

بهره‌وری انرژی در شبکه‌های رله چندآنتنی دوجبهتی امن

سیده فاطمه بزرگی و سروش اخلاقی اصفهانی

چکیده: این مقاله، به بررسی بهره‌وری انرژی در شبکه‌های رله دوجبهتی امن می‌پردازد. فرض می‌شود که در حضور یک شنودگر، دو کاربر تک‌آنتنی با کمک چند رله چندآنتنی تقویت و ارسال به مبادله اطلاعات با یکدیگر اقدام می‌کنند. در بازه زمانی اول، کاربران سیگنال خود را به سمت رله ارسال می‌کنند و در بازه زمانی دوم، رله‌ها با استفاده از ماتریس شکل‌دهی پرتو، سیگنال دریافتی را به گونه‌ای به سمت کاربران ارسال می‌کنند که اطلاعات دریافتی شنودگر به حداقل برسد. با استفاده از دو روش شکل‌دهی پرتو در فضای پوچ (NSBF) و شکل‌دهی پرتو بر پایه هم‌ترازی تداخل (ILAB)، بهره‌وری انرژی که نسبت نرخ مجموع امن به توان مصرفی کل شبکه است، محاسبه شده است. نشان داده می‌شود که مسأله‌های پیش رو غیر محدب است و با استفاده از روش آزادسازی نیمه‌معین (SDR)، به صورت محدب تبدیل خواهند شد. این مسایل محدب با استفاده از روش نقطه درونی حل گردیده‌اند و پاسخ آنها فرم بسته ندارد. در نتایج عددی، ملاحظه می‌شود که با استفاده از روش شکل‌دهی پرتو بر پایه هم‌ترازی تداخل، بهره‌وری انرژی مقدار بیشتری را نسبت به روش شکل‌دهی پرتو در فضای پوچ که در پژوهش‌های پیشین به کار رفته است، به خود اختصاص می‌دهد.

کلیدواژه: امنیت لایه فیزیکی، بهره‌وری انرژی، رله دوجبهتی، شکل‌دهی پرتو.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، شبکه‌های رله مشارکتی^۱ بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱] تا [۶]. در این نوع از شبکه‌ها، رله‌ها با مشارکت یکدیگر، به گره‌های کاربر جهت انتقال داده کمک می‌کنند. در ساختارهایی که به علت نبود خط دید مستقیم^۲ بین منبع و مقصد و یا پایین بودن کیفیت این ارتباط، تبادل اطلاعات در شبکه دچار مشکل می‌شود، استفاده از رله امری ضروری است [۳]. همچنین با در نظر گرفتن آنتن‌های هر رله، می‌توان ماتریس شکل‌دهی پرتو آن را به گونه‌ای یافت که اطلاعات کاربران از شنودگران غیر مجاز محفوظ مانده و داده‌ها به صورت امن انتقال یابند.

در یکی از انواع رله‌ها، نسخه تقویت‌شده سیگنال دریافتی رله برای کاربران ارسال می‌شود که این شیوه، تقویت و ارسال^۳ نامیده می‌شود. این نوع رله‌ها، به علت پیچیدگی کم محاسباتی و سخت‌افزاری، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طرفی، استفاده از رله‌های دوجبهتی^۴، منجر به افزایش بازدهی طیفی شبکه می‌شود، بدین صورت که در یک بازه زمانی،

این مقاله در تاریخ ۲۹ اردیبهشت ماه ۱۳۹۹ دریافت و در تاریخ ۵ اسفند ماه ۱۳۹۹ بازنگری شد.

سیده فاطمه بزرگی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران، (email: s.fatemeh.bozorgi@shahed.ac.ir)

سروش اخلاقی اصفهانی (نویسنده مسئول)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران، (email: akhlaghi@shahed.ac.ir)

- Cooperative Relay Networks
- Line of Sight
- Amplify and Forward
- Two-Way

۵. One-Way
 ۶. Karush-Kuhn-Tucke
 ۷. Iterative Algorithm
 ۸. Secrecy Energy Efficiency
 ۹. Physical-Layer Security
 ۱۰. Wyner
 ۱۱. Degraded Wiretap Channel
 ۱۲. Markov Chain

کاربران داده‌های خود را برای رله ارسال کرده و در بازه زمانی دوم، اطلاعات پردازش‌شده یکدیگر را دریافت نمایند [۶] و [۷].

مسأله مهم و مورد توجه دیگر، بهره‌وری انرژی است. یکی از روش‌های بهینه‌سازی انرژی، کمینه‌سازی توان مصرفی شبکه با در نظر گرفتن شرط حداقل نرخ در کاربران است. اما معیار دیگر که دقیق‌تر است، بهینه‌سازی نسبت نرخ به انرژی مصرفی است [۸] و [۹].

در [۴]، مسأله بهره‌وری انرژی در شبکه رله تک‌جبهتی^۵ به همراه تخصیص توان برای هر یک از رله‌ها بررسی شده است. در این شبکه، چند فرستنده-گیرنده تک‌آنتنی به کمک چند رله چندآنتنی به تبادل اطلاعات با یکدیگر می‌پردازند. با در نظر گرفتن شرایط KKT، مسأله مورد نظر فرم بسته دارد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بهره‌وری انرژی در این مسأله نسبت به در نظر گرفتن توان‌های برابر برای رله‌ها، بهبود داشته است. در پژوهش [۱۰] به بررسی بهره‌وری انرژی و شکل‌دهی پرتو در شبکه شامل چند کاربر چندآنتنی و یک رله چندآنتنی پرداخته شده است. عملکرد این مسأله با استفاده از یک الگوریتم تکراری^۶ پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۱]، بهره‌وری انرژی با کنترل توان کاربران و رله که همگی تک‌آنتنی هستند، مورد مطالعه قرار گرفته است. نشان داده شده که روش پیشنهادی این مرجع، نسبت به زمانی که کل توان موجود به طور مساوی بین تمام گره‌ها توزیع شود، می‌تواند بهره‌وری انرژی و همچنین بازدهی طیفی را بهبود بخشد.

