

تخصیص توان بهینه با هدف بیشینه کردن نرخ محرمانگی در امنیت لایه فیزیکی به کمک مدولاسیون جهتی مبتنی بر آرایه چندگانگی فرکانسی و نویز مصنوعی

مهدی طیب‌مسعود و حسین خالقی بیزی

مبتنی بر الگوریتم‌های ریاضی و محاسباتی هستند، مبانی امنیت لایه فیزیکی، مبتنی بر نظریه اطلاعات و یا به عبارت دیگر همان قضیه «امنیت کامل اطلاعات» در نظریه شانون [۴] است. بر مبنای کار شانون، وینر در مقاله خود در سال ۱۹۷۵، مدل کانال شهودی تنزل یافته را ارائه نمود و نشان داد که پیام را می‌توان بدون استفاده از کلید رمزنگاری به صورت محرمانه ارسال کرد [۵]. تاکنون روش‌های بسیاری برای تأمین امنیت لایه فیزیکی در شبکه‌های بی‌سیم پیشنهاد شده است [۶]. یکی از راهکارهای مورد توجه برای برقراری امنیت لایه فیزیکی، استفاده از مدولاسیون جهتی است.

روش مدولاسیون جهتی یک راهکار کاربردی و کارآمد برای برقراری امنیت لایه فیزیکی در سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم دید مستقیم است [۷]. در واقع، مدولاسیون جهتی یک فناوری نوین است که در سمت فرستنده انجام شده و در نتیجه آن، ارسال اطلاعات دیجیتال مدوله شده (سمبل‌های منظومه مدولاسیون) در یک زاویه امن به سوی گیرنده قانونی ارسال می‌شوند؛ در حالی که اطلاعات ارسالی در سایر زوایای خارج از محدوده امن تخریب می‌گردند. لذا شنودگر غیرمجاز قادر به دریافت اطلاعات ارسالی نخواهد بود؛ مگر اینکه دقیقاً در راستای گیرنده قانونی قرار گرفته باشد. در این روش از جهت‌دهی پرتو در یک زاویه از پیش تعیین شده برای ارسال سیگنال داده به سمت گیرنده قانونی استفاده می‌شود؛ به صورتی که الگوی منظومه سیگنال دریافتی در زاویه مطلوب، حفظ و در سایر زوایا تخریب می‌شود.

ساختارهای متفاوتی برای دستیابی به مدولاسیون جهتی پیشنهاد شده است. در [۷] ساختاری برای درهم‌ریزی توأم فاز و دامنه نقاط منظومه مدولاسیون در جهت‌های ناخواسته در عین ارسال صحیح در جهت گیرنده قانونی برای سیستم MISO پیشنهاد شده است. در [۸] یک راهکار جدید برای مدولاسیون جهتی مبتنی بر آرایه چندگانگی فرکانسی پیشنهاد شده است. برخلاف آنتن آرایه فازی که در آن فرکانس سیگنال تحریک تمامی عناصرها یکسان است، در روش آرایه چندگانگی فرکانسی از یک اختلاف فرکانس هدفمند بین آرایه‌ها استفاده می‌شود. این اختلاف فرکانسی منجر به تشکیل یک الگوی پرتو می‌شود که جهت تمرکز آن تابعی از زمان، زاویه و فاصله است [۸].

یک آرایه چندگانگی فرکانسی خطی می‌تواند در هر دو بعد زاویه و فاصله باعث بهبود عملکرد امنیت لایه فیزیکی شود [۹] و [۱۰]. این مهم از آنجا ناشی می‌شود که آرایه چندگانگی فرکانسی خطی قادر به ایجاد یک الگوی پرتوی وابسته به فاصله و زاویه است. در این آرایه، فرکانس مرکزی عناصر به صورت خطی شیب داده می‌شود؛ اما همان گونه که در

چکیده: استفاده از مدولاسیون جهتی یکی از راهکارهای مطرح و کاربردی برای تأمین امنیت لایه فیزیکی در سیستم‌های مخابراتی مدرن است. در این روش، سیگنال پیام توسط آرایه‌ای از آنتن‌های آنتن مدوله شده و در یک جهت مشخص برای گیرنده قانونی ارسال می‌گردد؛ به گونه‌ای که در سایر جهت‌ها منظومه سیگنال تخریب شده و توسط شنودگر قابل دریافت نیست. با استفاده از مدولاسیون جهتی مبتنی بر آرایه چندگانگی فرکانسی تصادفی می‌توان مخابره امنی را در دو بعد زاویه و فاصله برای گیرنده قانونی فراهم آورد. علاوه بر عملکرد مناسب این روش در مواقعی که شنودگر در محدوده نزدیک به گیرنده قانونی قرار دارد، عملکرد محرمانگی به شدت افت پیدا می‌کند که این مشکل را می‌توان با استفاده از نویز مصنوعی بهبود داد. در این مقاله، شیوه جدیدی برای بهبود امنیت لایه فیزیکی با به کارگیری نویز مصنوعی به همراه مدولاسیون جهتی مبتنی بر آرایه چندگانگی فرکانس تصادفی و تخصیص توان بهینه برای دستیابی به بیشینه نرخ محرمانگی پیشنهاد می‌شود. نتایج شبیه‌سازی بیانگر بهبود نرخ محرمانگی امنیت لایه فیزیکی به میزان حداقل یک بیت بر ثانیه بر هرتز در مقایسه با روش عدم استفاده از نویز مصنوعی و حداقل دو بیت بر ثانیه بر هرتز در مقایسه با روش مدولاسیون جهتی مبتنی بر آرایه فازی است.

کلیدواژه: امنیت لایه فیزیکی، آرایه چندگانگی فرکانسی تصادفی، مدولاسیون جهتی، نویز مصنوعی، نرخ محرمانگی.

