

بهینه‌سازی توأم توان- مکان رله در شبکه‌های رله هوایی همکارانه برای 5G+

حمید امیری‌آرا، محمدرضا ذهابی و وحید مقدادی

تحرك و چابکی اصلی‌ترین ویژگی رله‌های هوایی است که آن را از رله‌های زمینی برتری می‌بخشد. این امر امکان ایجاد سریع شبکه و اصلاح انعطاف‌پذیر پیکربندی شبکه و محل رله را برای بهبود عملکرد شبکه فراهم می‌آورد [۳].

این رله‌ها در مواقع شلوغی به سرعت در ایجاد شبکه تکمیلی بی‌سیم برای کمک به شبکه‌های موجود به کار می‌روند و همچنین در مواقع اضطراری که شبکه زمینی دچار مشکل می‌شود، ارتباط لازم برای فعالیت تیم‌های امدادی را فراهم می‌کنند [۴]. کاربرد دیگر شبکه‌های رله هوایی در ارائه ارتباطات بی‌سیم برای رویدادهای موقت مانند رویدادهای ورزشی است [۵]. رله‌های هوایی همچنین می‌توانند در جمع‌آوری داده‌ها از پایانه‌های زمینی مانند سنسورها یا برقراری ارتباط بین اعضای تیم‌هایی که در مناطق دور (مانند تیم‌های علمی و نجات) کار می‌کنند، کمک کنند [۶]. کاربرد مهم دیگر برقراری ارتباط و اینترنت در مناطقی است که ایجاد شبکه زمینی پرهزینه است، زیرا شبکه رله هوایی به دلیل عدم نیاز به کابل‌های توزیع و برج‌های مورد نیاز در آنجا از نظر زیرساختی ارزان‌تر خواهند بود [۷]. برای همه این کاربردهای بالقوه رله‌های هوایی در ارتباطات بی‌سیم، در این مقاله یکی از بزرگترین چالش‌ها در طراحی شبکه‌های رله هوایی همکارانه، یعنی بهینه‌سازی توان و موقعیت رله هوایی با توجه به کاربران زمینی مورد بررسی قرار گرفته شده است، به گونه‌ای که این شبکه بتواند بیشترین بازدهی را داشته باشد.

۱-۱ مرور مقالات

اگرچه تحقیقات گسترده‌ای برای شبکه‌های همکارانه رله هوایی مبتنی بر هواپیماهای بدون سرنشین (UAV) انجام شده است اما تمرکز تعداد کمی از مقالات به استقرار کارآمد رله هوایی به عنوان رله متحرک و مدیریت توان آن می‌باشد.

به طور مثال [۸] تا [۱۲] بر استفاده از سیستم‌های هوایی به عنوان ایستگاه‌های پایه^۴ (BS)، با فرض سیگنال‌های دید مستقیم^۵ (LoS) قوی (مثل [۸]، [۹] و [۱۱]) یا تأکید بر اثر محوشوندگی (مثل [۱۰] و [۱۲]) تمرکز نمودند.

در [۱۳]، استقرار بهینه رله هوایی با پروتکل رمزگشایی و ارسال^۶ (DF) با هدف کمینه‌کردن احتمال قطع با توجه به فاصله رله از زمین برای کانال‌های محوشونده رایس^۷ مورد بررسی قرار گرفت. در [۱۴]، سناریویی که در آن یک UAV به عنوان رله برای اتصال دو گره زمین

چکیده: شبکه‌های سلولی در نسل آینده 5G+، نوید نرخ‌های بالای داده، خدمات آماده به کار در همه جا و انعطاف‌پذیری را می‌دهند. استفاده از ساختار شبکه‌های رله هوایی همکارانه (CARN) امکان گسترش پوشش شبکه، افزایش ظرفیت و ارتباط مطمئن‌تر را فراهم می‌نماید. این مقاله قصد دارد تا در یک شبکه CARN، اختصاص توان و محل قرارگیری رله هوایی (AR) تقویت و ارسال (AF) را با هدف به حداقل رساندن احتمال خطا بهینه نماید. برای دست‌یافتن به این اهداف، ابتدا احتمال خطای سمبل متوسط برای این سیستم در کانال ناکاگامی- m به ازای مدولاسیون‌های مختلف محاسبه می‌گردد. سپس سه سناریو در نظر گرفته می‌شود. ابتدا محل رله با هر نسبت تخصیص توان داده شده به منبع و رله، بهینه‌سازی می‌شود. دوم مسئله بهینه‌سازی تخصیص توان برای مکان‌های رله مختلف حل می‌شود. در نهایت، مسئله بهینه‌سازی توأم مکان بهینه رله و اختصاص توان بهینه که منجر به کارایی هرچه بیشتر سیستم می‌گردد، به صورت ریاضی بیان و الگوریتمی برای حل این مسئله پیشنهاد می‌شود. همچنین اثرات ارتفاع رله هوایی، فاکتور تضعیف و پارامتر محوشدگی کانال بر اختصاص توان و مکان رله هوایی بهینه در این مقاله بررسی شده است. در انتها شبیه‌سازی و نتایج عددی برای تأیید روابط تئوری ارائه گردیده که شبیه‌سازی‌ها بهره بیش از 1 dB را برای سیستم بهینه‌شده در مقایسه با سیستم غیر بهینه نشان می‌دهند.

کلیدواژه: شبکه‌های رله هوایی همکارانه، رله هوایی، احتمال خطای سمبل متوسط، مخابرات نسل 5G+.

۱- مقدمه

شبکه‌های نسل پنجم^۱ (5G) که پیش‌بینی می‌شود به زودی در سال ۲۰۲۰ پیاده‌سازی شوند، از میانگین داده‌های ترافیکی ۱۰۰۰ برابر بالاتر، افزایش ۱۰ تا ۱۰۰ برابری در نرخ داده‌ها و تعداد دستگاه‌های متصل پشتیبانی می‌کنند [۱]. یکی از راه‌حل‌های توانمند برای پاسخگویی به این تقاضاها، متراکم‌نمودن شبکه سلولی با استقرار رله‌های غیر زمینی با قابلیت پرواز، همانند هواپیمای بدون سرنشین^۲ (UAV) با عنوان شبکه‌های رله هوایی همکارانه^۳ (CARNs) می‌باشد [۲].

این مقاله در تاریخ ۳۰ آذر ماه ۱۳۹۸ دریافت و در تاریخ ۶ شهریور ماه ۱۳۹۹ بازنگری شد.

حمید امیری‌آرا، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، (email: h.m.amiri@stu.nit.ac.ir).

محمدرضا ذهابی (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، (email: zahabi@nit.ac.ir).

وحید مقدادی، آزمایشگاه‌های مدارات و سیستم‌های فرکانس بالا، دانشگاه لیژو، لیژو، فرانسه، (email: Meghdadi@ensil.unilim.fr).

4. Base Station

5. Line-of-Sight

6. Decode-and-Forward

7. Rician

1. Fifth Generation

2. Unmanned Aerial Vehicle

3. Cooperative Airborne Relay Networks

مقاله به دلیل پیاده‌سازی آسان و همچنین بهره‌وری انرژی بالاتر در مقایسه با سایر پروتکل‌ها، پروتکل رله AF فرض شده است. با توجه به دانش نویسندگان، هیچ مرجع قبلی تا کنون به بهینه‌سازی توأم توان- مکان رله در سیستم‌های همکارانه با رله هوایی تقویت و ارسال در محیط ۳بعدی (D-۳)، با هدف کمینه‌کردن احتمال خطا نپرداخته است. در این مقاله به بررسی (۱) محل رله بهینه با تخصیص توان معین، (۲) تخصیص توان بهینه با محل رله معین و (۳) بهینه‌سازی توأم توان- مکان رله به منظور به حداقل رساندن حد بالا احتمال خطای متوسط در CARN بر روی کانال با محوشوندگی ناکاگامی m پرداخته می‌شود.

۲-۱ دستاوردها

دستاوردهای این مقاله را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود: (۱) تعیین حد بالای احتمال خطای سمبل متوسط برای شبکه CARN با رله همکار AF (AF-CARN) در کانال ناکاگامی m برای مدولاسیون‌های متفاوت، (۲) بررسی و تعیین محل بهینه استقرار رله همکار هوایی در یک محیط ۳بعدی با اختصاص توان معین، (۳) بهینه‌سازی اختصاص توان به رله و منبع با فرض استقرار رله همکار هوایی در مکان مشخص با هدف کاهش احتمال خطای متوسط، (۴) بررسی مسئله بهینه‌سازی توأم توان- مکان رله هوایی و ارائه الگوریتم برای تعیین این پارامترها و (۵) بررسی اثر فاکتور تضعیف محیط، پارامتر محوشوندگی کانال و ارتفاع رله در اختصاص توان و محل استقرار بهینه رله.

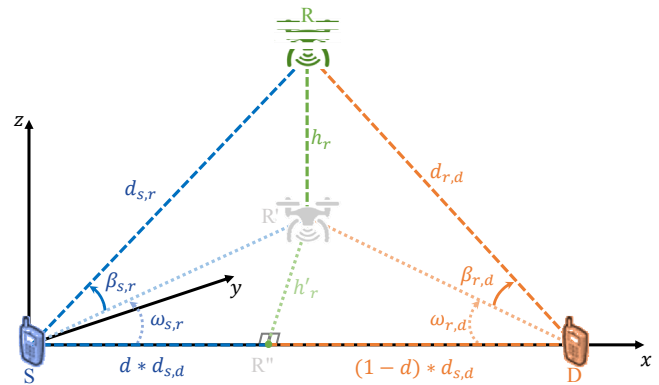
در ادامه، مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است: بخش دوم مدل سیگنال را معرفی می‌کند. در بخش سوم، احتمال خطا برای شبکه AF-CARN، در کانال ناکاگامی m برای مدولاسیون‌های متفاوت محاسبه گردید. در بخش چهارم، به بهینه‌سازی توأم توان- مکان رله برای رسیدن به حداقل احتمال خطا پرداخته شده است. نتایج و بررسی آنها در بخش پنجم قرار داده شده و در نهایت، بخش ششم شامل نتیجه‌گیری این مقاله است.