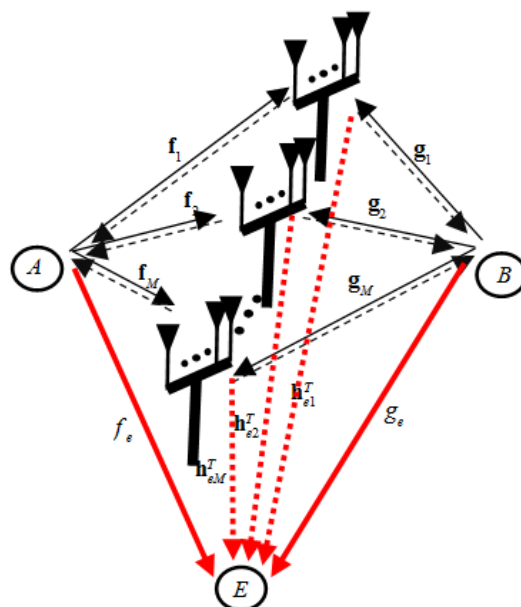
در پژوهش‌های [۴] و [۱۰] تا [۱۲]، تمامی کاربران مجاز فرض شده‌اند. اما در صورتی که شنودگر غیر مجاز در شبکه باشد، بحث بهره‌وری انرژی امن^۸ (SEE) مطرح خواهد شد.

مباحث مربوط به امنیت لایه فیزیکی^۹ در سال ۱۹۷۵ توسط واینر^{۱۰} آغاز شده است [۱۳]. واینر، کانال شنود نازل^{۱۱} را معرفی کرد و به تعریف نرخ امن پرداخت. در کانال شنود تنزل‌یافته واینر، سیگنال دریافتی در شنودگر، گیرنده مجاز و سیگنال ارسالی، یک زنجیره مارکوف^{۱۲} تشکیل داده‌اند و لذا سیگنال دریافتی در شنودگر از نظر آماری، نسخه تنزل‌یافته‌ای از سیگنال دریافتی در گیرنده مجاز است. در [۱۴]، لزوم شرط نازل بودن کانال شنود نسبت به کانال گیرنده مجاز حذف شده و نتایج واینر تعمیم یافته است.

اخیراً نیز پژوهش‌هایی در خصوص بهره‌وری انرژی امن انجام شده

انرژی امن مورد مطالعه قرار گرفته است. به بیان دیگر، در شبکه چندرله چندآنتنی مطابق شکل ۱، نسبت نرخ مجموع امن به توان مصرفی کل شبکه (بهره‌وری انرژی امن) مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نظر گرفتن چند رله، موجب می‌شود که در صورت مناسب نبودن شرایط کانال برای یکی از رله‌ها، امکان ارسال پیام از طریق رله‌های دیگر وجود داشته باشد. همچنین به کارگیری چند آنتن در هر رله، باعث افزایش درجه آزادی^۹ جهت تعیین ماتریس شکل‌دهی پرتو می‌شود.

در این مقاله، با به کارگیری دو روش شکل‌دهی پرتو در فضای پوچ^{۱۰} (NSBF) و شکل‌دهی پرتو بر پایه هم‌ترازی تداخل^{۱۱} (ILABF)، مسأله بهینه‌سازی مورد نظر غیر محدب است که برای حل آن به کمک روش آزادسازی نیمه‌معین^{۱۲} (SDR)، مسأله محدب شده است و از روش نقطه درونی^{۱۳} و بسته نرم‌افزاری CVX جهت یافتن پاسخ نهایی استفاده شده است.



شکل ۱: ساختار شبکه.

۲- مدل سیستم

در این پژوهش، یک شبکه دوجتهی مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده است. در این شبکه فرض می‌شود دو کاربر قصد دارند پیام‌های محرمانه خود را برای یکدیگر ارسال کنند. انتقال داده به کمک M رله انجام می‌شود و هر رله از N آنتن برای ارسال و دریافت اطلاعات استفاده می‌کند.

در این شبکه، یک گره غیر مجاز نیز درصدد شنود پیام‌های خصوصی مبادله‌شده میان کاربران است. دو کاربر حاضر در شبکه و شنودگر به ترتیب با نمادهای A ، B و E نشان داده شده است. در این مسأله فرض‌های زیر در نظر گرفته می‌شود:

- ۱) فرض می‌شود که کلیه کانال‌ها به صورت شبه‌ایستا^{۱۴} با محوشوندگی تخت^{۱۵} و مستقل از یکدیگر هستند.
- ۲) به علت فاصله بسیار زیاد بین کاربران و یا اثر سایه^{۱۶}، امکان ارسال اطلاعات به صورت مستقیم بین کاربرها وجود ندارد و به همین خاطر از تعدادی رله برای انتقال اطلاعات استفاده می‌شود.
- ۳) بین آنتن‌های رله‌های متمایز، مشارکتی وجود ندارد اما اطلاعات حالت کانال^{۱۷} (CSI) تمامی رله‌ها، در یک گره مرکزی^{۱۸} موجود است و لذا این گره، تعیین ماتریس شکل‌دهی پرتو تمامی رله‌ها را بر عهده دارد.
- ۴) شنودگر یک کاربر ثبت‌شده در شبکه است و CSI آن در گره مرکزی موجود است. این فرض به طور معمول در [۱] تا [۶] در نظر گرفته شده است. فرض دانستن اطلاعات حالت کانال شنودگر، در شبکه‌های پخش همگانی^{۱۹} (BC) که کاربر برای بعضی از سیگنال‌ها نقش گیرنده مجاز و برای بقیه سیگنال‌ها نقش شنودگر را دارد، کاربردی است.

است [۱۵] تا [۱۷]. در [۱۵]، یک شبکه چندورودی-تک‌خروجی^۱ بدون حضور رله در نظر گرفته شده است. در این مسأله بردار شکل‌دهی پرتو با در نظر گرفتن دو حالت حداقل نرخ امن و بدون آن، محاسبه شده است. نشان داده شده که با در نظر گرفتن حداقل نرخ امن، مسأله به صورت برنامه‌ریزی نیمه‌معین^۲ (SDP) ساده می‌شود. همچنین با حذف شرط حداقل نرخ امن در گیرنده، مسأله با کمک یک روش عددی^۳ حل شده است. در [۱۶] نیز با در نظر گرفتن چند رله تک‌جتهی، با تعیین ماتریس شکل‌دهی پرتو، بهره‌وری انرژی امن بررسی شده است. محدودیت‌های این مسأله، حداقل نرخ امن گیرنده، توان کل رله‌ها و همچنین توان هر یک از رله‌ها است. در نهایت مسأله مورد نظر به یک برنامه‌ریزی مخروط مرتبه دوم^۴، تبدیل شده و با الگوریتم تکراری، پاسخ نزدیک بهینه^۵ مشخص شده است. در [۱۷]، شبکه چندورودی-چندخروجی^۶ با وجود یک رله نامطمئن^۷ در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از شکل‌دهی پرتو در کاربران و رله، بهره‌وری انرژی امن محاسبه شده است. الگوریتم تکراری پیشنهادشده در این مرجع، علاوه بر حل مسأله بهره‌وری انرژی امن، برای حل مسأله نرخ مجموع امن نیز مناسب است.