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌هایی که باید در طراحی سیستم‌های ارتباطی مدرن به کار گرفته شود، بحث تأمین امنیت است؛ به خصوص در ارتباطات بی‌سیم که نسبت به ارتباطات سیمی، سیگنال ارسالی به دلیل خاصیت همه‌پخش به راحتی در اختیار شنودگر قرار می‌گیرد.

یکی از روش‌های برقراری امنیت در شبکه‌های بی‌سیم که اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است، به کارگیری راهکارهای امنیت لایه فیزیکی است. امنیت لایه فیزیکی به عنوان رویکردی نوین، سازوکارهای مختلفی در جهت حفظ ارتباطات بی‌سیم در برابر شنود کاربران غیرقانونی پیشنهاد داده است [۱] تا [۳]. برخلاف روش‌های رمزنگاری و نهان‌نگاری که

این مقاله در تاریخ ۲ مهر ماه ۱۴۰۲ دریافت و در تاریخ ۲۵ اسفند ماه ۱۴۰۲ بازنگری شد.

مهدی طیب‌مسعود، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، (email: mahdi_tm@gmail.com).

حسین خالقی بیزی (نویسنده مسئول)، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، (email: bizaki@yahoo.com).

محرمانگی اطلاعات وضعیت کانال گیرنده قانونی وابسته نیست [۱۳]. این بدان معنی است که گیرنده قانونی می‌تواند اطلاعات وضعیت کانال خود را بدون نگرانی از شنود شدن به صورت مستقیم برای فرستنده ارسال کند. در [۱۴] به منظور جبران افت عملکرد محرمانگی ناشی از نقیصه سخت‌افزاری در یک ساختار مبتنی بر سطوح هوشمند قابل پیکربندی مجدد (RIS) از نویز مصنوعی استفاده شده است. ترکیب نویز مصنوعی و مدولاسیون جهتی به‌عنوان یک راهکار عملی و کارآمد در سناریوهای عملکردی متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفته است. در [۱۵] استفاده از این ترکیب برای بهبود نرخ محرمانگی در یک ساختار مبتنی بر RIS پیشنهاد شده و ضریب تخصیص توان بهینه در آن محاسبه گردیده است.

در روش مدولاسیون جهتی مبتنی بر آرایه چندگانگی فرکانسی، مادامی که موقعیت (فاصله و زاویه) گیرنده قانونی اختلاف مناسبی با شنودگر داشته باشد، مخابره امنی را در لایه فیزیکی می‌توان اثبات نمود؛ اما هرچه این اختلاف کمتر شود، عملکرد محرمانگی این روش به میزان قابل توجهی افت پیدا می‌کند. به منظور جبران این افت عملکرد، استفاده هم‌زمان از نویز مصنوعی در این مقاله پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه اضافه شدن نویز مصنوعی باعث کاهش سهم توان سیگنال پیام و در نتیجه، کاهش نسبت سیگنال به نویز در گیرنده قانونی می‌شود، عملکرد محرمانگی کلی سیستم افت می‌یابد. لذا تخصیص بهینه توان به منظور بیشینه کردن نرخ محرمانگی، یک چالش مهم است که تأثیر قابل توجهی بر عملکرد محرمانگی سیستم دارد؛ به‌گونه‌ای که در مقاله حاضر تخصیص توان بهینه به هدف بیشینه کردن نرخ محرمانگی به صورت تحلیلی به دست می‌آید.

۲- مدل سیستم در روش پیشنهادی

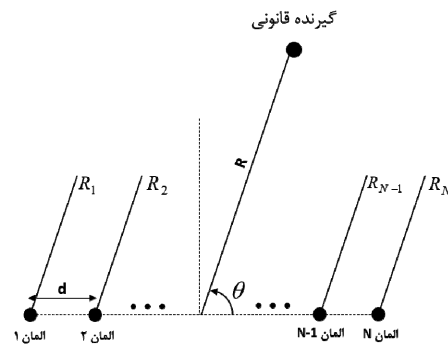
ترکیب روش مدولاسیون جهتی مبتنی بر آرایه چندگانگی فرکانسی تصادفی و نویز مصنوعی می‌تواند به‌عنوان یک روش توانمند برای امنیت لایه فیزیکی به کار گرفته شود. در این راهکار علاوه بر بیشینه کردن نسبت سیگنال به نویز در جهت و فاصله گیرنده قانونی، از نویز مصنوعی برای ایجاد تداخل در سایر جهات و فاصله‌ها برای کاهش کیفیت سیگنال شنودگر استفاده می‌شود. در شکل ۱ یک آرایه چندگانگی فرکانسی تصادفی نشان داده شده است. فرکانس تخصیص داده شده به عنصر n ام به صورت رابطه زیر است [۱۶]

$$f_n = f_c + k_n \Delta f, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

که در آن f_c فرکانس مرکزی حامل و Δf اندازه شیفت فرکانسی هر عنصر را نشان می‌دهد. در آرایه چندگانگی فرکانسی تصادفی، متغیر k_n یک متغیر تصادفی مستقل با توزیع یکسان است. توزیع k_n یک قاعده مشخص برای تخصیص فرکانس حامل به عناصر مختلف آرایه را مشخص می‌کند. فرض بر این است که عناصر آرایه به صورت خطی و با فاصله یکنواخت از یکدیگر قرار گرفته و مرجع فاز، مرکز آرایه در نظر گرفته می‌شود. فاصله عنصر n ام تا نقطه هدف با R_n نمایش داده شده و موقعیت گیرنده قانونی نسبت به آرایه، دور فرض می‌شود. با این فرضیات می‌توان نوشت [۱۶]

$$R_n = R - b_n d \cos \theta, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

که در آن θ و R به ترتیب زاویه و فاصله گیرنده قانونی و فرستنده و فاصله بین عناصر آرایه است. مقدار b_n نیز برابر (۳) است



شکل ۱: ساختار آرایه چندگانگی فرکانسی تصادفی.