۲-۲ مدل شبکه رله هوایی همکارانه

۱-۲ مشخصات هندسی شبکه رله هوایی همکارانه

در این مقاله، یک جانمایی ۳بعدی (D-۳) واقعی از کاربران تلفن همراه در سطح زمین و رله هوایی با پروتکل AF در نظر گرفته می‌شود (همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است)، که در آن یک گره منبع (S) وجود دارد که با گره مقصد (D) زمینی از طریق رله هوایی (R) ارتباط برقرار می‌کند.

R' تصویر این رله هوایی را در صفحه xy و نقطه R'' تصویر این نقطه را بر خط واصل S-D نشان می‌دهد. همچنین h_r ارتفاع رله از سطح زمین است که مطابق با حداقل ارتفاع مورد نیاز برای ملاحظات ایمنی، به عنوان مثال برای جلوگیری از برخورد با زمین یا ساختمان‌ها، مشخص می‌شود. h'_r فاصله R' از خط اتصال S-D است. فرض بر این است که گره رله از نوع هوایی شبه‌ایستا است یعنی می‌توان رله را در یک مکان خاص برای تقویت سیگنال قرار داد. محل رله دیده‌شده از S (D) را می‌توان با زاویه سمت $\omega_{s,r}$ ($\omega_{r,d}$) و زاویه ارتفاع $\beta_{s,r}$ ($\beta_{r,d}$) مشخص نمود. در اینجا فاصله لینک میان منبع- رله، لینک رله- مقصد و لینک منبع- مقصد را به ترتیب با $d_{s,r}$ ، $d_{r,d}$ و $d_{s,d}$ نمایش دهیم. با



شکل ۱: مشخصات هندسی شبکه‌های رله هوایی همکارانه (CARN).

ثابت عمل می‌کند، ارائه شده و موقعیت رله‌ای که قابلیت مانور دایره‌ای دارد، با هدف بیشینه‌نمودن بازدهی انرژی بهینه شده است. در [۱۵]، موقعیت یک پهپاد به عنوان رله در یک ناحیه زمینی خاص بدون ارائه موقعیت بهینه سراسری با هدف افزایش گذردهی بیان شد. نتایج در [۱۶] برای یک سیستم ارتباطی بین دو گره زمینی با کمک رله هوایی، نشان داد که در یک هندسه خاص استقرار رله در فاصله افقی بهینه بین گره‌های زمینی نسبت به فاصله میانه به طور قابل توجهی بر ظرفیت کل سیستم تأثیر می‌گذارد. در [۱۷] و [۱۸]، یک سیستم رله هوایی در نظر گرفته شد و بهینه‌سازی توأم اختصاص توان و خط حرکت رله با هدف بیشینه‌سازی گذردهی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین [۱۹] به بررسی تأثیر زاویه و ارتفاع مطلوب رله هوایی با پروتکل رمزگشایی و ارسال بر روی احتمال قطع سیستم در کانال محوشونده گاما پرداخته است. نتایج در [۲۰] نشان می‌دهد که روش بهینه‌سازی سیستم‌های نقطه‌به‌نقطه به طور قابل توجهی با بهینه‌سازی سیستم‌های مبتنی بر رله هوایی تفاوت دارد. در [۲۱] نیز یک سیستم CARN در نظر گرفته شد و یک روش بهینه‌سازی برای محل استقرار رله رمزگشایی و ارسال بر اساس احتمال قطع سیستم ارائه شده است. در [۲۲] نویسندگان به معرفی مسئله بهینه‌سازی اختصاص توان و مکان در شبکه‌های مخابرات همکارانه در کانال رایلی و حالت خاص محیط‌های با تلفات فضای آزاد $v=2$ پرداختند. در مدل سیستم این مقاله محل رله در خط واصل بین منبع- مقصد فرض شده بود. همچنین در این مقاله رابطه بسته یا الگوریتمی برای حل این مسئله ارائه نگردید. در [۲۳] نویسندگان به بهینه‌سازی محل استقرار و اختصاص توان رله زمینی در یک محیط دوبعدی (D-۲) پرداختند و اثر بهینه‌سازی این دو پارامتر را در کارایی سیستم اثبات نمودند.

اکثر مطالعات پیشین در زمینه شبکه‌های مخابرات همکارانه در کانال با محوشوندگی رایلی انجام شده است. اما همان طور که می‌دانید، در CARN در شبکه‌های 5G+ به علت قرار گرفتن رله در بالای منبع و رله (به شکل ۱ مراجعه شود)، علاوه بر سیگنال‌های ناشی از چندمسیرگی، سیگنال دید مستقیم (LoS) نیز وجود دارد و در نظر گرفتن مدل کانال به صورت رایلی که تنها چندمسیرگی‌های غیر مستقیم بین فرستنده و گیرنده را مدل می‌کند، در این سیستم‌ها کاربرد ندارد. همچنین توزیع ناکاگامی m یک توزیع کلی می‌باشد که توزیع نویز گوسی جمع‌شونده، رایلی و ریس را در موارد خاص پارامتر محوشوندگی (m) در بر می‌گیرد. در نتیجه برای مدل‌سازی توزیع محوشوندگی کانال در سناریوهای انتشار هوا به زمین، رفتار کانال به صورت توزیع ناکاگامی m است [۲۴]. همچنین در این

$$f_{\gamma_{i,j}}(\gamma) = \frac{m^m \gamma^{m-1}}{\bar{\gamma}_{i,j}^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}_{i,j}}\right), \gamma_{i,j} > 0 \quad (7)$$

صورت قابل بیان است که در آن $\bar{\gamma}_{i,j} = \mathbb{E}(|h_{i,j}|^2)P/N$. نشان دهنده مقدار میانگین سیگنال به نویز $\gamma_{i,j}$ می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌نمایید، تابع چگالی احتمال به دست آمده در (7)، همان تابع چگالی احتمال گاما با پارامتر شکل m و پارامتر مقیاس $m/\bar{\gamma}_{i,j}$ یعنی $f_{\gamma_{i,j}}(\gamma_{i,j}) = \text{Gamma}(m/\bar{\gamma}_{i,j}, m)$ می‌باشد.

نویزهای $n_{s,r}$ ، $n_{r,d}$ ، $n_{s,d}$ و $n_{s,r}$ به صورت متغیرهای تصادفی گوسی مختلط با میانگین صفر و واریانس N مدل می‌شوند. ضریب تقویت برای نرمالیزه کردن توان سیگنال ارسالی در رله به صورت

$$\beta_r = \frac{1}{\sqrt{P_s |h_{s,r}|^2 + N}} \quad (8)$$

در نظر گرفته می‌شود [۲۵]. با جایگذاری (۴) و (۸) در (۵)، سیگنال دریافتی توسط مقصد از رله به صورت

$$y_{r,d}[n] = \tilde{h}_{r,d} x[n] + \tilde{n}_{r,d}[n] \quad (9)$$

قابل بیان است که در آن $\tilde{h}_{r,d} = \sqrt{P_s P_r / (P_s |h_{s,r}|^2 + N)} h_{r,d} h_{s,r}$ و

$\tilde{n}_{r,d}[n] = \sqrt{P_r / (P_s |h_{s,r}|^2 + N)} h_{r,d} n_{s,r}[n] + n_{rd}[n]$ نتیجه یک متغیر تصادفی گوسی مختلط با میانگین صفر و واریانس $(P_r |h_{r,d}|^2 / (P_s |h_{s,r}|^2 + N) + 1)N$ می‌توان نشان داد سیگنال به نویز (SNR) لحظه‌ای در خروجی ترکیب کننده بیشینه نرخ^۵ (MRC) با استفاده از وزن‌های بهینه برابر با $\gamma_\Sigma = \gamma_s + \gamma_r$ می‌شود [۲۵] که در آن γ سیگنال به نویز لحظه‌ای مسیر مستقیم منبع به مقصد

$$\gamma_s = \frac{P_s |h_{s,d}|^2}{N} \quad (10)$$

و γ_r سیگنال به نویز لحظه‌ای مسیر غیر مستقیم تقویت شده توسط رله

$$\gamma_r = \frac{\frac{P_s |h_{s,r}|^2}{N} \frac{P_r |h_{r,d}|^2}{N}}{1 + \frac{P_s |h_{s,r}|^2}{N} + \frac{P_r |h_{r,d}|^2}{N}} \quad (11)$$

می‌باشد که برای سیگنال به نویزهای زیاد عدد یک مخرج قابل صرف نظر است و γ_r به صورت

$$\gamma_r \approx \frac{1}{\frac{1}{\gamma_{s,r}} + \frac{1}{\gamma_{r,d}}} \quad (12)$$

زیر قابل تقریب زدن است که در آن $\gamma_{s,r} = P_s |h_{s,r}|^2 / N$ و $\gamma_{r,d} = P_r |h_{r,d}|^2 / N$. به ترتیب سیگنال به نویز لحظه‌ای مسیر منبع- مقصد و رله- مقصد می‌باشند که هر یک متغیرهای تصادفی با توزیع گاما می‌باشند.

اعمال رابطه فیثاغورس در مثلث‌های SRR' و $SR'R''$ می‌توان به

$$d_{s,r} = d_{s,d} \sqrt{d^2 + H^2} \quad (1)$$

دست یافت. به طور مشابه رابطه زیر از مثلث‌های $DR'R''$ و DRR' حاصل می‌گردد

$$d_{r,d} = d_{s,d} \sqrt{(1-d)^2 + H^2} \quad (2)$$

که $0 \leq d \leq 1$ پارامتر نسبت فاصله $(d \triangleq (d_{s,r} \cos \omega_{s,r} \cos \beta_{s,r}) / d_{s,d})$ و H فاصله رله از خط واصل S-D که نسبت به فاصله منبع از مقصد $(d_{s,d})$ نرمالیزه شده است $(H \triangleq \sqrt{h_r^2 + h_r'^2} / d_{s,d})$ می‌باشد.