مرور پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که مسأله بهره‌وری انرژی در شبکه‌های رله مشارکتی دوجتهی امن نیاز به مطالعه دارد. لازم به ذکر است که بررسی این مسأله در شبکه‌های دوجتهی نسبت به رله‌های تک‌جتهی چالش‌برانگیزتر است، چرا که مصون ماندن اطلاعات هر دو کاربر از شنودگر در عین ارسال هم‌زمان سیگنال، دشوار بوده و روابط نسبت به رله تک‌جتهی پیچیده‌تر خواهند بود.

قابل ذکر است که در [۳] مسأله نرخ مجموع امن^۸ مورد مطالعه قرار گرفته است، در حالی که در پژوهش پیش رو مسأله بینشینه‌سازی بازدهی

9. Degrees of Freedom

10. Null Space Beamforming

11. Information Leakage Alignment Beamforming

12. Semi-Definite Relaxation

13. Interior-Point

14. Quasi-Static

15. Flat Fading

16. Shadowing

17. Channel State Information

18. Central Node

19. Broadcast

1. Multiple Input Single Output

2. Semi-Definite Programming

3. Rayleigh-Ritz Method

4. Second Order Cone Programming

5. Near-Optimal

6. Multiple Input Multiple Output

7. Untrusted

8. Secrecy Sum Rate

۲-۱ روش شکل‌دهی پرتو در فضای پوچ (NSBF)

در این قسمت، هدف آن است که با در نظر گرفتن ماتریس شکل‌دهی پرتو مناسب، در بازه زمانی دوم، سیگنال پردازش شده رله در فضای پوچ شودگر ارسال شده و بنابراین اطلاعاتی را دریافت نکند. با در نظر گرفتن (۲۳) [۳]، بردار شکل‌دهی پرتو رله‌ها به صورت $w = Gc$ در نظر گرفته می‌شود که در این رابطه، ماتریس $G_{MN^T \times (MN^T - \gamma)}$ دارای $MN^T - 2$ ستون متعامد است که ترکیب خطی آنها فضای پوچ مورد نظر را پوشش می‌دهد. همچنین $c_{(MN^T - \gamma) \times 1}$ بردار حاوی ضرایب خطی است.

در نتیجه، با توجه به (۱۷)، (۱۸)، (۲۱) و (۲۲) [۳] و (۲) تا (۴) این پژوهش و همچنین بردار شکل‌دهی پرتو رله‌ها، $w = Gc$ می‌تواند R_{sum} را به صورت (۵) بازنویسی کرد

$$R_{sum} = \frac{1}{\gamma} \log_{\gamma} \left(\left(1 + \frac{c^H A_c}{c^H \Lambda_r c + \sigma_r^2} \right) \left(1 + \frac{c^H A_r c}{c^H \Lambda_s c + \sigma_s^2} \right) \right) \quad (5)$$

که علامت + با فرض مثبت بودن R_{sum} حذف شده و $A_r, A_s, \Lambda_r, \Lambda_s$ به صورت (۶) تعریف می‌شوند

$$\begin{aligned} g &\triangleq \left(1 + \frac{\eta P_r |f_e|^2 + \eta P_r |g_e|^2}{\sigma_{E_s}^2} \right)^{-1} \\ A_r &\triangleq \eta P_r G^H T^H (g_r^* g_r^T \otimes f_r^* f_r^T) T G \\ \Lambda_r &\triangleq \sigma_r^2 G^H T^H (I \otimes f_r^* f_r^T) T G \\ A_s &\triangleq \eta P_s G^H T^H (f_s^* f_s^T \otimes g_s^* g_s^T) T G \\ \Lambda_s &\triangleq \sigma_s^2 G^H T^H (I \otimes g_s^* g_s^T) T G \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن T یک ماتریس کمکی با درایه‌های صفر و یا یک مطابق با [۳] است. علامت‌های \otimes و $*$ به ترتیب به معنی ضرب کرونگر دو ماتریس و مزدوج هستند. f_e و g_e کانال بین کاربران و شنودگر و $\sigma_{E_s}^2$ واریانس نویز دریافتی شنودگر در بازه زمانی اول است. هدف آن است که بهره‌وری انرژی امن که بیانگر نسبت نرخ مجموع امن به کل توان مصرفی شبکه است، بیشینه گردد. به بیان ریاضی، هدف حل مسأله (۷) است

$$\begin{aligned} \max_w SEE &= \frac{R_{sum}}{P_{t_con}} \\ \text{s.t. } P_r &\leq P_R \end{aligned} \quad (7)$$

که SEE بیانگر بهره‌وری انرژی امن و P_{t_con} بیانگر توان مصرفی کل شبکه است. در (۷) P_{t_con} به صورت $P_r + P_c + P_u + P_{cu}$ فرمول‌بندی می‌شود که در آن مجموع توان کاربران اول و دوم است. همچنین P_c توان اتلافی در رله‌ها و P_{cu} مجموع توان اتلافی کاربران است. طبق [۳]، توان هر یک از رله‌ها می‌تواند به صورت $P_{rm} = w_m^H R_{Rm} w_m$ نوشته شود که $R_{Rm} = \eta P_r (h_m^* h_m^T \otimes I) + \eta P_s (g_m^* g_m^T \otimes I) + \sigma_r^2 I$ و $w_m \triangleq \text{vec}(W_m)$ نیز ستون‌های یک ماتریس را به ترتیب زیر هم قرار می‌دهد. بنابراین توان کل رله‌ها به صورت (۸) است

$$P_r = \sum_{m=1}^M P_{rm} = \sum_{m=1}^M w_m^H R_{Rm} w_m = w^H R_R w = c^H \Omega_R c \quad (8)$$

4. Kronecker

۵. در [۱۹] توان‌های اتلافی در یک فرستنده-گیرنده مشخص شده است.