[۹] و [۱۰] نشان داده شده است، ممکن است چندین زوج فاصله-زاویه وجود داشته باشد که در آنها شنودگر می‌تواند سیگنال اصلی را مشابه با گیرنده قانونی دریافت کند. در [۱۱] و [۱۲] نوع جدیدی از آرایه چندگانگی فرکانسی معرفی شده که در آن شیفت فرکانسی بین المان‌ها توسط یک الگوی تصادفی انجام می‌شود. مهم‌ترین خاصیت این روش، کاهش وابستگی متقابل بین زاویه و فاصله است. این ویژگی باعث شده که آرایه چندگانگی فرکانسی تصادفی، گزینه بسیار مناسبی برای مدولاسیون جهتی باشد تا بتوان با استفاده از آن مخابره امنی را رقم زد. علی‌رغم کارایی قابل توجه مدولاسیون جهتی در فراهم‌ساختن امکان مخابره امن بین فرستنده و گیرنده قانونی، در مواقع قرارگیری شنودگر در موقعیتی نزدیک به گیرنده قانونی، عملکرد محرمانگی این روش به شدت تنزل می‌یابد.

نویز مصنوعی، یک پیام حاوی اطلاعات بی‌ارزش یا اطلاعات اشتباه است که سهمی از توان ارسالی را به خود اختصاص می‌دهد. این پیام صرفاً برای گمراه کردن شنودگرها و ایجاد فرض وجود اطلاعات اصلی در این سیگنال ارسال می‌شود. گیرنده قانونی اطلاعات این سیگنال را دارد و از اساس می‌داند که این همان نویز مصنوعی است که توسط فرستنده و به‌طور عمد تولید شده است؛ لذا در ابتدا آن را به‌سادگی حذف کرده و اطلاعات اصلی را استخراج می‌کند. شنودگر به علت دراختیارداشتن اطلاعات سیگنال ارسالی، قادر به تمایز سیگنال نویز مصنوعی از سیگنال اصلی حاوی اطلاعات صحیح نیست و چون غالباً نویز مصنوعی سهم قابل توجهی از توان ارسالی را دارد، آن را به‌عنوان یک سیگنال اصلی به حساب آورده و سعی در شناسایی آن خواهد داشت.

در صورت آگاهی از اطلاعات کانال شنودگر، تأثیر نویز مصنوعی را می‌توان بهبود داد. مهم‌ترین هدف از تولید نویز مصنوعی، تنزل دادن کانال شنودگر احتمالی با حفظ کیفیت کانال گیرنده قانونی است. نکته قابل توجه این‌که با افزایش نسبت سیگنال به نویز شنودگر، محرمانگی ناشی از نویز مصنوعی بدون تغییر باقی خواهد ماند [۱۳]؛ چرا که افزایش نسبت سیگنال به نویز، معادل سیگنال قوی‌تر به‌همراه نویز مصنوعی قوی‌تر است.

در [۱۳] یک راهکار پیش‌کدکننده نویز مصنوعی پیشنهاد شده که در آن، فرستنده توان ارسالی را بین ارسال اطلاعات به گیرنده قانونی و ارسال نویز گوسی در فضای پوچ کانال گیرنده قانونی تقسیم می‌کند. فرض می‌شود که کانال‌های گیرنده قانونی و شنودگر به صورت مستقل دچار محوشدگی شده‌اند. در نتیجه شنودگر بخشی از نویز مصنوعی را در گیرنده خود دریافت خواهد کرد. به منظور طراحی نویز مصنوعی، فرستنده می‌بایست اطلاع دقیقی از وضعیت کانال گیرنده قانونی داشته باشد. برای یک کانال رایلی با محوشدگی تخت، گیرنده قانونی باید ضرایب کانال خود را سریع‌تر از زمان هم‌دوسی کانال برای فرستنده ارسال کند. یکی از ویژگی‌های قابل توجه نویز مصنوعی این است که محرمانگی ارتباطات به

شکل دهی پرتو به همراه نویز مصنوعی به دلیل عملکرد امنیتی قابل توجه به صورت گسترده در زمینه امنیت لایه فیزیکی به کار گرفته شده است [۱۲]. با فرض شکل دهی پرتو با نویز مصنوعی، سیگنال ارسالی را می توان به شکل زیر نمایش داد [۱۶]

$$s = \sqrt{\alpha P_t} vx + \sqrt{(1-\alpha)P_t} w \quad (۹)$$

که در آن x یک سمبل مختلط انتخابی از منظومه سیگنال، P_t توان فرستنده و α ضریب تخصیص توان بین سیگنال اطلاعات و نویز مصنوعی است. v نیز بردار شکل دهی پرتو برای سیگنال اطلاعات و w برابر با بردار نویز مصنوعی است. از آنجا که فرستنده، دانشی در مورد موقعیت شنودگر ندارد، به منظور بیشینه شدن نسبت سیگنال به نویز و اختلال در گیرنده قانونی با توجه به رابطه تعامد نویز مصنوعی بر کانال گیرنده قانونی باید رابطه زیر برقرار باشد

$$v = h(\theta_B, R_B) \quad (۱۰)$$

که در آن $h(\theta_B, R_B)$ بردار هدایت آرایه چندگانگی فرکانسی تصادفی در فرستنده به گیرنده قانونی است که با جایگزینی (θ, R) با (θ_B, R_B) در (۸) به دست می آید. علاوه بر آن، بردار نویز مصنوعی w در (۹) باید در فضای پوچ بردار $h(\theta_B, R_B)$ قرار داشته باشد؛ یعنی $h^H(\theta_B, R_B)w = 0$ تا از تداخل با گیرنده قانونی اجتناب شود. تحت این شرایط، بردار w را می توان به صورت زیر نمایش داد [۱۷]

$$w = \frac{(I_N - h(\theta_B, R_B)h^H(\theta_B, R_B))z}{\|(I_N - h(\theta_B, R_B)h^H(\theta_B, R_B))z\|} \quad (۱۱)$$