۲-۲ مدل سیگنال

در فاز اول، منبع سمبل‌های مدوله شده داده x با توان نرمالیزه (یعنی $\mathbb{E}(|x|^2) = 1$) که در آن علامت $\mathbb{E}()$ نشان دهنده میانگین آماری است) را برای مقصد و رله منتشر می‌کند. سیگنال دریافتی در مقصد و رله در زمان n به ترتیب به صورت

$$y_{s,d}[n] = \sqrt{P_s} h_{s,d} x[n] + n_{s,d}[n] \quad (3)$$

$$y_{s,r}[n] = \sqrt{P_s} h_{s,r} x[n] + n_{s,r}[n] \quad (4)$$

مدل می‌شود که در آن P_s توان ارسال فرستنده می‌باشد و به ترتیب $h_{s,r}$ و $h_{s,d}$ ضرایب کانال و همچنین $n_{s,r}$ و $n_{s,d}$ نویزهای جمع شونده، کانال منبع- مقصد و کانال منبع- رله می‌باشند.

در فاز دوم، رله سیگنال دریافتی را تقویت و با ضریب β_r به گیرنده ارسال می‌نماید. سیگنال رسیده در مقصد را می‌توان به صورت

$$y_{r,d}[n] = \beta_r \sqrt{P_r} h_{r,d} y_{s,r}[n] + n_{r,d}[n] \quad (5)$$

نمایش داد که P_r نشان دهنده توان ارسالی رله، $h_{r,d}$ ضریب کانال و $n_{r,d}$ نویز جمع شونده می‌باشند.

۳-۲ مدل کانال

با توجه به این که کانال هوا به زمین رفتاری با مدل محوشدگی ناکاگامی دارد [۲۳]، در نتیجه اندازه کانال‌ها (یعنی $|h_{s,r}|$ و $|h_{s,d}|$) متغیر تصادفی ناکاگامی m - هستند و تابع چگالی اندازه کانال میان دو گره $(i, j) \in \{(s, r), (s, d), (r, d)\}$ به صورت

$$f_{r_{i,j}}(r) = \frac{\nu m^m r^{\nu m - 1}}{\Omega^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{mr^\nu}{\Omega}\right), r > 0 \quad (6)$$

تعریف می‌شود که $\Omega = \mathbb{E}[r^\nu]$ برابر با $\Omega = \int_0^\infty t^{m-1} e^{-t} dt$ ، نشان دهنده تابع گاما^۱ و m پارامتر محوشدگی کانال ناکاگامی می‌باشد $[m \triangleq \Omega^\nu / \mathbb{E}[(r^\nu - \Omega)^\nu]]$ که مقدار آن از ۰/۵ تا ∞ با توجه به محوشدگی کانال تعیین می‌گردد و برای حالت خاص $m = 1$ ، مدل رایلی^۲ پدید خواهد آمد.

۴-۲ محاسبه سیگنال به نویز سیستم CARN

سیگنال به نویز لحظه‌ای میان گره i و j به صورت $\gamma_{i,j} = r_{i,j}^\nu P / N$ قابل نمایش می‌باشد و تابع چگالی احتمال آن با استفاده از تغییر متغیر تصادفی $\gamma_{i,j} = Pr_{i,j}^\nu / N$ به (۶) به

3. Shape Parameter
4. Scale Parameter
5. Maximum Ratio Combining

1. Gamma Function
2. Rayleigh

نویز زیاد، در رابطه احتمال خطا (۱۳)، حد بالایی احتمال خطا در ارتباط بین دو گره با کمک رله همکار در کانال با محوشدگی ناکاگامی - m به صورت

$$\bar{P}_e \leq \bar{P}_{e_{high}} = \frac{\alpha m^{\gamma m - 1} \Gamma(\gamma m + \frac{1}{2})}{\sqrt{\pi} g^{\gamma m} \Gamma(\gamma m)} \left(\frac{1}{\gamma_s} \right) \left(\frac{1}{\gamma_{s,r}} + \frac{1}{\gamma_{r,d}} \right) \quad (16)$$

قابل محاسبه است. در نتیجه رابطه احتمال خطای سمبل متوسط در کانال ناکاگامی - m به ازای مدولاسیون‌های مختلف بر حسب منبع P_s ، توان رله P_r ، توان نویز N ، و میانگین آماری اندازه ضرایب کانال $h_{s,d}$ ، $h_{s,r}$ و $h_{r,d}$ به صورت

$$\bar{P}_e \leq \bar{P}_{e_{high}} = \frac{\alpha m^{\gamma m - 1} \Gamma(\gamma m + \frac{1}{2}) N^{\gamma m}}{\sqrt{\pi} g^{\gamma m} \Gamma(\gamma m)} \times \left(\frac{1}{P_s^{\gamma m} \mathbb{E}(|h_{s,d}|^2)^m \mathbb{E}(|h_{s,r}|^2)^m} + \frac{1}{P_s^m P_r^m \mathbb{E}(|h_{s,d}|^2)^m \mathbb{E}(|h_{r,d}|^2)^m} \right) \quad (17)$$

مدل می‌شود که α و g بسته به نوع مدولاسیون از جدول ۱ تعیین می‌گردد. همان طور که مشاهده می‌شود بر خلاف رابطه دقیق احتمال خطا متوسط سمبل (رابطه ۱۳) که به صورت انتگرالی است، حد بالای به دست آمده در (۱۷) تابع ساده‌ای از متوسط ضرایب کانال و توان اختصاص‌یافته به منبع و رله است. برای پرهیز از پیچیدگی ریاضی در ادامه مقاله از این حد بالا برای ارزیابی عملکرد احتمال خطای متوسط سیستم استفاده می‌شود.

۴- تعیین محل بهینه استقرار رله و اختصاص توان بهینه منبع و رله

در این بخش، تعیین مکان بهینه رله و اختصاص توان بهینه منبع و رله با هدف کمینه‌نمودن متوسط احتمال خطای بیت به ازای مدولاسیون‌ها مختلف برای ساختار شبکه CARN با رله همکار هوایی مد نظر می‌باشد. ابتدا در زیر بخش اول با بهینه‌سازی موقعیت رله به ازای هر اختصاص توانی در منبع و رله، شروع می‌شود. در زیر بخش دوم، اختصاص توان برای منبع و رله بهینه می‌گردد. در انتها بهینه‌سازی توأم توان-مکان رله به صورت ریاضی بیان شده و یک الگوریتم برای تعیین جواب بهینه مسئله بهینه‌سازی توأم پیشنهاد می‌شود. همچنین اثر اختصاص توان و تعیین مکان رله بر کارایی احتمال خطای شبکه CARN بررسی می‌گردد.

۴-۱ بهینه‌سازی مکان رله

برای انجام بهینه‌سازی، از رابطه بین میانگین اندازه ضرایب کانال محوشونده و فاصله میان گره‌ها استفاده می‌شود. طبق مدل تضعیف کانال بی‌سیم^۲، میانگین اندازه هر کانال را می‌توان به صورت $\mathbb{E}(|h_{i,j}|^2) = K d_{i,j}^{-\nu}$ بیان کرد که در آن K عدد ثابتی است که به نوع آنتن، فرکانس کاری و ... بستگی دارد و بدون از دست دادن کلیت مسئله یک در نظر گرفته می‌شود. ν فاکتور تضعیف مسیر^۳ می‌باشد که مقدار آن با توجه به شرایط محیطی تعیین می‌گردد و مقدار

جدول ۱: احتمال خطای سمبل برای مدولاسیون‌های مختلف در کانال با نویز جمع‌شونده گوسی [۲۵].

نوع مدولاسیون	$P_e(\bar{\gamma}_s) = \alpha Q(\sqrt{2g\bar{\gamma}_s})$
BFSK	$P_e = Q(\sqrt{\bar{\gamma}_s})$
BPSK	$P_e = Q(\sqrt{2\bar{\gamma}_s})$
QPSK, 4QAM	$P_e \approx 2Q(\sqrt{\bar{\gamma}_s})$
MPAM	$P_e \approx \frac{\gamma(M-1)}{M} Q(\sqrt{\frac{6\bar{\gamma}_s}{M-1}})$
MPSK	$P_e \approx 2Q(\sqrt{2\bar{\gamma}_s} \sin \frac{\pi}{M})$
Rectangular MQAM	$P_e \approx \frac{\gamma(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} Q(\sqrt{\frac{3\bar{\gamma}_s}{M-1}})$
Nonrectangular MQAM	$P_e \approx 4Q(\sqrt{\frac{3\bar{\gamma}_s}{M-1}})$

۳- محاسبه احتمال خطا

در این مقاله برای ارزیابی کارایی شبکه، متوسط احتمال خطای آن در نظر گرفته شده است. برای محاسبه متوسط احتمال خطای شبکه از روش مولد گشتاور^۱ (MGF) کمک گرفته می‌شود. برای مدل شبکه CARN متوسط احتمال خطا در کانال محوشونده برابر است با [۲۵]

$$\bar{P}_e = \frac{\alpha}{\pi} \int_0^{\pi} \prod_{i=1}^{\gamma} \mathcal{M}_{\gamma_i} \left(-\frac{g}{\sin^2 \phi} \right) d\phi \quad (13)$$

که i و γ_i به ترتیب شماره مسیرهای منتهی به مقصد و سیگنال به نویز متناظر آن مسیرها می‌باشد و برای مدولاسیون‌های با احتمال خطای $P_e = \alpha Q(\sqrt{2g\bar{\gamma}_s})$ در کانال گوسی جمع‌شونده، مقادیر α و g از جدول ۱ قابل استخراج است.

همچنین تابع $\mathcal{M}_{\gamma}(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{\gamma}(\gamma) e^{s\gamma} d\gamma$ به عنوان MGF سیگنال به نویز γ شناخته می‌شود. برای کانال منبع-رله با محوشدگی ناکاگامی m -طبق (۷) سیگنال به نویز لحظه‌ای $\gamma = P_s |h_{s,d}|^2 / N$ دارای توزیع گاما با پارامتر شکل m و پارامتر مقیاس $m/\bar{\gamma}$ می‌باشد، می‌توان نشان داد که تابع مولد گشتاور γ به سادگی به صورت

$$\mathcal{M}_{\gamma} \left(-\frac{g}{\sin^2 \phi} \right) = \left(1 + \frac{g\bar{\gamma}}{m \sin^2 \phi} \right)^{-m} \quad (14)$$

قابل بیان است [۲۵]. همچنین با فرض سیگنال به نویز زیاد ($\bar{\gamma} \gg 1$)، (۱۴) به صورت $\mathcal{M}_{\gamma}(-g/\sin^2 \phi) \approx (g\bar{\gamma}/m \sin^2 \phi)^{-m}$ ساده خواهد شد.