(۵) رله‌ها برای ارسال سیگنال خود از روش تقویت و ارسال، استفاده می‌کنند؛ به این صورت که سیگنال دریافتی خود را در ماتریس مناسب ضرب کرده و سپس آن را برای کاربران ارسال می‌کنند. با توجه به شرایط در نظر گرفته شده، هدف آن است که بهره‌وری انرژی امن یعنی نسبت نرخ مجموع امن به توان مصرفی کل شبکه بیشینه گردد. در [۱۸] با در نظر گرفتن ورودی گوسی و کدگذار تصادفی، نشان داده شده که مجموع نرخ امن دست‌یافتنی کانال شنود دوجتهی به کمک (۱) محاسبه می‌شود

$$R_{sum} = [I(x_r; y_r) + I(x_s; y_s) - I(x_r, x_s; y_E)]^+ \quad (1)$$

که در آن $I(a; b)$ اطلاعات متقابل بین دو سیگنال a و b بوده و $[x]^+ = \max\{0, x\}$ است. همچنین x_r و x_s به ترتیب سیگنال‌های ارسالی کاربرهای اول و دوم و y_r و y_s سیگنال‌های دریافتی هر یک از آنها است. y_E نیز بردار سیگنال دریافتی شنودگر در بازه‌های زمانی اول و دوم است.

جهت به دست آمدن نرخ مجموع امن، لازم است که روابط اطلاعات متقابل مربوط به آن مشخص شود. با در نظر گرفتن (۱۰) در [۳] و انجام تعدادی محاسبات ساده، اطلاعات متقابل بین سیگنال ارسالی کاربر دوم و سیگنال دریافتی کاربر اول به صورت (۲) و اطلاعات متقابل بین سیگنال ارسالی کاربر اول و سیگنال دریافتی کاربر دوم به صورت (۳) محاسبه می‌گردد

$$I(x_r; y_r) = \frac{1}{\gamma} \log_{\gamma} \left(1 + \frac{\eta P_r |f_r^T W_T g_r|^2}{\sigma_r^2 \|f_r^T W_T\|^2 + \sigma_s^2} \right) \quad (2)$$

$$I(x_s; y_s) = \frac{1}{\gamma} \log_{\gamma} \left(1 + \frac{\eta P_s |g_s^T W_T f_s|^2}{\sigma_r^2 \|g_s^T W_T\|^2 + \sigma_s^2} \right) \quad (3)$$

که در آن P_r و P_s به ترتیب توان سیگنال ارسالی کاربران اول و دوم می‌باشد و ضریب $1/\gamma$ به این علت است که انتقال اطلاعات در دو بازه زمانی انجام می‌شود. منظور از η نیز بهره‌وری تقویت‌کننده توان است که در مقالات با نام بهره‌وری درین^۲ شناخته می‌شود [۱۹]. f_r کانال بین کاربر اول و رله‌ها و g_r کانال بین کاربر دوم و رله‌ها به صورت $g_r \triangleq [g_{r1}^T, g_{r2}^T, \dots, g_{rM}^T]^T$ و $f_r \triangleq [f_{r1}^T, f_{r2}^T, \dots, f_{rM}^T]^T$ از T ترانهاده است. W_T نیز ماتریس بلوکی-قطری^۳ متشکل از ضرایب شکل‌دهی پرتو رله‌ها است. σ_r^2 و σ_s^2 به ترتیب واریانس نویز دریافتی در کاربر اول، کاربر دوم و هر یک از آنتن‌های رله‌ها است. اطلاعات متقابل بین کاربران و شنودگر نیز به صورت (۴) قابل محاسبه است

$$I(x_r, x_s; y_E) = \frac{1}{\gamma} \log_{\gamma} \det(I_r + H_E Q_E H_E^H K_E^{-1}) \quad (4)$$

که در آن $\det(A)$ ، دترمینان ماتریس A و $Q_E = \text{diag}(\eta P_r, \eta P_s)$ است. منظور از $\text{diag}(a, b)$ نیز یک ماتریس قطری با درایه‌های a و b است. I و H نیز به ترتیب ماتریس همانی و ترانهاده مزدوج است. K_E و H_E نیز مطابق [۳] است.

1. Stochastic Encoders
2. Drain Efficiency
3. Block-Diagonal

مشخص شده است. همچنین حد پایین γ_r برابر صفر و حد بالای آن برابر P_R است. پس از انجام جستجو بر روی γ_r و γ_s ، بهترین جواب یعنی Y^* و X^* مشخص می‌شود. اگر Y^* رتبه یک باشد، آن گاه قید $rank(X) = 1$ در مسأله (۱۱) برقرار شده و در نتیجه جواب بهینه مسأله (۱۲)، یعنی $X^* = Y^*/\zeta^*$ مشخص خواهد شد و با توجه به بردار ویژه اصلی X^* ، بردار بهینه c^* مشخص می‌شود. اما اگر Y^* رتبه یک نباشد، جواب بهینه مسأله با استفاده از روش‌های تصادفی کردن^۶ مشخص خواهد شد [۲۲]. لازم به ذکر است که در نتیجه‌های عددی مشاهده شده که به ازای تعداد زیادی از تحقق‌های کانال، ماتریس Y^* دارای رتبه یک بوده که پاسخ بهینه مسأله اصلی یعنی (۹) است.

۲-۲ روش شکل‌دهی پرتو بر پایه هم‌ترازی تداخل (ILABF)

در این قسمت، فرض می‌شود که در بازه زمانی دوم، به جای آن که سیگنال پردازش‌شده رله در فضای پوچ شنودگر ارسال شود، شنودگر ترکیب خطی از سیگنال‌های دریافتی در بازه زمانی اول را در اختیار داشته باشد. به عبارت دیگر، (۱۳) برقرار باشد که در آن h_e کانال بین رله‌ها و شنودگر است. با در نظر گرفتن این فرض، مجموعه جواب ممکن^۷ افزایش یافته و دربرگیرنده مجموعه جواب فرض فضای پوچ نیز است

$$\begin{aligned} h_e^T W_T f_T &= \alpha f_e \\ h_e^T W_T g_T &= \alpha g_e \end{aligned} \quad (13)$$