که در آن z یک بردار متشکل از N متغیر تصادفی گوسی مختلط مستقل با توزیع یکسان و متقارن چرخشی با متوسط صفر و واریانس واحد، $z \sim CN(0, I_N)$ ، است. بر اساس (۹) سیگنال دریافتی در گیرنده قانونی برابر است با

$$y(\theta_B, R_B) = h^H(\theta_B, R_B)s + n_B = \sqrt{\alpha P_t} h^H(\theta_B, R_B)vx + n_B = \sqrt{\alpha P_t} x + n_B \quad (۱۲)$$

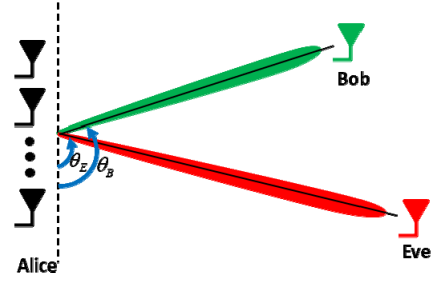
که در آن n_B نویز گوسی سفید جمع شونده با توزیع $n_B \sim CN(0, \sigma_B^2)$ است. با توجه به (۱۲) نسبت سیگنال به نویز و اختلال در گیرنده قانونی برابر خواهد بود با

$$SINR_B = \gamma_B = \frac{\alpha P_t}{\sigma_B^2} = \alpha \mu_B \quad (۱۳)$$

که در آن $\mu_B = P_t / \sigma_B^2$ است. در مقابل، سیگنال دریافتی در شنودگر را می توان به صورت زیر نمایش داد

$$y(\theta_E, R_E) = h^H(\theta_E, R_E)s + n_E = \sqrt{\alpha P_t} h^H(\theta_E, R_E)h(\theta_B, R_B)x + \sqrt{(1-\alpha)P_t} h^H(\theta_E, R_E)w + n_E \quad (۱۴)$$

که در آن n_E نویز گوسی سفید جمع شونده با توزیع $n_E \sim CN(0, \sigma_E^2)$ است. $h(\theta_E, R_E)$ بردار هدایت آرایه چندگانگی فرکانسی تصادفی فرستنده به شنودگر است که با جایگذاری (θ_E, R_E) به جای (θ, R) در (۸) حاصل شده است. طبق (۱۴)، عبارت $\sqrt{P_t} h^H(\theta_E, R_E)h(\theta_B, R_B)$ دامنه و فاز سیگنال در شنودگر را تخریب می کند و همچنین عبارت $h^H(\theta_E, R_E)w$ به دلیل عدم تعامد بین $h^H(\theta_E, R_E)$ و w ، صفر نخواهد بود. لذا این عبارت باعث تخریب منظومه x در شنودگر می شود. با توجه به (۱۴) نسبت سیگنال به نویز و اختلال در شنودگر برابر خواهد بود با



شکل ۲: مدل MISO جهت بررسی توأم نویز مصنوعی و مدولاسیون جهتی مبتنی بر آرایه چندگانگی فرکانسی تصادفی.

$$b_n = n - \frac{N-1}{2} \quad (۳)$$

با فرض اینکه فاز سیگنال ارسالی در عنصر مرجع آرایه به صورت زیر باشد

$$\psi_n(\theta, R) = \sqrt{2\pi} f_c \frac{R}{c} \quad (۴)$$

فاز سیگنال ارسالی در عنصر n ام را می توان به صورت زیر نمایش داد

$$\psi_n(\theta, R) = \sqrt{2\pi} f_n \frac{R_n}{c} = \sqrt{2\pi} (f_c \frac{R}{c} - b_n \frac{f_c d \cos \theta}{c} + k_n \Delta f \frac{R}{c} - b_n k_n \Delta f \frac{d \cos \theta}{c}) \quad (۵)$$

لذا شیفت فاز عنصر n ام نسبت به عنصر مرجع را می توان به صورت زیر نمایش داد

$$\Psi_n(\theta, R) = \psi_n(\theta, R) - \psi_n(\theta, R) = \sqrt{2\pi} (-b_n \frac{f_c d \cos \theta}{c} + k_n \Delta f \frac{R}{c} - b_n k_n \Delta f \frac{d \cos \theta}{c}) \quad (۶)$$

عبارت دوم در (۶) نشان می دهد که الگوی تشعشعی آرایه به صورت هم زمان به فاصله و زاویه با گیرنده وابسته است. به طور معمول، فرکانس حامل بسیار بزرگتر از شیفت فرکانس بوده و بنابراین می توان فرض $N \Delta f \ll f_c$ را در نظر گرفت. از طرفی d نیز در مقیاس طول موج بوده و در نتیجه عبارت سوم در (۶) را می توان نادیده گرفت [۹]. لذا شیفت فاز تعریف شده در (۶) را می توان به صورت زیر تقریب زد

$$\Psi_n(\theta, R) \approx \frac{\sqrt{2\pi}}{c} (-b_n f_c d \cos \theta + k_n \Delta f R) \quad (۷)$$

در نهایت بردار هدایت نرمالیزه شده^۱ در یک موقعیت مشخص (θ, R) به صورت زیر خواهد بود

$$h(\theta, R) = \frac{1}{\sqrt{N}} [e^{j\Psi_1(\theta, R)}, e^{j\Psi_2(\theta, R)}, \dots, e^{j\Psi_{N-1}(\theta, R)}]^T \quad (۸)$$

از آنجا که مدولاسیون جهتی یک فناوری سمت فرستنده است، سیستم به صورت یک کانال MISO در نظر گرفته می شود. همچنین کانال بین فرستنده و گیرنده قانونی و شنودگر به صورت نویز سفید گوسی جمع شونده (AWGN) فرض گردیده است. مطابق شکل ۲ در این مدل، فرستنده (آلیس) مجهز به N آنتن بوده و گیرنده قانونی (باب) و شنودگر دارای یک آنتن هستند. فرض می شود که موقعیت گیرنده قانونی، (θ_B, R_B) ، به طور دقیق برای فرستنده معلوم می باشد؛ در حالی که موقعیت شنودگر، (θ_E, R_E) ، برای فرستنده نامعلوم است. همچنین مدل کانال به صورت دید مستقیم و افت فضای آزاد فرض می شود.