در حالی که تابع مولد گشتاور γ_1 ، که به صورت مجموع موازی دو متغیر تصادفی گاما $\gamma_{s,r}$ و $\gamma_{r,d}$ می‌شود، به راحتی قابل دستیابی نمی‌باشد. در [۲۶] نشان داده شده که تابع مولد گشتاور γ_1 در سیگنال به نویز بالا به صورت

$$\mathcal{M}_{\gamma_1} \left(-\frac{g}{\sin^2 \phi} \right) \approx \left(\frac{g}{m \sin^2 \phi} \right)^{-m} \left(\frac{1}{\gamma_{s,r}^m} + \frac{1}{\gamma_{r,d}^m} \right) \quad (15)$$

قابل تقریب است.

با جایگذاری تابع مولد گشتاور سیگنال به نویز مسیر مستقیم γ (۱۴) و سیگنال به نویز مسیر غیر مستقیم γ_1 (۱۵) با فرض تقریب سیگنال به

به دست آورد. از آنجایی که پارامتر محوشدگی کانال ناکاگامی m و فاکتور تضعیف مسیر ν مقادیر مثبتی دارند، بنابراین سمت چپ (۲۲) زمانی برابر صفر می‌گردد که بخش دوم آن برابر با صفر شود یعنی

$$\frac{d[d^\nu + H^\nu]^{\frac{m\nu-1}{\nu}}}{P_s^m} - \frac{(\nu-d)[(\nu-d)^\nu + H^\nu]^{\frac{m\nu-1}{\nu}}}{P_r^m}$$

این رابطه نسبت بهینه را می‌توان به صورت

$$d = \frac{1}{1 + \left(\frac{P_r}{P_s}\right)^m \left(\frac{d^\nu + H^\nu}{(\nu-d)^\nu + H^\nu}\right)^{\frac{m\nu-1}{\nu}}} \quad (23)$$

به دست آورد. باید به این نکته اشاره کرد که با استفاده از تکنیک‌های حل عددی مانند روش دوبخشی^۳ می‌توان مقدار نسبت بهینه مکان d^* را محاسبه نمود. در اینجا برای محاسبه جواب به صورت رابطه بسته دو حالت حدی را در نظر می‌گیریم. ابتدا اگر رله بر روی خط واصل S-D قرار داشته باشد، یعنی $h_r^\nu = h_r^{\nu*} = 0$ می‌توان نسبت بهینه مکان را از رابطه

$$d^* = \frac{1}{1 + \left(\frac{P_r}{P_s}\right)^{\frac{m}{\nu}}} \quad (24)$$

به دست آورد. در حالت دوم اگر ارتفاع رله هوایی از زمین زیاد باشد یعنی $h_r \gg d_{s,d}$ ، همان طور که در برخی از منابع ارتفاع رله در حدود ۲۰ کیلومتر در نظر گرفته شده [۳] و با استفاده از رابطه تقریبی $d^\nu + H^\nu \approx H^\nu$ و $(\nu-d)^\nu + H^\nu \approx H^\nu$ برای مقادیر بزرگ H ، (۲۴) می‌تواند به صورت

$$d^* = \frac{1}{1 + \left(\frac{P_r}{P_s}\right)^m} \quad (25)$$

تقریب زده شود. در نتیجه با استفاده از نسبت بهینه مکان d^* ، فاصله بهینه لینک منبع- رله و رله- مقصد از روابط

$$\begin{aligned} d_{s,r}^* &= d^* d_{s,d} \cos \omega_{s,r}^* \cos \beta_{s,r}^* \\ d_{r,d}^* &= (\nu - d^*) d_{s,d} \cos \omega_{r,d} \cos \beta_{r,d} \end{aligned} \quad (26)$$

قابل محاسبه است که در آن $\omega_{s,r}^* = \arctan(h_r^*/d^* d_{s,d})$ ، $\omega_{r,d}^* = \arctan(h_r^*/(\nu - d^*) d_{s,d})$ ، $\beta_{s,r}^* = \arctan(h_r \cos(\omega_{s,r}^*)/d^* d_{s,d})$ و $\beta_{r,d}^* = \arctan(h_r \cos(\omega_{r,d}^*)/(\nu - d^*) d_{s,d})$ است. رابطه به دست آمده نشان می‌دهد که مکان بهینه رله همکار مستقل از نوع مدولاسیون می‌باشد. یعنی نوع مدولاسیون مورد استفاده در تعیین مکان بهینه رله همکار بی‌تأثیر است و مکان بهینه به میزان نسبت توان رله و منبع P_r/P_s ، فاصله رله از خط واصل S-D، فاکتور تضعیف مسیر ν (در زمانی که ارتفاع رله زیاد می‌شود تأثیر این پارامتر کمتر می‌گردد) و پارامتر محوشدگی کانال m وابسته می‌باشد.

اگر رابطه به دست آمده برای مکان بهینه رله (۲۳) را از نقطه نظر توان اختصاص یافته به منبع و رله بررسی نماییم به این نتیجه خواهیم رسید هنگامی که توان منبع نسبتاً قوی است، برای به دست آوردن احتمال خطای کمتر در شبکه باید رله همکار را نزدیک‌تر به مقصد قرار دهیم تا توان ضعیف رله را جبران نماید. همچنین در صورت اختصاص توان به نسبت کم در رله نسبت توان $P_r/P_s \rightarrow 0$ خواهد شد و در نتیجه در این

معمول آن از ۲ برای سیستم‌های هوایی تا ۸ برای سیستم‌های نزدیک به زمین در نظر گرفته می‌شود. به طور مثال در محیط با فضای آزاد^۱، فاکتور تضعیف برابر با $\nu = 2$ می‌باشد.

در نتیجه با فرض یک مقدار مشخص اختصاص توان منبع و رله (P_s و P_r)، مسئله یافتن مکان بهینه رله هوایی با هدف به حداقل رساندن احتمال خطای سمبل متوسط (۱۷) به صورت

$$d^* = \arg \min_{d \in [0,1]} \bar{P}_e \quad (18)$$

تعریف می‌گردد. با استفاده از مدل تلفات مسیر کانال محوشونده و جایگذاری واریانس کانال‌های منبع- رله $\mathbb{E}(|h_{s,r}|^\nu) = d_{s,d}^{-\nu} d^{-\nu}$ و رله- مقصد $\mathbb{E}(|h_{r,d}|^\nu) = d_{s,d}^{-\nu} (\nu-d)^{-\nu}$ در تابع هدف \bar{P}_e که در (۱۷) معرفی شده است، تابع هدف می‌تواند به صورت

$$\begin{aligned} \bar{P}_e &= \frac{\alpha m^{\nu m-1} \Gamma(\nu m + \frac{1}{\nu}) N_s^{\nu m} d_{s,d}^{\nu m}}{\nu \sqrt{\pi} g^{\nu m} \Gamma(\nu m)} \times \\ &\left(\frac{[d^\nu + H^\nu]^{\frac{m\nu}{\nu}}}{P_s^m} + \frac{[(\nu-d)^\nu + H^\nu]^{\frac{m\nu}{\nu}}}{P_s^m P_r^m} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

بازنویسی گردد. با حذف عبارات ثابت نسبت به متغیر مسئله بهینه‌سازی d ، حل مسئله بهینه‌سازی مطرح شده در (۱۹) معادل با مینیمم‌کردن عبارت

$$f(d) = \left(\frac{[d^\nu + H^\nu]^{\frac{m\nu}{\nu}}}{P_s^m} + \frac{[(\nu-d)^\nu + H^\nu]^{\frac{m\nu}{\nu}}}{P_r^m} \right) \quad (20)$$

با شرط $d \in [0,1]$ می‌باشد. با گرفتن مشتق درجه دوم از $f(d)$ نسبت به d به رابطه

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f(d)}{\partial d^2} &= \\ &mv \left(\frac{(d^\nu + H^\nu)^{\frac{m\nu-1}{\nu}}}{P_s^m} + \frac{(mv-\nu)d^\nu (d^\nu + H^\nu)^{\frac{m\nu-\nu}{\nu}}}{P_s^m} + \right. \\ &\left. \frac{[(\nu-d)^\nu + H^\nu]^{\frac{m\nu-1}{\nu}}}{P_r^m} + \right. \\ &\left. \frac{(mv-\nu)(\nu-d)^\nu [(\nu-d)^\nu + H^\nu]^{\frac{m\nu-\nu}{\nu}}}{P_r^m} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

خواهیم رسید. با توجه به این که توان‌های منبع P_s ، رله P_r ، تضعیف مسیر ν و پارامتر محوشدگی کانال ناکاگامی m مقادیر مثبتی هستند، کاملاً واضح است که $\partial^2 f(d)/\partial d^2$ در محدوده $d \in [0,1]$ مقدار مثبتی به خود می‌گیرد. این بدین مفهوم است که تابع هدف، یک تابع اکیداً محدب^۲ نسبت به d در بازه $[0,1]$ می‌باشد. در نتیجه نسبت بهینه مکان (d^*) را می‌توان با حل معادله

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(d)}{\partial d} &= mv \left(\frac{d[d^\nu + H^\nu]^{\frac{m\nu-1}{\nu}}}{P_s^m} - \right. \\ &\left. \frac{(\nu-d)[(\nu-d)^\nu + H^\nu]^{\frac{m\nu-1}{\nu}}}{P_r^m} \right) = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