بنابراین مشابه روش شکل‌دهی پرتو در فضای پوچ، مطابق (۳۹) [۳]، بردار شکل‌دهی پرتو رله را می‌توان به صورت $w = Gc$ در نظر گرفت که در این رابطه ماتریس $G_{MN^T \times (MN^T - 1)}$ دارای $MN^T - 1$ ستون متعام است. همچنین بردار حاوی ضرایب خطی است. همان طور که ملاحظه می‌شود، ماتریس شکل‌دهی پرتو با استفاده از روش ILABF نسبت به روش NSBF، یک درجه آزادی بیشتر دارد. بدین ترتیب با توجه به این که مجموعه جواب ممکن روش ILABF دربرگیرنده مجموعه جواب ممکن روش NSBF است، لذا روش ILABF به بهره‌وری انرژی بیشتری نسبت به NSBF منجر خواهد شد. بنابراین با توجه به نکات ذکرشده، رابطه اطلاعات متقابل بین کاربران و شنودگر به صورت (۱۴) در نظر گرفته می‌شود

$$\begin{aligned} I(x_s, x_r; y_e) &= \frac{1}{\nu} \log_2 \left(1 + \frac{\eta p_r |g_e|^2 + \eta p_s |f_e|^2}{\sigma_{E,s}^2} + \frac{|\alpha|^2 \left(\frac{\eta p_r |g_e|^2 + p_s |f_e|^2}{\sigma_{E,s}^2 + \sigma_r^2} \right)}{\sigma_{E,s}^2 + \sigma_r^2 \|h_e^T W_T\|^2} \right) \\ &= \frac{1}{\nu} \log_2 \left(1 + \frac{\eta p_r |g_e|^2 + \eta p_s |f_e|^2}{\sigma_{E,s}^2} + \frac{c^H A_r c}{\sigma_{E,s}^2 + c^H \Lambda_r c} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

که در آن Λ_r و A_r به صورت (۱۵) تعریف می‌شوند

$$\begin{aligned} \Lambda_r &\triangleq \sigma_r^2 G^H T^H (I \otimes h_e^* h_e^T) T G \\ A_r &\triangleq \eta G^H T^H (p_s (f_T^* f_T^T \otimes h_e^* h_e^T) + p_r (g_T^* g_T^T \otimes h_e^* h_e^T)) T G \end{aligned} \quad (15)$$

که $\Omega_R = G^H R_R G$ و $R_R = \text{Blkdiag}(R_{R_1}, R_{R_2}, \dots, R_{R_M})$ منظور از $\text{Blkdiag}(A, B)$ یک ماتریس بلوکی-قطری است که درایه‌های قطر اصلی آن ماتریس‌های A و B هستند. در نتیجه می‌توان مسأله (۷) را به صورت (۹) بازنویسی نمود

$$\max_c \frac{\frac{1}{\nu} \log_2 \left(1 + \frac{c^H A_r c}{c^H \Lambda_r c + \sigma_r^2} \right) \left(1 + \frac{c^H A_s c}{c^H \Lambda_s c + \sigma_s^2} \right)}{c^H \Omega_R c + p_c + p_u + p_{cu}} \quad (9)$$

$$\text{s.t. } c^H \Omega_R c \leq P_R$$

با تعریف متغیرهای $\gamma_r = c^H \Omega_R c$ و $\gamma_s = c^H A_s c / (c^H \Lambda_s c + \sigma_s^2)$ انجام تعداد کمی ساده‌سازی، مسأله به صورت (۱۰) بازنویسی می‌شود

$$\begin{aligned} \max_c \frac{c^H A_r c}{c^H \Lambda_r c + \sigma_r^2} \\ \text{s.t. } c^H \Omega_R c = \gamma_r, \quad \frac{c^H A_s c}{c^H \Lambda_s c + \sigma_s^2} = \gamma_s \end{aligned} \quad (10)$$

با تعریف $X \triangleq cc^H$ و استفاده از روش SDR، مسأله (۱۰) به صورت (۱۱) بازنویسی می‌شود

$$\begin{aligned} \max_X \frac{\text{Tr}(A_r X)}{\text{Tr}(\Lambda_r X) + \sigma_r^2} \\ \text{s.t. } \text{Tr}(\Omega_R X) = \gamma_r \\ \frac{\text{Tr}(A_s X)}{\text{Tr}(\Lambda_s X) + \sigma_s^2} = \gamma_s \\ X \geq 0, \quad \text{rank}(X) = 1 \end{aligned} \quad (11)$$

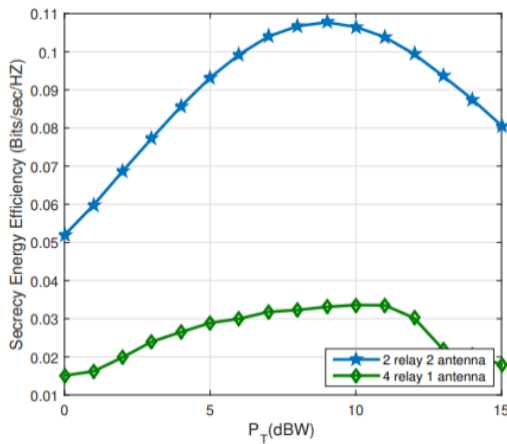
رابطه $X \triangleq cc^H$ معادل آن است که ماتریس X رتبه یک^۱ باشد. شرط رتبه یک بودن ماتریس X در مسأله فوق، یک شرط غیر محدب است. برای حل این مسأله می‌توان آن را از (۱۱) حذف کرد و نسخه آزادشده‌ای^۲ از آن را در اختیار داشت. به کمک تبدیل چارنز-کوپر^۳ می‌توان مسأله فوق را به شکل ساده‌تری نوشت [۲۰]. برای به کارگیری این تبدیل، ماتریس Y و اسکالر ζ که به ترتیب ماتریس معین مثبت^۴ و عدد مثبت هستند، به گونه‌ای که رابطه $X = Y/\zeta$ برقرار باشد، تعریف می‌شوند. بنابراین مسأله فوق به صورت (۱۲)، به یک مسأله برنامه‌ریزی نیمه‌معین (SDP) ساده می‌شود

$$\begin{aligned} \max_{Y, \zeta} \text{Tr}(A_r Y) \\ \text{s.t. } \text{Tr}(\Omega_R Y) = \gamma_r \zeta \\ \text{Tr}(\Lambda_r Y) + \sigma_r^2 \zeta = 1 \\ \text{Tr}((A_s - \gamma_s \Lambda_s) Y) = \gamma_s \sigma_s^2 \zeta \\ Y \geq 0, \quad \zeta > 0 \end{aligned} \quad (12)$$

برای حل مسأله فوق، می‌توان از روش‌های نقطه درونی مانند بسته نرم‌افزاری CVX استفاده کرد [۲۱]. در این راستا، مسأله (۱۲) به ازای مقادیر مختلف γ_r و γ_s حل شده و در نهایت زمانی که تابع هدف مسأله (۹) بیشترین مقدار ممکن را داشته باشد، بهترین جواب مشخص می‌شود. در پیوست ۲ [۳]، چگونگی تعیین حد پایین و بالا جهت جستجوی γ_r

5. Principal Eigenvector
6. Randomization Techniques
7. Feasible Set

1. Rank One
2. Relaxed Version
3. Charnes-Cooper
4. Positive Definite



شکل ۲: مقایسه بهره‌وری انرژی امن در شبکه‌های شامل دو رله دوآنتنی و چهار رله تک‌آنتنی.

