, pp. 6249-6264, 2014.
- [12] R. Zhang and C. K. Ho, "MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 5, pp. 1989-2001, 2013.
- [13] Y. Xu, C. Shen, et al., "Joint beamforming and power-splitting control in downlink cooperative SWIPT NOMA systems," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 65, no. 18, pp. 4874-4886, 2017.
- [14] Q. Shi, C. Peng, W. Xu, M. Hong, and Y. Cai, "Energy efficiency optimization for MISO SWIPT systems with zero-forcing beamforming," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 4, pp. 842-854, 2015.
- [15] Z. Luo, W. Ma, A. M. So, Y. Ye and S. Zhang, "Semidefinite Relaxation of Quadratic Optimization Problems," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 27, no. 3, pp. 20-34, 2010.
- [16] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex optimization*. Cambridge university press, 2004.
- [17] W. Li, T. Chang, C. Lin and C. Chi, "Coordinated Beamforming for Multiuser MISO Interference Channel Under Rate Outage Constraints," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 5, pp. 1087-1103, 2013.

زیر نویس‌ها

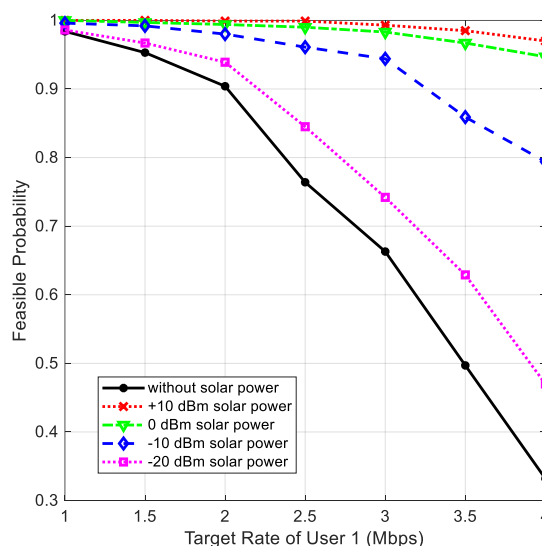
⁵ Orthogonal Multiple Access

⁶ Multiple Input-Multiple Output

⁷ Multiple Input-Single Output

⁸ Outage Probability

تعیین ضریب تسهیم توان در رله و بردار شکل‌دهی پرتو در فرستنده، با هدف بیشینه کردن نرخ داده کاربر دوم و رفع نیازهای کیفیت سرویس کاربر اول، تعیین و روش حل آن ارائه گردید. نشان دادیم با استفاده از انرژی خورشیدی برداشت شده در رله برای مشارکت در ارسال اطلاعات، بهبود قابل ملاحظه‌ای در افزایش نرخ مجموع کاربران و همچنین افزایش احتمال امکان‌پذیری بهینه‌سازی، بخصوص در SNRهای پایین (که به معنای کاهش احتمال قطعی کاربران در مرز سلول است)، حاصل می‌شود.



شکل ۶: احتمال امکان‌پذیری بهینه‌سازی برای سطح توان‌های مختلف برداشت شده با $P_s=25\text{dBm}$

مراجع

- [1] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, and K. Higuchi, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access," in *2013 IEEE 77th vehicular technology conference (VTC Spring)*, 2013, pp. 1-5: IEEE.
- [2] 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, 2015.
- [3] Z. Ding, Z. Yang, P. Fan, and H. V. Poor, "On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users," *IEEE signal processing letters*, vol. 21, no. 12, pp. 1501-1505, 2014.
- [4] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of wireless communication*. Cambridge university press, 2005.
- [5] Z. Ding, F. Adachi, and H. V. Poor, "The application of MIMO to non-orthogonal multiple access," *IEEE*

¹ Non-Orthogonal Multiple Access

² Spectral Efficiency

³ Internet of Things

⁴ Successive Interference Cancellation

⁹ Energy Efficiency

¹⁰ Simultaneous Wireless Information and Power Transfer

¹¹ Time Switching

¹² Power Splitting

¹³ Optimization Feasible Probability

¹⁴ Maximal-Ratio Combining

¹⁵ Semidefinite Relaxation

¹⁶ Successive Convex Approximation

¹⁷ Positive Semidefinite

¹⁸ Arithmetic-Geometric Mean

¹⁹ Linear Matrix Inequality

²⁰ Epigraph Form