1. Free Space
2. Strictly Convex

می‌گردد. در پیوست نشان داده شده که ماتریس هسین^۱ (ماتریس مشتق جزئی مرتبه دوم) تابع هدف (۲۹) یک ماتریس مثبت قطعی^۲ در محدوده $0 < d, r < 1$ می‌باشد، پس تابع هدف مسئله یک تابع اکیداً محدب است. در نتیجه نسبت بهینه توان از حل معادله

$$\frac{\partial f(d, r)}{\partial r} = \left(\frac{-2m[d^\nu + H^\nu]^\frac{m\nu}{\nu}}{r^{2m+1}} + \frac{-m(1-2r)[(1-d)^\nu + H^\nu]^\frac{m\nu}{\nu}}{r^{m+1}(1-r)^{m+1}} \right) = 0 \quad (30)$$

قابل استخراج است. با توجه به این که $m \neq 0$ زمانی (۳۰) برقرار است که $2(1-r)^{m+1}[d^\nu + H^\nu]^\frac{m\nu}{\nu} + r^m(1-2r)[(1-d)^\nu + H^\nu]^\frac{m\nu}{\nu} = 0$ از آنجایی که این معادله یک معادله درجه $m+1$ است حل صریحی برای آن به ازای $m > 2$ وجود ندارد اما با کمی جابه‌جایی این معادله را می‌توان به صورت

$$r = 1 - \frac{1}{2 + 2 \left(\frac{d^\nu + H^\nu}{(1-d)^\nu + H^\nu} \right)^\frac{m\nu}{\nu} \left(\frac{1-r}{r} \right)^m} \quad (31)$$

نمایش داد. در ادامه می‌توان با روش‌های عددی مانند روش دوبخشی نسبت بهینه اختصاص توان r^* را به دست آورد. رابطه (۳۱) نشان می‌دهد که نسبت بهینه توان همانند نسبت بهینه مکان، مستقل از نوع مدولاسیون می‌باشد. به علاوه زمانی که مکان رله از منبع دور می‌گردد و به مقصد نزدیک می‌گردد $d \rightarrow 1$ مقدار نسبت بهینه توان $r \rightarrow 1$ خواهد شد یعنی برای کاهش احتمال خطای شبکه توان بیشتری به منبع اختصاص داده می‌شود تا اثر مخرب فاصله زیاد لینک منبع-رله را جبران نماید.

با هدف به دست آوردن رابطه بسته برای نسبت بهینه اختصاص توان (۳۱) را در دو حالت حدی خاص بررسی می‌نماییم. در حالت خاص زمانی که رله بر روی خط واصل $(h_r^\nu = h_r^{\nu*} = 0)$ و همچنین کانال از نوع رایلی ($m=1$) باشد، معادله به دست آمده از (۳۰) از درجه ۲ شده و نسبت بهینه اختصاص توان از رابطه بسته زیر قابل استخراج است

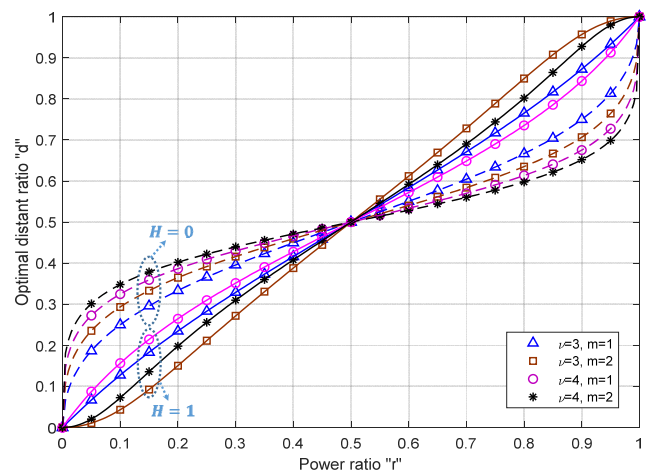
$$r^* = 1 - \frac{2}{3 + \sqrt{1 + 8 \left(\frac{d}{1-d} \right)^\nu}} \quad (32)$$

همچنین اگر فاصله لینک منبع-رله و لینک رله-مقصد یکسان شود، یعنی $d = 0.5$ ، نسبت بهینه توان با استفاده از (۲۹) مستقل از ν برابر با $r^* = 2/3$ می‌شود که نتیجه به دست آمده با نتیجه به دست آمده در [۲۲] یکسان است.

در حالت خاص دیگر اگر رله در ارتفاع زیادی نسبت به خط واصل S-D باشد ($h_r \gg d_{s,d}$)، یا به عبارت دیگر $H \gg d$ ، (۲۸) را می‌توان به صورت

$$r^* = 1 - \frac{1}{2 + 2 \left(\frac{1-r}{r} \right)^m} \quad (33)$$

تقریب زد و در کانال رایلی ($m=1$) نسبت اختصاص بهینه برابر $r^* = 2/3$ خواهد شد. با استفاده از این نسبت بهینه توان r^* ، توان



شکل ۲: نسبت مکان بهینه (d^*) بر حسب نسبت توان (r) در سیستم CARN در کانال ناگامی با پارامتر محوشدگی $m=2, 1$ و به ازای فاکتور تضعیف مسیر متفاوت $\nu=3, 4$ ($H=0$ خط چین و $H=1$ خط توپر).

حالات نسبت بهینه مکان $d^* \rightarrow 1$ می‌شود، یعنی با کاهش شدید توان اختصاص یافته به رله، باید مکان رله همکار را به مقصد نزدیک‌تر نماییم. در شکل ۲ نسبت مکان بهینه (یعنی d^*) بر حسب نسبت اختصاص توان (یعنی r) در کانال ناگامی با پارامترهای محوشدگی متفاوت ($m=1, 2$)، فاکتور تضعیف مسیر متفاوت $\nu=3, 4$ و فاصله نرمالیزه از خط واصل S-D متفاوت ($H=0, 1$) به ترتیب با خط چین و خط توپر نمایش داده شده) رسم شده است. همان طور که از این شکل مشخص است با افزایش H تأثیر پارامتر فاکتور تضعیف مسیر ν بر مقدار بهینه کاهش می‌یابد که این نکته از (۲۵) نیز مشخص است.

۴-۲ بهینه‌سازی اختصاص توان

در این بخش هدف بهینه‌سازی اختصاص توان در شبکه‌های مخابرات همکارانه در کانال ناگامی m است که این مسئله بهینه‌سازی به صورت

$$P_s^*, P_r^* = \arg \min_{\bar{P}_e} \quad (27)$$

subject to : $P_s + P_r = P$

قابل تعریف است، آن که در آن P نشان‌دهنده توان کل انتقال یا به عبارت دیگر حداکثر توانی است که یک بسته اطلاعات مجاز می‌باشد در سراسر انتقال از منبع به مقصد مصرف کند. بدین منظور مشابه بخش قبل با کمک نسبت توان (r) و جایگذاری توان منبع $P_s = rP$ و توان رله $P_r = (1-r)P$ در (۱۹)، تابع هدف مسئله به صورت

$$\bar{P}_e = \frac{\alpha m^{\nu m - 1} \Gamma(\nu m + \frac{1}{\nu}) N_s^{\nu m} d_{s,d}^{\nu m}}{4 \sqrt{\pi} g^{\nu m} \Gamma(\nu m) P^{\nu m}} \times \left(\frac{[d^\nu + H^\nu]^\frac{m\nu}{\nu}}{r^{\nu m}} + \frac{[(1-d)^\nu + H^\nu]^\frac{m\nu}{\nu}}{r^m (1-r)^m} \right) \quad (28)$$

قابل بازنویسی است. برای حل مسئله بهینه‌سازی اختصاص توان (۲۷) می‌توان از کلیه عبارات ثابت نسبت به متغیرهای r در (۲۸) صرف نظر نمود و حل مسئله بهینه‌سازی (۲۷) با کمینه‌نمودن رابطه

$$f(d, r) = \left(\frac{[d^\nu + H^\nu]^\frac{m\nu}{\nu}}{r^{\nu m}} + \frac{[(1-d)^\nu + H^\nu]^\frac{m\nu}{\nu}}{r^m (1-r)^m} \right) \quad (29)$$

1. Hessian
2. Positive Definite

دهیم. همچنین با توجه به شکل ۳ با افزایش ارتفاع رله (یا به عبارت دیگر افزایش H) مقدار r^* مستقل از d و ν به مقدار ثابتی که تابعی از m است همگرا می‌شود که این رفتار کاملاً با (۳۱) سازگاری دارد.

۳-۴ بهینه‌سازی توأم مکان و توان

در بخش آخر بهینه‌سازی مکان رله هوایی به همراه بهینه‌سازی توان بهینه برای منبع و رله انجام خواهد شد که به کارایی بالاتر برای شبکه در عوض پیچیدگی بیشتر دست یافته می‌شود. مسئله بهینه‌سازی توأم مکان و اختصاص توان همانند بخش قبل با تعریف نسبت‌های $d \triangleq (d_{s,r} \cos \omega_{s,r} \cos \beta_{s,r}) / d_{s,d}$ و $r \triangleq P_s / P$ به صورت یک مسئله بهینه‌سازی با دو متغیر

$$d^*, r^* = \arg \min_{d, r \in [0,1]} \bar{P}_e(r, d) \quad (35)$$

قابل بیان است. این مسئله بهینه‌سازی توأم را بدون از دست دادن کلیت مسئله در دو گام تو در تو حل می‌نماییم یعنی

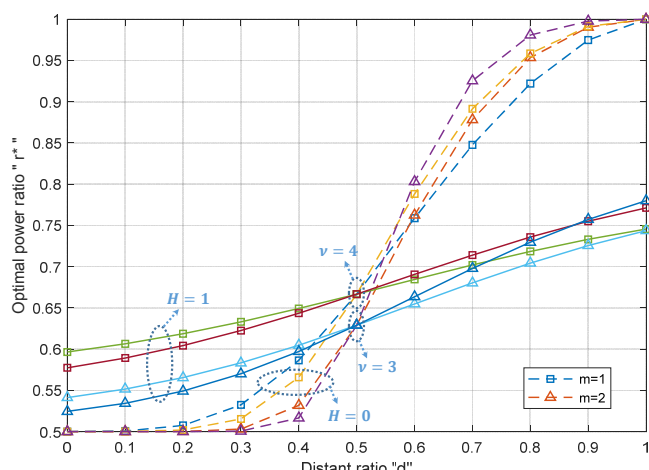
$$d^*, r^* = \arg \min_{r \in [0,1]} (\arg \min_{d \in [0,1]} \bar{P}_e(r, d)) \quad (36)$$