در (۱۸) و (۱۹)، پارامتر مثبت ε ، بیانگر دقت جواب حاصل از روش‌های نقطه درونی است. همچنین M_{γ_r} ، M_{γ_c} ، M_{γ_s} به ترتیب تعداد گام‌های جستجو بر روی متغیرهای γ_r ، γ_c ، γ_s است.

۳- نتایج عددی

در این قسمت، نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی محاسبه بهره‌وری انرژی امن در شبکه شامل چند رله چندآنتنی ارائه شده است. جهت محاسبه نتایج، کانال‌های میان کاربران و رله‌ها یعنی f_r و g_r و بردار کانال میان رله‌ها و شنودگر یعنی h_e با توزیع مختلط گوسی با میانگین صفر و ماتریس کواریانس I فرض شده‌اند. همچنین ضرایب کانال‌های بین کاربران و شنودگر یعنی h_e و g_e ، با توزیع مختلط گوسی و واریانس واحد تولید شده‌اند. در تمام نمودارها، توان نویزها برابر در نظر گرفته شده‌اند و به عبارت دیگر، رابطه $\sigma_{E,i}^2 = \sigma_i^2 = 0$ dB که $i = 1, 2$ برقرار است. مقادیر سایر پارامترها در جدول ۱ مشخص شده است.

جهت رسم نمودارهای بهره‌وری انرژی امن با استفاده از دو روش NSBF و ILABF، پس از مشخص نمودن محدوده متغیرهای کمکی γ_r ، γ_c و γ_s ، مسأله‌های SDP متناظر (۱۲) و (۱۷) به ازای مقادیر مختلف آنها حل می‌شود. در نهایت، از بین پاسخ‌های به دست آمده، بیشترین مقدار انتخاب می‌شود. همچنین به منظور ارزیابی عملکرد متوسط، این مراحل به ازای تحقق‌های مختلف کانال انجام شده و میانگین پاسخ‌های به دست آمده به ازای هر توان محاسبه می‌شود. تکرار این روند تا زمانی که اختلاف بین نتایج دو مرحله متوالی کمتر از 0.0001 نشود، ادامه دارد.

در شکل ۲، میانگین بهره‌وری انرژی امن بر حسب توان کل در شبکه شامل دو رله دوآنتنی رسم گردیده و از روش NSBF استفاده شده است. ملاحظه می‌شود که نمودار مربوط در ابتدا افزایشی و سپس کاهش‌ی است. علت این مسأله آن است که با افزایش توان کل شبکه به بیش از ۹ dBW، نرخ مجموع امن نسبت به توان مصرفی شبکه، رشد کمتری داشته است. همچنین جهت مقایسه، بهره‌وری انرژی امن در شبکه شامل چهار رله تک‌آنتنی نیز مشخص شده است. در این قسمت، به دلیل آن که مقایسه عادلانه باشد، حاصل ضرب تعداد آنتن‌ها و رله‌ها مقدار ثابتی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که شبکه شامل چند رله تک‌آنتنی تک‌جهتی در [۱۶]، مورد بررسی قرار گرفته که در شکل ۲ مطابق با شرایط فرض شده در این مقاله، رسم شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، در شبکه شامل چند رله چندآنتنی، بهره‌وری انرژی امن،

جدول ۱: مقدار پارامترها در نتایج عددی.

مقدار	پارامتر
-15 dBW	کل توان شبکه (P_T)
$0.8P_T$	مجموع توان مفید و اتلافی رله‌ها ($p_r + p_c$)
$0.2P_T$	مجموع توان مفید و اتلافی کاربران ($p_u + p_{cu}$)
0.65	بهره‌وری تقویت‌کننده توان (η)
$M = 2$ و $N = 2$	تعداد آنتن‌ها و رله‌ها در شبکه چندرله چندآنتنی
$0.35(p_r + p_c)$	توان اتلافی رله‌ها
$0.35(p_u + p_{cu})$	توان اتلافی کاربران

بنابراین مسأله بهره‌وری انرژی امن به صورت (۱۶) است

$$\max_{\gamma_c} \left\{ \frac{\frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{c^H A_r c}{c^H \Lambda_r c + \sigma_r^2} \right) \left(1 + \frac{c^H A_s c}{c^H \Lambda_s c + \sigma_s^2} \right)}{c^H \Omega_R c + p_c + p_u + p_{cu}} - \frac{\frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\eta p_r |g_e|^2 + \eta p_s |f_e|^2}{\sigma_{E,s}^2} + \frac{c^H A_r c}{\sigma_{E,r}^2 + c^H \Lambda_r c} \right)}{c^H \Omega_R c + p_c + p_u + p_{cu}} \right\} \quad (16)$$

s.t. $p_r \leq P_R$

که A_r ، A_s ، Λ_r و Λ_s مطابق (۶) و Ω_R مطابق (۸) تعریف می‌شوند. جهت حل این مسأله، متغیرهای γ_r و γ_s مطابق متغیرهای (۱۰) و $\gamma_c = c^H A_r c / (\sigma_{E,r}^2 + c^H \Lambda_r c)$ است. سپس مشابه روش NSBF، با تعریف $X = cc^H$ ، استفاده از روش SDP و حذف شرط رتبه یک و سپس استفاده از تبدیل چارنر-کوپر به صورت $X = Y/\zeta$ ، شکل SDP مسأله (۱۶) به صورت (۱۷) خواهد بود

$$\begin{aligned} & \max_{Y, \zeta} Tr(A_r Y) \\ & \text{s.t. } Tr(\Omega_R Y) = \gamma_c \zeta \\ & Tr((A_r - \gamma_c \Lambda_r) Y) = \gamma_c \sigma_r^2 \zeta \\ & Tr((A_s - \gamma_s \Lambda_s) Y) = \gamma_s \sigma_s^2 \zeta \\ & Tr(\Lambda_s Y) + \sigma_s^2 \zeta = 1 \\ & Y \geq 0, \zeta > 0 \end{aligned} \quad (17)$$