1. Normalized Steering Vector

$$R_s = \log_r \left[\left(\frac{\sigma_B^r + \alpha P_t}{\sigma_B^r} \right) \right] \times \frac{(\gamma - \alpha) \left| h^H(\theta_E, R_E) w \right|^r + \frac{\sigma_E^r}{\sigma_B^r}}{(\gamma - \alpha) \left| h^H(\theta_E, R_E) w \right|^r + \frac{\sigma_E^r}{\sigma_B^r} + \alpha P_t \left| h^H(\theta_E, R_E) h^H(\theta_B, R_B) \right|^r} \quad (21)$$

استفاده می‌کنیم. با توجه به (۱۷)، (۲۱) را می‌توان نوشت و با فرض $\sigma_E^r = \sigma_B^r = \sigma^r$ و پس از ساده‌سازی (۲۱) خواهیم داشت

$$R_s(\alpha) = \log_r \frac{I\alpha^r + J\alpha + K}{M\alpha + K} = \log_r \phi(\alpha) \quad (22)$$

که در آن

$$I = -P_t \left| h^H(\theta_E, R_E) \right|^r \quad (23)$$

$$J = (P_t - \sigma^r) \left| h^H(\theta_E, R_E) w \right|^r + P_t \quad (24)$$

$$K = \sigma^r \left(\left| h^H(\theta_E, R_E) w \right|^r + 1 \right) \quad (25)$$

$$M = P_t \sigma^r \left| h^H(\theta_E, R_E) h(\theta_B, R_B) \right|^r - \sigma^r \left| h^H(\theta_E, R_E) w \right|^r \quad (26)$$

با توجه به (۲۲) واضح است که $R_s(\alpha)$ در بازه $[0, 1]$ یک تابع پیوسته و مشتق‌پذیر نسبت به α است؛ لذا نقطه بهینه R_s^* یا باید در نقاط مرزی باشد یا در نقاط مانا. پس مسئله بهینه‌سازی را در دو گام می‌توان حل نمود: گام اول یافتن نقاط مانا با استفاده از مشتق مرتبه اول و گام دوم یافتن نقطه بهینه با مقایسه مقدار $R_s(\alpha)$ به‌ازای مجموعه‌ای از نقاط کاندیدا در گام اول و نقاط مرزی بازه $[0, 1]$. به‌منظور یافتن نقاط مانا با مشتق‌گیری از (۲۲) داریم

$$\frac{\partial \phi(\alpha)}{\partial \alpha} = \frac{IM\alpha^r + rIK\alpha + K(J - M)}{(M\alpha + K)^r} = 0 \quad (27)$$

با فرض $M\alpha + K \neq 0$ خواهیم داشت

$$IM\alpha^r + rIK\alpha + K(J - M) = 0 \quad (28)$$

به‌طوری که با حل رابطه فوق داریم

$$\alpha_l = \frac{-KI + \sqrt{\Delta}}{IM} \quad (29)$$

$$\alpha_r = \frac{-KI - \sqrt{\Delta}}{IM} \quad (30)$$

که در آن $\Delta = I^2 K^2 - IMK(J - M)$ است.

نکته: اگر $\Delta \geq 0$ باشد با توجه به گام دوم بهینه‌سازی، ضریب تخصیص توان بهینه برای بیشینه‌کردن نرخ محرمانگی برابر خواهد بود با

$$\alpha^* = \arg \max \{ \phi(0), \phi(\alpha_l), \phi(\alpha_r), \phi(1) \} \quad (31)$$

در صورتی که $\Delta < 0$ و $IM > 0$ باشد، آنگاه نرخ محرمانگی تابعی اکیداً صعودی نسبت به α بوده و $\alpha^* = 1$ خواهد بود. در غیر این صورت نرخ محرمانگی تابعی اکیداً نزولی بوده و $\alpha^* = 0$ خواهد بود. فرایند پیشنهادی تخصیص بهینه توان در الگوریتم شکل ۳ نشان داده شده است.

کاربرد راهکار پیشنهادی برای بهینه‌سازی ضریب تخصیص توان به این صورت است که پیش از برقراری ارتباط و بر اساس نیازمندی‌های

$$SINR_E = \gamma_E = \frac{\alpha P_t \left| h^H(\theta_E, R_E) h(\theta_B, R_B) \right|^r}{(\gamma - \alpha) P_t \left| h^H(\theta_E, R_E) w \right|^r + \sigma_E^r} = \quad (15)$$

$$\frac{\alpha \mu_B \left| h^H(\theta_E, R_E) h(\theta_B, R_B) \right|^r}{(\gamma - \alpha) \mu_B \left| h^H(\theta_E, R_E) w \right|^r + \beta}$$

که در آن $\beta \triangleq \sigma_E^r / \sigma_B^r$ است.