برای مسئله بهینه‌سازی (۳۶) به ازای هر $r \in [0,1]$ می‌توان نسبت بهینه مکان را با کمک (۲۳) محاسبه نمود. حال با حل مسئله بهینه‌سازی داخلی در (۳۶) می‌توان پیچیدگی مسئله بهینه‌سازی توأم r و d که در فضای دوبعدی $[0,1] \times [0,1]$ بوده است را به یک مسئله بهینه‌سازی یک‌بعدی کاهش داد. در نتیجه با جایگذاری نسبت مکان بهینه d^* به دست آمده در مسئله بهینه‌سازی مکان رله (۲۳) در رابطه بهینه‌سازی توان (۳۱)، الگوریتم بهینه‌سازی توأم نسبت اختصاص توان و مکان به صورت شکل ۴ قابل بیان خواهد بود که اجرای الگوریتم پیشنهادی به دو مرحله محاسبه نسبت فاصله بهینه و اختصاص توان بهینه تقسیم می‌شود.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش برای تأیید روابط و الگوریتم به دست آمده در بخش قبل شبیه‌سازی‌هایی انجام شده است. در شبیه‌سازی‌ها واریانس نویز و میانگین آماری اندازه لینک منبع-مقصد نرمالیزه فرض شده است یعنی $N_s = 1$ و $\mathbb{E}(|h_{s,d}|^2) = 1$. همچنین در شبیه‌سازی‌ها نوع مدولاسیون BPSK فرض شده در نتیجه با توجه به جدول ۱، $\alpha = 1$ و $g = 1$ در نظر گرفته شده است.

شکل ۵ مقایسه میان کارایی احتمال خطا بین مکان رله بهینه (یعنی $d = d^*$) و فاصله برابر رله (یعنی $d = 0.5$) در توان ۳۰ dB را نمایش می‌دهد. مقدار فاکتور تضعیف مسیر $\nu = 3$ در نظر گرفته شده است. در این شکل تأثیر تعیین مکان بهینه در کارایی شبکه با رله همکار به ازای پارامتر H (فاصله نرمالیزه شده رله هوایی از خط واصل S-D) مختلف نشان داده شده است. همان طور که از شکل ۵ مشخص است کارایی احتمال خطای شبکه با رله همکار قرار گرفته در مکان بهینه همواره از شبکه با رله با فاصله برابر بهتر می‌باشد، به خصوص زمانی که مقدار توان منبع و رله با یکدیگر برابر نیستند (زمانی که $P_s = P_r$ یعنی $r = 0.5$ مکان بهینه رله با توجه به (۲۴) همان فاصله برابر می‌شود یعنی $d = 0.5$). در شکل ۶ هدف، نشان دادن تأثیر اختصاص توان بر کارایی شبکه با رله همکار با توان‌های متفاوت می‌باشد. در این شکل میزان احتمال خطای شبکه در دو حالت اختصاص توان بهینه (یعنی $r = r^*$) و اختصاص توان برابر (یعنی $r = 0.5$) در توان ۳۰ dB ترسیم شده است. همان طور که مورد انتظار بود شبکه با اختصاص توان بهینه در مقایسه با



شکل ۳: نسبت توان بهینه ($r^* = P_s^*/P$) بر حسب نسبت مکان ($d = d_{sr}/d_{sd}$) در سیستم با رله همکار AF (خط پیوسته به ازای فاکتور تضعیف مسیر $\nu = 4$ و خطچین به ازای فاکتور تضعیف مسیر $\nu = 2$).

بهینه منبع و رله به ترتیب از روابط

$$P_s^* = r^* P \quad (37)$$

$$P_r^* = (1 - r^*) P$$

قابل محاسبه است.

در شکل ۳ نسبت اختصاص توان بهینه (یعنی $r^* = P_s^*/P$) بر حسب نسبت مکان (یعنی $d = d_{sr}/d_{sd}$) در کانال ناگامی با پارامترهای محوشدگی متفاوت ($m = 0.5, 1, 2$) و فاکتور تضعیف مسیر متفاوت $\nu = 2, 3$ رسم شده است. از شکل می‌توان مشاهده نمود زمانی که رله به سمت مقصد حرکت می‌نماید (افزایش d)، توان کمتری در رله مورد نیاز است (افزایش r). این بدین خاطر است که با کوتاه‌تر شدن لینک رله به مقصد (ارتباط بهتر)، کارایی سیستم بیشتر به مسیر منبع به رله وابسته است. در این حالت اختصاص توان بیشتر به منبع باعث افزایش کارایی کل سیستم می‌گردد. همچنین می‌توان مشاهده نمود، با اختصاص توان بیشتر به منبع، فاصله بهینه رله-مقصد کوتاه‌تر خواهد شد. این بدین دلیل است که با توان کمتر رله، مسیر رله به مقصد اثر به سزایی بر کارایی کل سیستم خواهد گذاشت. به علاوه در شکل ۳ مشخص است زمانی که رله در وسط بین مسیر منبع و مقصد قرار می‌گیرد (یعنی $d = 0.5$)، میزان توان اختصاص یافته به منبع باید بیشتر از توان اختصاص یافته به رله باشد ($r^* > 0.5$) که این بدین خاطر است که منبع به دلیل ارسال دوگانه هم از طریق مسیر مستقیم به مقصد و هم از طریق مسیر غیر مستقیم به رله در کارایی کلی سیستم تأثیر بیشتری نسبت به رله دارد. به همین دلیل در حالت کلی به ازای تمامی مکان‌های رله، در حالت بهینه باید میزان توان اختصاص یافته به منبع از توان اختصاص یافته به رله بیشتر باشد.

در شکل ۳ یک نکته قابل توجه این است در حالتی که رله نزدیک‌تر به منبع باشد یعنی $d < 0.5$ ، با افزایش فاکتور تضعیف مسیر (ν)، مقدار نسبت بهینه توان (r^*) کاهش می‌یابد و این بدین معنی است زمانی که رله هوایی به منبع نزدیک‌تر است، در کانال‌های پراتلاف (همانند محیط‌های نزدیک به زمین) نسبت به کانال‌های کم‌اتلاف (محیط‌های فضای آزاد) توان بیشتری باید به رله اختصاص دهیم. اما بر عکس در حالتی که رله نزدیک‌تر به مقصد باشد یعنی $d > 0.5$ ، با افزایش فاکتور تضعیف مسیر (ν) نسبت بهینه توان (r^*) افزایش می‌یابد، پس بر خلاف حالت قبل زمانی که رله به مقصد نزدیک‌تر است، در کانال‌های پراتلاف نسبت به کانال‌های کم‌اتلاف توان کمتری باید به رله اختصاص

1: **INPUT:** Function $F(d,r) = d - \frac{1}{1 + (\frac{1-r}{r})^m (\frac{d^2 + H^2}{(1-d)^2 + H^2})^{\frac{mv}{2}-1}}$, $G(r,d) = r - 1 - \frac{1}{2 + 2(\frac{d^2 + H^2}{(1-d)^2 + H^2})^{\frac{mv}{2}} (\frac{1-r}{r})^m}$

2: **Initialization:** endpoint values $d^{\min} = 0$, $d^{\max} = 1$, $r^{\min} = 0$, $r^{\max} = 1$

3: optimal values $r^* = 0.5$, $d^* = 0.5$

4: tolerance TOL ,

5: maximum iterations N^{\max} , I^{\max}

6: **OUTPUT:** optimal ratios r^* and d^* which differs from a root of $F(d,r) = 0$ and $G(r,d) = 0$ by less than TOL

7: **for** $iter \in \{1, \dots, I^{\max}\}$ **do**

Step I: Optimal distance ratio

8: $N \leftarrow 1$

9: **while** $N \leq N^{\max}$ # limit iterations to prevent infinite loop

10: $d^{mid} \leftarrow \frac{d^{\min} + d^{\max}}{2}$ # new midpoint

11: **if** $F(d^{mid}, r^*) = 0$ **or** $\frac{d^{\min} + d^{\max}}{2} < TOL$ **then**

12: $d^* \leftarrow d^{mid}$

13: **stop**

14: **end if**

15: $N \leftarrow N + 1$ # increment step counter

16: **if** $sign(F(d^{mid}, r^*)) = sign(F(d^{\min}, r^*))$ **then** $d^{\min} \leftarrow d^{mid}$ **else** $d^{\max} \leftarrow d^{mid}$

17: **end while**

Step II: Optimal power allocation

18: $N \leftarrow 1$

19: **while** $N \leq N^{\max}$ # limit iterations to prevent infinite loop

20: $r^{mid} \leftarrow \frac{r^{\min} + r^{\max}}{2}$ # new midpoint

21: **if** $G(r^{mid}, d^*) = 0$ **or** $\frac{r^{\min} + r^{\max}}{2} < TOL$ **then**

21: $r^* \leftarrow r^{mid}$

22: **stop**

22: **end if**

23: $N \leftarrow N + 1$ # increment step counter

24: **if** $sign(G(r^{mid}, d^*)) = sign(G(r^{\min}, d^*))$ **then** $r^{\min} \leftarrow r^{mid}$ **else** $r^{\max} \leftarrow r^{mid}$

25: **end while**

26: **if** $F(d^*, r^*) < TOL$ **and** $G(r^*, d^*) < TOL$ **then** # solution found

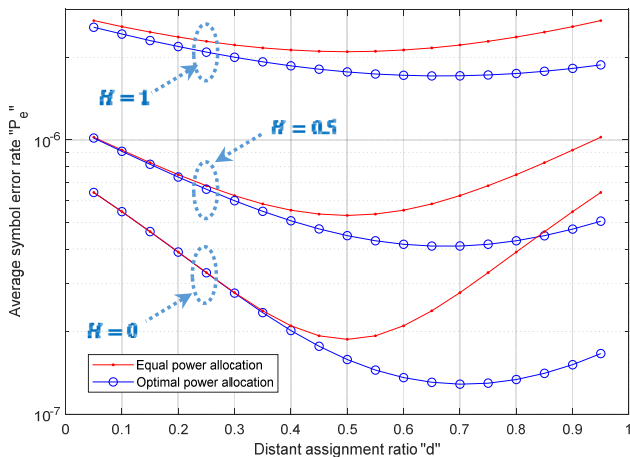
27: **output** (r^*, d^*)