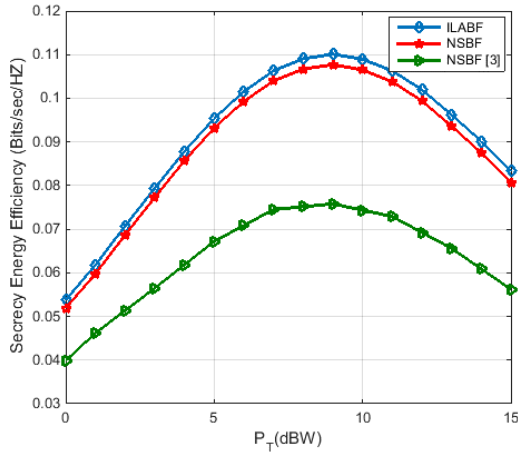
جهت یافتن پاسخ (۱۷)، لازم است که ابتدا بر روی متغیرهای کمکی γ_r و γ_c مطابق با کران‌های پیوست ۲ [۳]، جستجو انجام شود. حد پایین γ_r نیز برابر صفر و حد بالای آن برابر P_R است. به ازای هر مقدار این متغیرها که تابع هدف (۱۶) بیشینه شود، بهترین جواب مشخص می‌شود. در صورتی که این جواب رتبه یک باشد، پاسخ بهینه به دست خواهد آمد. در غیر این صورت با استفاده از روش‌های تصادفی کردن، پاسخ نزدیک بهینه حاصل می‌شود.

در نتایج عددی، پاسخ مسأله (۱۷) به ازای تعداد زیادی از تحقق‌های کانال، رتبه یک بوده و بنابراین پاسخ نهایی به عنوان پاسخ بهینه مسأله (۱۶) است.

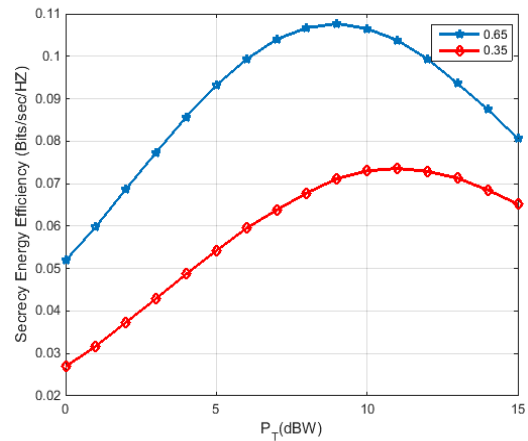
با استفاده از [۲۳]، پیچیدگی محاسباتی مسأله مورد نظر با استفاده از دو روش NSBF و ILABF به ترتیب به صورت (۱۸) و (۱۹) است

$$O(M_{\gamma_s} M_{\gamma_r} \max\{\varepsilon, (MN^2 - 2)\}^2 (MN^2 - 2)^2 \log \frac{1}{\varepsilon}) \quad (18)$$

$$O(M_{\gamma_s} M_{\gamma_r} M_{\gamma_c} \max\{\delta, (MN^2 - 1)\}^2 (MN^2 - 1)^2 \log \frac{1}{\varepsilon}) \quad (19)$$



شکل ۴: مقایسه بهره‌وری انرژی امن با استفاده از دو روش ILABF و NSBF.



شکل ۳: بهره‌وری انرژی امن بر حسب توان کل شبکه با در نظر گرفتن η مختلف.

مقدار بیشتری را نسبت به شبکه چندرله تک‌آنتنی به خود اختصاص داده است. علت این مسأله، وجود همکاری بین آنتن‌ها در شبکه شامل چند رله چندآنتنی است.

در شکل ۳، میانگین بهره‌وری انرژی امن (η) با در نظر گرفتن ضرایب تقویت‌کننده ۰/۶۵ و ۰/۳۵ در شبکه شامل دو رله دوآنتنی رسم شده است. در نظر گرفتن این اعداد به ترتیب مطابق با ضرایب تقویت‌کننده‌های کلاس A و B است [۱۹]. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با کاهش η ، توان تلفاتی، افزایش و در نتیجه بهره‌وری انرژی کاهش یافته است. همچنین به علت این که با افزایش η ، رشد نرخ مجموع امن افزایش پیدا می‌کند، شیب نمودار بهره‌وری انرژی امن با در نظر گرفتن ضریب تقویت‌کننده ۰/۶۵ بیشتر از ۰/۳۵ است.

شکل ۴ به مقایسه میانگین بهره‌وری انرژی امن با استفاده از دو روش ILABF و NSBF در شبکه دورله دوآنتنی با فرض $\eta = ۰/۶۵$ می‌پردازد. روش NSBF در پژوهش [۱۵] استفاده شده است که در شکل ۴ مطابق شرایط در نظر گرفته شده در این مقاله، رسم گردیده است. ملاحظه می‌شود که با استفاده از روش ILABF به بهره‌وری انرژی امن بیشتری نسبت به روش NSBF می‌توان دست یافت که علت این مسأله، وجود یک درجه آزادی بیشتر برای ماتریس شکل‌دهی پرتو با استفاده از روش ILABF است. همچنین جهت مقایسه، بهره‌وری انرژی با استفاده از بردار شکل‌دهی پرتو مشخص شده در [۳] با روش NSBF نیز رسم شده است. به علت این که هدف در این مرجع، بهینه‌سازی نرخ مجموع امن بوده و با توجه به آن بردار شکل‌دهی پرتو محاسبه شده است، میزان بهره‌وری انرژی امن در این حالت کمتر از مسایل ارائه شده در این مقاله است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسأله بهره‌وری انرژی امن در شبکه‌های رله دوجبهتی مورد بررسی قرار گرفته است. ملاحظه شده که مسأله مورد نظر غیر محدب است و با استفاده از روش آزادسازی نیمه‌معین (SDR)، مسأله به صورت محدب تبدیل می‌شود. نهایتاً پاسخ مسأله محدب نیز با استفاده از بسته نرم‌افزاری CVX محاسبه می‌شود. در بخش نتایج عددی، با مقایسه دو روش شکل‌دهی پرتو بر پایه هم‌ترازی تداخل (ILABF) و روش شکل‌دهی پرتو در فضای پوچ (NSBF) که در برخی از پژوهش‌های پیشین استفاده شده است، مشاهده شده که روش ارائه شده، عملکرد بهتری را در پی دارد.