۳- تخصیص بهینه توان در روش پیشنهادی

برای بررسی عملکرد امنیت لایه فیزیکی، نرخ محرمانگی را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم [۵]

$$R_S = R_B - R_E \quad (16)$$

که R_E و R_B به‌ترتیب نرخ‌های مربوط به کانال فرستنده به گیرنده قانونی و فرستنده به شنودگر است. با جاگذاری (۱۳) و (۱۵) در (۱۶) داریم

$$R_S = R_B - R_E = \log_r(1 + SINR_B) - \log_r(1 + SINR_E) = \log_r \left(1 + \frac{\alpha P_t}{\sigma_B^r} \right) - \quad (17)$$

$$\log_r \left(1 + \frac{\alpha P_t \left| h^H(\theta_E, R_E) h(\theta_B, R_B) \right|^r}{(\gamma - \alpha) \left| h^H(\theta_E, R_E) w \right|^r + \frac{\sigma_E^r}{\sigma_B^r}} \right)$$

نرخ محرمانگی قابل دستیابی را می‌توان به‌صورت زیر نمایش داد

$$R_S = \max \{ \cdot, R_B - R_E \} \quad (18)$$

با توجه به (۱۳) و (۱۵)، نسبت سیگنال به نویز و تداخل تابعی از α ، ν و w است؛ یعنی $SINR = f(\alpha, \nu, w)$. در نتیجه مسئله بهینه‌سازی را می‌توان به‌صورت زیر نمایش داد

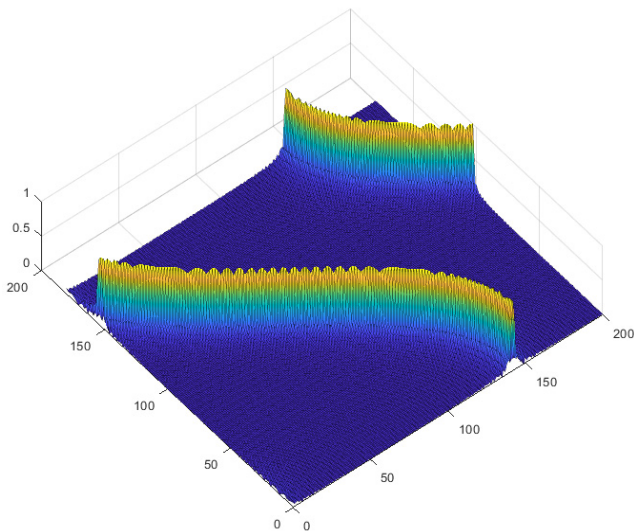
$$R_S^* = \max_{\alpha, \nu, w} R_S(\alpha, \nu, w), \text{ s.t. } \begin{cases} 0 \leq \alpha \leq 1 \\ \nu^H \nu = 1 \\ w^H w = 1 \end{cases} \quad (19)$$

که $R_S(\alpha, \nu, w) = \max \{ \cdot, R_B - R_E \}$ است. با توجه به فرض مسئله که در آن هدف از بهینه‌سازی، یافتن ضریب توان بهینه برای بیشینه‌کردن نرخ محرمانگی است، برای بیشینه‌شدن نسبت سیگنال به نویز در گیرنده مطابق (۱۰)، بردار جهت‌دهی پرتو، ثابت و معادل بردار هدایت آرایه فرض شده است. همچنین بردار نویز مصنوعی نیز مطابق (۱۱) بر اساس فضای پوچ بردار $h(\theta_B, R_B)$ و برای سادگی محاسبات، ثابت فرض شده است.

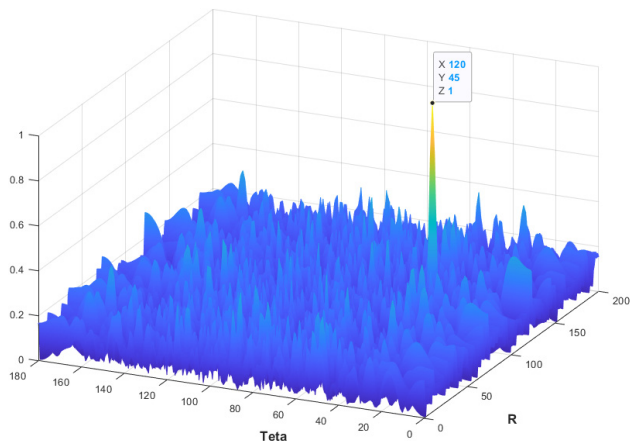
لذا مسئله بهینه‌سازی به ضریب تخصیص توان محدود می‌شود؛ یعنی

$$R_S^* = \max_{\alpha} R_S(\alpha), \text{ s.t. } 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (20)$$

رابطه (۱۷) به‌دلیل تابع لگاریتم و قید آن یک رابطه غیرمحدب است. لذا برای یافتن مقدار بیشینه آن از روش جستجوی جامع تک‌بعدی [۱۸]



شکل ۵: ضریب همبستگی بین $h(\theta_E, R_E)$ و $h(\theta_B, R_B)$ برای مقادیر مختلف (θ, R) در آرایه چندگانگی فرکانس خطی.



شکل ۶: ضریب همبستگی بین $h(\theta_E, R_E)$ و $h(\theta_B, R_B)$ برای مقادیر مختلف (θ, R) در آرایه چندگانگی فرکانس تصادفی.

قرارگیری در هر یک از موقعیت‌های (θ, R) با مقدار ضریب همبستگی بیشینه، قادر به دریافت سیگنال پیام خواهد بود؛ اما در آرایه چندگانگی فرکانسی تصادفی، ابهام ناشی از کولینگ بین زاویه و فاصله وجود ندارد و صرفاً یک زوج (θ, R) می‌باشد که در آن دریافت کامل سیگنال پیام امکان‌پذیر است (شکل ۶). همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، خاصیت پرپدیو یک‌بودن در راستای فاصله از بین رفته است.

۴-۲ اثر ضریب توان روی نرخ محرمانگی

شکل ۷، مقدار نرخ محرمانگی ناشی از راهکار پیشنهادی در (۱۷) و به‌ازای ضریب تخصیص توان بین سیگنال پیام و نویز مصنوعی را برای مقادیر مختلف زاویه شنودگر قانونی که در فاصله ثابت ۱۲۵ متری نسبت به فرستنده قرار دارد، نشان می‌دهد. مطابق این شکل، مادامی که شنودگر و گیرنده قانونی اختلاف زاویه بالایی دارند (بیش از ۱۵ درجه)، استفاده از نویز مصنوعی تأثیر چندانی بر بهبود عملکرد امنیت لایه فیزیکی ندارد. در این حالت، بیشینه نرخ محرمانگی زمانی قابل حصول است که کل توان سیستم به سیگنال پیام اختصاص یابد (به‌ازای $\alpha = 1$)؛ اما با کاهش اختلاف زاویه بین شنودگر و گیرنده قانونی، محرمانگی ناشی از مدولاسیون جهتی به‌شدت کاهش یافته و محرمانگی ناشی از نویز مصنوعی، موجب بهبود عملکرد کلی امنیت لایه فیزیکی سیستم می‌شود. در موقعیت‌های نزدیک به گیرنده قانونی در صورت عدم وجود نویز

(۱) مقداردهی اولیه: P_r ، $h(\theta_E, R_E)$ ، $h(\theta_B, R_B)$ و SNR.