28: **stop**

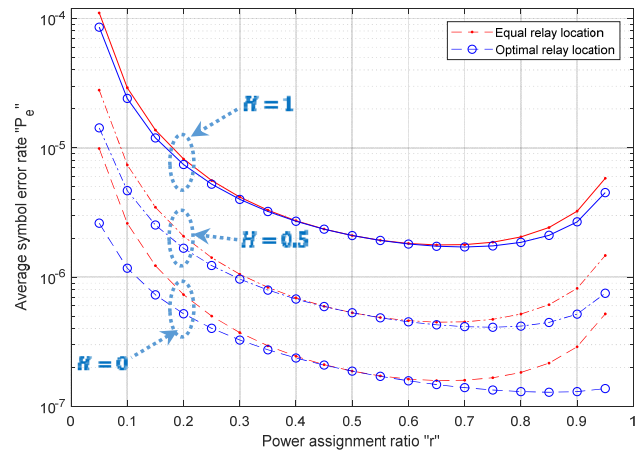
29: **end if**

30: **end for**

شکل ۴: الگوریتم بهینه‌سازی توأم اختصاص توان و مکان رله هوایی در سیستم CARN.



شکل ۵: مقایسه کارایی شبکه با رله همکار با اختصاص بهینه توان و اختصاص توان برابر بر حسب نسبت‌های مکان مختلف (با فرض فاکتور تضعیف مسیر $\nu = 3$ ، پارامتر محوشدگی کانال ناکامی $m = 1$ و $H = 0, 0.5, 1$).



شکل ۶: مقایسه کارایی شبکه با رله همکار با مکان بهینه رله و مکان رله با فاصله برابر بر حسب نسبت‌های توان مختلف (با فرض فاکتور تضعیف مسیر $\nu = 3$ ، پارامتر محوشدگی کانال ناکامی $m = 1$ و $H = 0, 0.5, 1$).

داشته باشد یعنی نسبت مکان زیاد (زمانی که رله به منبع نزدیک شود یعنی $d \rightarrow 0$ طبق (۳۲) مقدار نسبت توان بهینه $r^* \rightarrow 0.5$ یعنی باید

اختصاص توان برابر منبع و رله در نسبت‌های مکان مختلف از کارایی بهتری برخوردار است، به ویژه زمانی که رله در فاصله زیادی از منبع قرار

اختصاص توان بهینه $(r=r^*)$ و فاصله برابر رله $(d=0.5)$ و d اختیاری در حالت الف و ب با یکدیگر مشابه هستند که این موضوع به خاطر این واقعیت می‌باشد که با اختصاص توان برابر $(r=0.5)$ ، مقدار فاصله بهینه رله (رابطه ۲۴) برابر با مقدار برابر توان است $(d^*=0.5)$.
 برای $H=0$ با اختصاص توان بهینه و مکان رله برابر در حالت ج، متوسط احتمال خطا نزدیک به ۰.۵ dB بهبود نسبت به حالت‌های بدون بهینه‌سازی توان رله الف و ب دارد. به علاوه با بهینه‌سازی توأم اختصاص توان و مکان رله در حالت د، در شکل میزان بهبود تقریباً ۰.۵ dB در مقایسه حالت ج با تنها بهینه‌سازی توان رله قابل مشاهده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سیستم مخابرات همکارانه با کمک رله هوایی مجهز به پروتکل AF در کانال‌های با محوشوندگی ناکامی m - ارائه شده است. در بخش اول عملکرد میانگین احتمال خطای سمبل (ASER) این سیستم محاسبه گردید. در بخش بعد، از آنجایی که موقعیت رله تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد سیستم می‌گذارد، طراحی بهینه محل قرارگیری رله بیان شد. همچنین از آنجا که کنترل توان در شبکه‌های رله دارای اهمیت است، تخصیص بهینه توان نیز محقق شده است. در انتها الگوریتمی برای حل مسئله بهینه‌سازی توأم مکان-توان رله هوایی در شبکه‌ها CARN، به منظور تضمین عملکرد موفق و مطمئن این سیستم‌ها در عمل پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهند که اگر رله در محل بهینه قرار نگیرد و یا اختصاص توان به صورت بهینه در نظر گرفته نشود، عملکرد احتمال خطای سیستم کاهش می‌یابد. همچنین تأثیر فاکتور تضعیف مسیر، پارامتر محوشدگی کانال و ارتفاع رله در بهینه‌سازی سیستم نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۷- پیوست

ماتریس هسین $f(d, r)$ به صورت زیر تعریف می‌گردد که درایه‌های آن در آن در (پ-۲) تا (پ-۴) نشان داده شده است کاملاً واضح است که $\frac{\partial^2 f(r, d)}{\partial r^2}$ و $\frac{\partial^2 f(r, d)}{\partial d^2}$ در بازه $d, r \in \{0, 1\}$ مثبت می‌باشند.

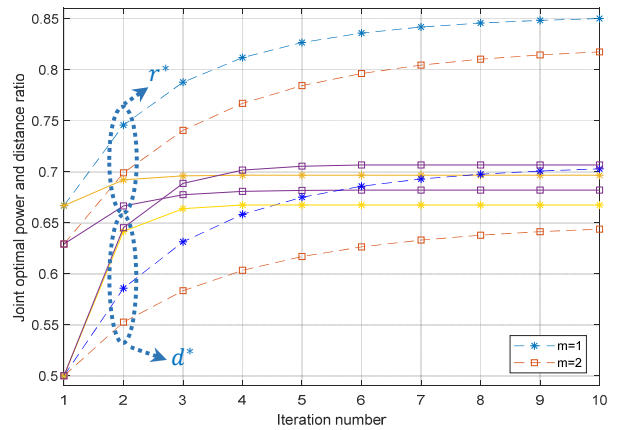
$$\mathcal{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(r, d)}{\partial d^2} & \frac{\partial^2 f(r, d)}{\partial d \partial r} \\ \frac{\partial^2 f(r, d)}{\partial r \partial d} & \frac{\partial^2 f(r, d)}{\partial r^2} \end{bmatrix} \quad (\text{پ-۱})$$

همچنین دترمینان ماتریس \mathcal{H} به صورت (پ-۵) خواهد بود

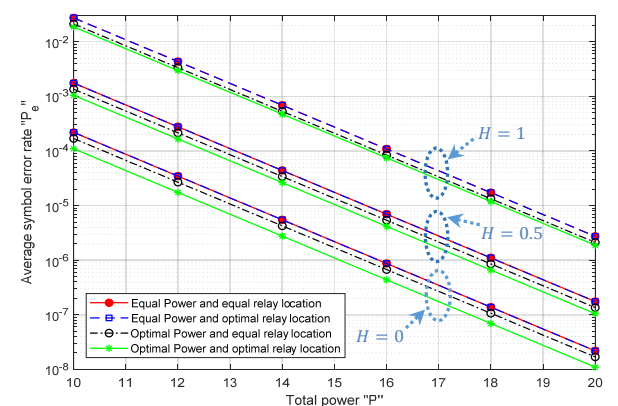
$$\frac{\partial^2 f(d)}{\partial d^2} = mv \left(\frac{(d^\nu + H^\nu)^{\frac{mv}{\nu}-1} + (\frac{mv}{\nu} - 1)d(d^\nu + H^\nu)^{\frac{mv}{\nu}-2}}{r^{\nu m}} + \frac{[(1-d)^\nu + H^\nu]^{\frac{mv}{\nu}-1} + (\frac{mv}{\nu} - 1)(1-d)[(1-d)^\nu + H^\nu]^{\frac{mv}{\nu}-2}}{r^m (1-r)^m} \right) \quad (\text{پ-۲})$$

$$\frac{\partial^2 f(r, d)}{\partial r \partial d} = \frac{\partial^2 f(r, d)}{\partial d \partial r} = m^\nu v \left(\frac{-\nu d (d^\nu + H^\nu)^{\frac{mv}{\nu}-1}}{r^{\nu m+1}} + \frac{(1-d)(\nu r - 1)[(1-d)^\nu + H^\nu]^{\frac{mv}{\nu}-1}}{r^{\nu m+1} (1-r)^{\nu m+1}} \right) \quad (\text{پ-۳})$$

$$\frac{\partial^2 f(r, d)}{\partial r^2} = \frac{\nu m(\nu m + 1)(d^\nu + H^\nu)^{\frac{mv}{\nu}-1}}{r^{\nu m+2}} + \frac{\nu m[(1-d)^\nu + H^\nu]^{\frac{mv}{\nu}}}{r^{\nu m+1} (1-r)^{\nu m+1}} + \frac{m(m+1)[(1-d)^\nu + H^\nu]^{\frac{mv}{\nu}} (1-\nu r)^\nu}{r^{\nu m+2} (1-r)^{\nu m+2}} \quad (\text{پ-۴})$$



شکل ۷: همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی توأم نرخ توان و مکان به ازای محوشوندگی‌های متفاوت و ارتفاع نرمالیزه‌شده از رله هوایی از خط واصل S-D، $H=0$ (خط چین) و $H=1$ (خط توپر).



شکل ۸: مقایسه حد بالای احتمال خطای متوسط شبکه با رله همکار با اختصاص توان بهینه و تعیین مکان بهینه (با فرض فاکتور تضعیف مسیر $\nu=3$ ، پارامتر محوشدگی کانال ناکامی $m=1$ و $H=0, 0.5, 1$).

توان برابری به منبع و رله اختصاص دهیم).