مراجع

- [1] L. Lv, F. Zhou, J. Chen, and N. Al-Dhahir, "Secure cooperative communications with an untrusted relay: a NOMA-inspired jamming and relaying approach," *IEEE Trans. on Information Forensics and Security*, vol. 14, no. 12, pp. 3191-3205, Dec. 2019.
- [2] M. Luo, X. Li, J. Wang, Q. Yin, W. Tang, and S. Li, "Secure transmission schemes for two-way relay networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 50148-50158, Apr. 2019.
- [3] S. F. Bozorgi and S. Akhlaghi, "Secrecy sum rate maximisation in multi-antenna two-way relay networks," *IET Communications*, vol. 14, no. 4, pp. 541-548, Mar. 2020.
- [4] M. Gong, J. Zheng, and H. Chen, "Energy-efficient power allocation and user selection in amplify-and-forward relay networks," in *Proc. 8th Int. Conf. on Wireless Communications & Signal Processing, WCSP'16*, , 5 pp., Yangzhou, China, 13-15 Oct. 2016.
- [5] M. Mirzaee and S. Akhlaghi, "Beamforming strategies for multi-antenna relay-assisted networks," *IET Communications*, vol. 10, no. 11, pp. 1384-1393, Jul. 2016.
- [6] E. Khordad, S. Akhlaghi, and M. Mirzaee, "Maximising the minimum achievable secrecy rate of two-way relay networks using the null space beamforming method," *IET Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 793-800, May 2017.
- [7] B. Rankov and A. Wittneben, "Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 25, no. 2, pp. 379-389, Feb. 2007.
- [8] J. Zhang and M. Haardt, "Energy efficient two-way non-regenerative relaying for relays with multiple antennas," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 22, no. 8, pp. 1079-1083, Aug. 2015.
- [9] D. Feng, C. Jiang, G. Lim, L. J. Cimini, G. Feng, and G. Y. Li, "A survey of energy-efficient wireless communications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 167-178, Feb. 2013.
- [10] Z. Fei, N. Li, C. Xing, and S. Gong, "Energy-efficient transceiver design for multi-pair two-way relay systems," *China Communications*, vol. 12, no. 9, pp. 133-140, Sept. 2015.
- [11] K. Singh, M. Ku, and J. Lin, "Power control for achieving energy-efficient multiuser two-way balancing relay networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP'14*, pp. 2749-2753, Florence, Italy, 4-9 May 2014.
- [12] I. Priyadarshini and S. Nandakumar, "The energy efficient power allocation for multiple relay-aided D2D communication in 5G networks using iterative algorithm," in *Proc. Int. Conf. on Vision Towards Emerging Trends in Communication and Networking, ViTECoN'19*, 5 pp., Vellore, India, 4-9 May 2019.
- [13] A. D. Wyner, "The wire-tap channel," *Bell System Technical J.*, vol. 54, no. 8, pp. 1355-1387, Oct. 1975.
- [14] I. Csiszar and J. Korner, "Broadcast channels with confidential messages," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 24, no. 3, pp. 339-348, May 1978.
- [15] A. Kalantari, S. Maleki, S. Chatzinotas, and B. Ottersten, "Secrecy energy efficiency optimization for MISO and SISO communication networks," in *Proc. IEEE 16th Int. Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, SPAWC'15*, pp. 21-25, Stockholm, Sweden, 28 Jun-1 Jul. 2015.
- [16] J. Ouyang, M. Lin, W. Zhu, T. Hong, and B. Xu, "Distributed-relay beamforming for secrecy energy efficiency with coordinated

سیده فاطمه بزرگی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات سیستم به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۷ از دانشگاه شاهد به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: بهینه‌سازی برای تخصیص منابع در شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم، مخابرات مشارکتی و امنیت لایه فیزیکی.

سروش اخلاقی اصفهانی در سال ۱۳۷۸ مدرک کارشناسی برق خود را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و در سال ۱۳۸۰ مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی برق- مخابرات سیستم از دانشگاه صنعتی امیرکبیر اخذ نمود و همچنین در سال ۱۳۸۶ دوره دکتری خود را در دانشگاه علم و صنعت ایران در گرایش مخابرات سیستم به اتمام رساند. ایشان از سال ۱۳۸۹ تاکنون در دانشگاه شاهد مشغول فعالیت‌های علمی و پژوهشی می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان سیستم‌های چند ورودی چند خروجی (MIMO)، سیستم‌های ذخیره‌سازی توزیع یافته، کدینگ کانال و کدینگ منبع می‌باشند.

eavesdroppers," *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 5, pp. 1054-1057, Feb. 2018.

- [17] S. Zhao, J. Liu, Y. Shen, X. Jiang, and N. Shiratori, "Secure and energy-efficient beamforming for MIMO two-way untrusted relay systems," in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conf., WCNC'19*, 6 pp., Marrakesh, Morocco, 15-18 Apr. 2019.
- [18] E. Tekin and A. Yener, "The general gaussian multiple-access and two-way wiretap channels: achievable rates and cooperative jamming," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 54, no. 6, pp. 2735-2751, Jun. 2008.
- [19] S. Cui, A. J. Goldsmith, and A. Bahai, "Modulation optimization under energy constraints," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications*, vol. 4pp. 2805-2811, , Anchorage, AK, USA, 11-15 May 2003.
- [20] A. Charnes and W. W. Cooper, "Programming with linear fractional functional," *Nav. Res. Logist. Q.*, vol. 9, no. 3-4, pp. 181-186, Sept. 1962.
- [21] M. Grant and S. Boyd, "CVX: Matlab software for disciplined convex programming," Available at <http://cvxr.com/cvx>, Sept. 2010.
- [22] S. Zhang, "Quadratic maximization and semidefinite relaxation," *Math. Program*, vol. 87, no. 3, pp. 453-465, May 2000.
- [23] Z. Q. Luo, W. K. Ma, A. M. C. So, Y. Ye, and S. Zhang, "Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 27, no. 3, pp. 20-34, Apr. 2010.