(۲) محاسبه $\Delta = I^T K^T - IMK(J - M)$

(a) اگر $\Delta \geq 0$ باشد:

حالت ۱: اگر $\alpha_r \in (0, 1)$ و $\alpha_e \in (0, 1)$ آنگاه مقایسه مقادیر $\phi(\alpha_r)$ ، $\phi(\alpha_e)$ و $\phi(1)$.

حالت ۲: اگر $\alpha_r \notin (0, 1)$ و $\alpha_e \in (0, 1)$ آنگاه مقایسه مقادیر $\phi(\alpha_r)$ ، $\phi(\alpha_e)$ و $\phi(1)$.

حالت ۳: اگر $\alpha_r \in (0, 1)$ و $\alpha_e \notin (0, 1)$ آنگاه مقایسه مقادیر $\phi(\alpha_r)$ ، $\phi(\alpha_e)$ و $\phi(1)$.

حالت ۴: اگر $\alpha_r \notin (0, 1)$ و $\alpha_e \notin (0, 1)$ آنگاه مقایسه مقادیر $\phi(\alpha_r)$ و $\phi(\alpha_e)$.

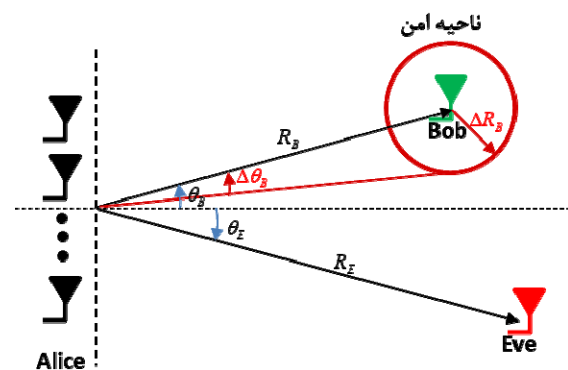
α^* متناظر با α ای است که مقدار $\phi(\alpha)$ را بیشینه کند.

(b) اگر $\Delta \geq 0$ باشد:

حالت ۱: اگر $IM > 0$ آنگاه نرخ محرمانگی تابعی اکیداً صعودی نسبت به α بوده و $\alpha^* = 1$ خواهد بود.

حالت ۲: اگر $IM < 0$ آنگاه نرخ محرمانگی تابعی اکیداً نزولی نسبت به α بوده و $\alpha^* = 0$ خواهد بود.

شکل ۳: روش پیشنهادی تخصیص بهینه توان.



شکل ۴: ناحیه امن در اطراف گیرنده قانونی.

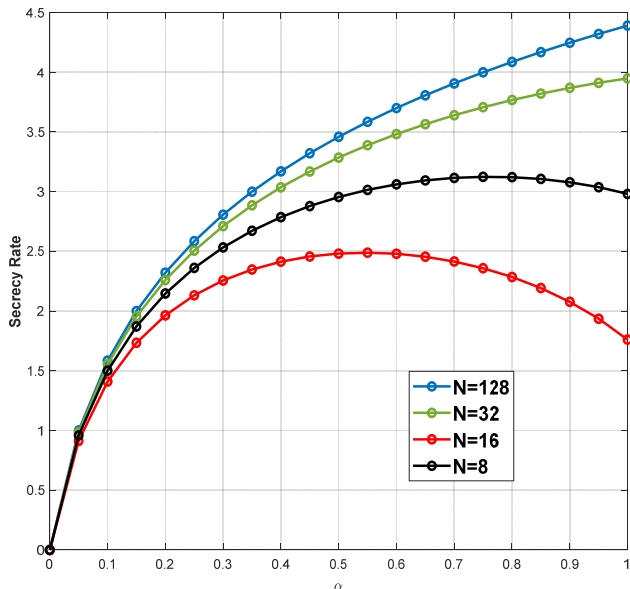
سیستم، یک ناحیه امن در اطراف گیرنده قانونی تعریف می‌شود. مطابق شکل ۴ ناحیه محرمانگی در مدولاسیون جهتی مبتنی بر آرایه چندگانگی فرکانسی بدون لحاظ کردن نویز مصنوعی، حداقل فاصله و زاویه‌ای از شنودگر است که در آن نرخ محرمانگی مثبت و یا یک حد آستانه مطلوب دارد. لذا با معلوم بودن این زاویه و فاصله برای فرستنده و فرض قرارگیری شنودگر در مرز این ناحیه (بدترین حالت ممکن) می‌توان با استفاده از راهکار پیشنهادی، ضریب تخصیص بهینه را محاسبه نمود.