شکل ۷ به بررسی همگرایی الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی توأم نسبت توان و مکان در دو محوشدگی کانال متفاوت $m=1, 2$ می‌پردازد. از شکل مشخص است که همگرایی الگوریتم با کاهش H ، کمی کاهش می‌یابد ولی در تمامی حالت‌ها الگوریتم با تعداد تکرار معقول (حداکثر ۱۰ تکرار) به نقاط بهینه $(d^*$ و $r^*)$ همگرا می‌شود.

در انتها هدف از شکل ۸ اثبات این است که در صورت بهینه‌سازی توأم مکان رله و تخصیص توان در رله و مقصد، کارایی شبکه با رله همکار افزایش می‌یابد. در این شکل، احتمال خطای شبکه در کانال ناکامی با پارامتر محوشدگی $m=2$ برای چهار حالت مورد بررسی قرار گرفته است: الف) اختصاص توان برابر $(r=0.5)$ و فاصله برابر رله $(d=0.5)$ ، ب) اختصاص توان برابر $(r=0.5)$ و فاصله بهینه رله $(d=d^*)$ ، ج)

- [18] S. Zhang, *et al.*, "Joint trajectory and power optimization for UAV relay networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 1, pp. 161-164, Jan. 2018.
- [19] E. T. Michailidis, *et al.*, "Optimal relay location and opportunistic user scheduling for stratospheric communications," in *Proc. Int. Conf. on Adv. in Sat. and Space Commun.*, 6 pp., Athens, Greece, Apr. 2018.
- [20] Y. Chen, W. Feng, and G. Zheng, "Optimum placement of UAV as relays," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 2, pp. 248-251, Feb. 2018.
- [21] E. T. Michailidis, N. Nomikos, P. S. Bithas, D. Vouyioukas, and A. G. Kanatas, "Optimal 3-D aerial relay placement for multi-user MIMO communications," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 55, no. 6, pp. 3218-3229, Dec. 2019.
- [22] ع. شیخ ویسی، ح. امیری و م. ر. ذهابی، "بهبودسازی توأم تخصیص توان و مکان رله در شبکه رله بی سیم با ارتباط چندآنتنه همکارانه،" مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی و دومین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌هایی کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، ۱۴ صص، تهران، ایران، بهمن ۱۳۹۵.
- [23] H. Amiri Ara, M. R. Zahabi, and Vahid Meghdadi, "Joint power-location optimization in AF cooperative relay systems with Nakagami-m channel," *Physical Communication*, vol. 40, Article ID 101067, Jun. 2020.
- [24] M. Torabi, D. Haccoun, and W. Ajib, "Analysis of the performance of multiuser MIMO systems with user scheduling over Nakagami-m fading channels," *Phys. Commun.*, vol. 3, no. 3, pp. 168-179, Sep. 2010.
- [25] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005.
- [26] H. Amiri Ara, M. R. Zahabi, and Vahid Meghdadi, "Performance Analysis and Joint Power-Location Optimization for Downlink Cooperative Nomadic Relay Systems in 5G," Submitted to *IEEE ACCESS*, 21 Feb. 2021.

حمید امیری آرا مدرک کارشناسی خود در رشته مهندسی برق - الکترونیک از دانشگاه مازندران در سال ۱۳۹۱ دریافت کرد. او در میان ۵۶ دانشجوی فارغ التحصیل در دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل در سال ۱۳۹۳ با رتبه اول در رشته مهندسی برق - مخابرات فارغ التحصیل شد. همچنین او مدرک دکتری خود را در رشته مهندسی برق گرایش مخابرات سیستم با رتبه اول از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل در آبان ماه ۱۳۹۹ اخذ نمود. او از سال ۱۳۹۴ به عنوان مدرس مدعو در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل و دانشگاه مازندران در دروس مختلف مشغول به کار است. همچنین او به عنوان مشاور در پایان‌نامه‌های دکتری و کارشناسی ارشد در زمینه‌های پردازش سیگنال، مخابرات نسل پنجم و فراتر، الگوریتم‌های فراابتکاری و ... بوده است. او نویسنده بیش از ۱۰ مقاله در مجلات و کنفرانس‌های معتبر است و همچنین او داور مجله IET مخابرات و داور ارزیابی ثبت اختراع وزارت علوم می باشد.

محمدرضا ذهابی در سال ۱۳۶۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیر طوسی و در سال ۱۳۷۳ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک خود را از دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران دریافت نمود. همچنین دکترای برق در شاخه الکترونیک - مخابرات را در دانشگاهی لیموژ، فرانسه در سال ۱۳۸۸ اخذ نمود و اینک نیز عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده مخابرات مشارکتی، MIMO و شبکه‌های نسل پنجم می‌باشد.

وحید مقدادی مدرک لیسانس و کارشناسی ارشد خود را از دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، به ترتیب در سال‌های ۱۹۸۸ و ۱۹۹۱ دریافت کرد و مدرک دکترای خود را در دانشگاهی لیموژ، فرانسه در سال ۱۹۹۸ اخذ نمود. وی در بخش الکترونیک و مخابرات ENSIL دانشگاه لیموژ از سال ۲۰۰۰ به عنوان استادیار و از سال ۲۰۱۴ به عنوان استاد کامل کار کرده است. وی در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۲ از وزارت تحقیق و آموزش عالی فرانسه جایزه عالی علمی دریافت کرد. علاقه اصلی وی به تحقیق سیستم‌های مخابراتی شامل سیستم‌های MIMO، برنامه‌نویسی، کدگذاری شبکه، ارتباطات همکارانه، شبکه حسگر و شبکه هوشمند است. از سال ۱۹۹۸، وی مدیر علمی بیش از ۱۰ پروژه تحقیقاتی در زمینه فناوری اطلاعات و ارتباطات بوده است. وی نویسنده (همکار) بیش از ۱۰۰ مقاله علمی در ژورنال‌ها و کنفرانس‌ها است و به عنوان اعضای TPC در چندین دوره بین‌المللی خدمت کرده است.

$$\det[\mathcal{H}] = \left(\frac{\partial^2 f(r, d)}{\partial d^2} \times \frac{\partial^2 f(r, d)}{\partial r^2} \right) - \left(\frac{\partial^2 f(r, d)}{\partial r \partial d} \times \frac{\partial^2 f(r, d)}{\partial d \partial r} \right) \quad (5-p)$$

قابل نوشتن است. می‌توان نشان داد که به ازای $d, r \in \{0, 1\}$ دترمینان بالا مقادیر مثبتی به خود می‌گیرد. از آنجایی که ماتریس \mathcal{H} یک ماتریس هرمیتی است، با توجه به معیار سیلوستر از آنجایی که $\partial^2 f(r, d) / \partial d^2$ در بازه $d, r \in \{0, 1\}$ مثبت است و با مثبت‌بودن دترمینان ماتریس \mathcal{H} ، ثابت می‌شود که ماتریس \mathcal{H} اکیداً مثبت است.

مراجع

- [1] S. Kandeepan, *et al.*, "Aerial-terrestrial communications: terrestrial cooperation and energy-efficient transmissions to aerial base stations," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 50, no. 4, pp. 2715-2735, Oct. 2014.
- [2] M. Bacco, *et al.*, "TCP-based M2M traffic via random-access satellite links: throughput estimation," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 55, no. 2, pp. 846-863, Apr. 2018.
- [3] N. Nomikos, *et al.*, "A UAV-based moving 5G RAN for massive connectivity of mobile users and IoT devices," *Vehicular Communications*, vol. 25, Article ID 100250, Oct. 2020.
- [4] I. J. Jensen, D. F. Selvaraj, and P. Ranganathan, "Blockchain technology for networked swarms of unmanned aerial vehicles (UAVs)," in *Proc. IEEE 20th Int. Symp. on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Network*, 7 pp., Washington, DC, USA, 10-12 Jun. 2019.
- [5] S. Song, *et al.*, "Analysis of wireless backhaul networks based on aerial platform technology for 6G systems," *Computers, Materials and Continua*, vol. 62, no. 2, pp. 473-494, 2020.
- [6] G. Wu, X. Gao, and K. Wan, "Mobility control of unmanned aerial vehicle as communication relay to optimize ground-to-air uplinks," *Sensors*, vol. 20, no. 8, Article ID 2332, Apr. 2020.
- [7] P. S. Bithas, E. T. Michailidis, N. Nomikos, D. Vouyioukas, and A. G. Kanatas, "A survey on machine-learning techniques for UAV-based communications," *Sensors*, vol. 19, no. 23, Article ID 5170, Dec. 2019.
- [8] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, "Optimal LAP altitude for maximum coverage," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 3, no. 6, pp. 569-572, Dec. 2014.
- [9] J. Lyu, *et al.*, "Placement optimization of UAV-mounted mobile base stations," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 3, pp. 604-607, Mar. 2017.
- [10] M. M. Azari, *et al.*, "Optimal UAV positioning for terrestrial-aerial communication in presence of fading," in *Proc. IEEE Global Commun. Conf.*, 7 pp., Washington, DC, USA, 4-8 Dec. 2016.
- [11] M. Alzenad, *et al.*, "3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station (UAV-BS) for energy efficient maximal coverage," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 6, no. 4, pp. 434-437, Aug. 2017.
- [12] J. S. Lee and K. H. Yu, "Optimal path planning of solar-powered UAV using gravitational potential energy," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 53, no. 3, pp. 1442-1451, Jun. 2017.
- [13] F. Ono, H. Ochiai, and R. Miura, "A wireless relay network based on unmanned aircraft system with rate optimization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 11, pp. 7699-7708, Nov. 2016.
- [14] D. H. Choi, S. H. Kim, and D. K. Sung, "Energy-efficient maneuvering and communication of a single UAV-based relay," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 50, no. 3, pp. 2320-2327, Jul. 2014.
- [15] J. Chen and D. Gesbert, "Optimal positioning of flying relays for wireless networks: a LOS map approach," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Commun., ICC'17*, 6 pp., Paris, France, 21-25 May 2017.
- [16] E. Larsen, L. Landmark, and O. Kure, "Optimal UAV relay positions in multi-rate networks," *Wireless Days*, pp. 8-14, Porto, Portugal, 29-31 Mar. 2017.
- [17] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 64, no. 12, pp. 4983-4996, Dec. 2016.