۴-۳ شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

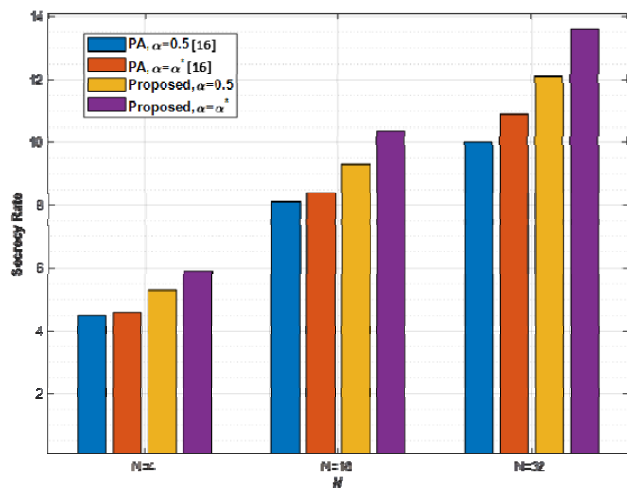
برای بررسی عملکرد راهکار پیشنهادی، شبیه‌سازی عددی در دستور کار قرار گرفته است. فرض شده که گیرنده قانونی در زاویه ۴۵ درجه و با فاصله ۱۲۰ متری نسبت به فرستنده قرار دارد. فرکانس مرکزی ۱ GHz، اختلاف فرکانس المان‌های آرایه برابر ۳ MHz، فاصله المان‌ها با یکدیگر نصف طول موج و $\beta = \sigma_E^2 / \sigma_B^2 = 1$ فرض شده است.

۴-۱ اثر تصادفی بودن فرکانس المان‌ها

به‌منظور مقایسه اثر تغییر اختلاف فرکانس المان‌های آرایه به‌صورت تصادفی با روش افزایش خطی در شکل‌های ۵ و ۶، ضریب همبستگی بین $h(\theta_E, R_E)$ و $h(\theta_B, R_B)$ برای مقادیر مختلف (θ, R) نشان داده شده است. از شکل ۵ مشاهده می‌شود که به‌دلیل خاصیت ذاتی آرایه خطی، پاسخ یکتا برای زوج (θ, R) وجود ندارد و شنودگر در صورت

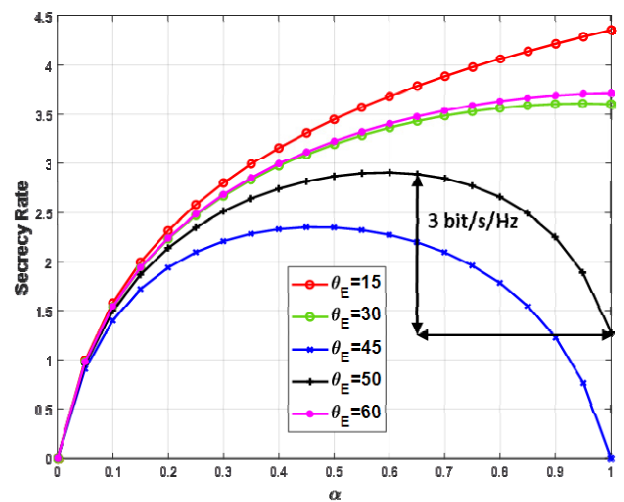


شکل ۹: منحنی نرخ محرمانگی به‌ازای ضریب تخصیص توان برای مقادیر مختلف تعداد المان‌های آرایه آنتن فرستنده.

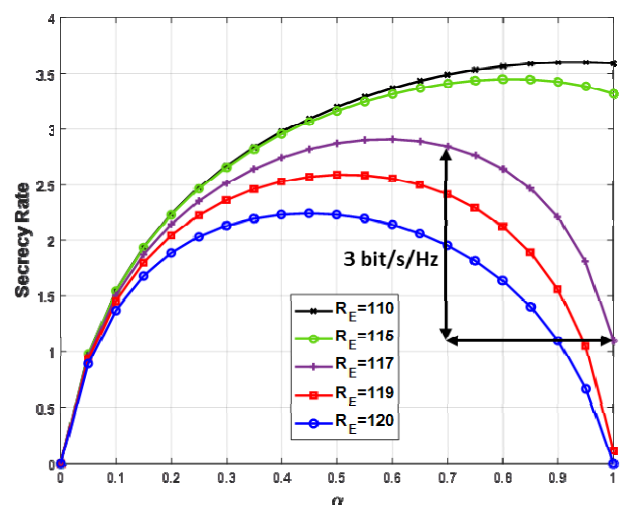


شکل ۱۰: مقایسه نرخ محرمانگی ناشی از تخصیص توان بهینه و ثابت به‌ازای مقادیر مختلف تعداد المان آرایه.

به‌تنهایی قادر به تأمین محرمانگی مورد انتظار در امنیت لایه فیزیکی است؛ اما با کاهش تعداد المان‌های آرایه، این نویز مصنوعی است که به همراه مدولاسیون جهتی، موجب بهبود عملکرد کلی سیستم می‌شود. در شکل ۱۰، نمودار هیستوگرام نرخ محرمانگی برای مقادیر مختلف تعداد المان آرایه، ناشی از تخصیص ثابت و بهینه توان در راهکار پیشنهادی و ساختار ارائه‌شده در [۱۶] برای $SNR = 30 \text{ dB}$ نشان داده شده است. در [۱۶] استفاده از مدولاسیون جهتی مبتنی بر آرایه فازی به همراه نویز مصنوعی جهت بهبود عملکرد امنیت لایه فیزیکی پیشنهاد شده است. مطابق این شکل، هرچه تعداد المان‌های آرایه بیشتر باشد مطابق انتظار، قدرت تفکیک‌پذیری مدولاسیون جهتی بیشتر خواهد شد؛ اما تخصیص بهینه توان در مقایسه با تخصیص ثابت پنجاه درصد توان باعث بهبود نرخ محرمانگی کلی سیستم خواهد شد. برای تعداد ۳۲ المان در راهکار پیشنهادی، بهبود عملکرد در حدود $1/5$ بیت بر هرتز بر ثانیه است. در مقایسه با [۱۶]، قدرت بالاتر مدولاسیون جهتی مبتنی بر آرایه چندگانگی فرکانسی نسبت به روش آرایه فازی در تأمین امنیت لایه فیزیکی برای تمامی مقادیر N مشهود است. این اختلاف برای ۳۲ المان بیش از ۲ بیت بر ثانیه بر هرتز است.



شکل ۷: منحنی نرخ محرمانگی به‌ازای ضریب تخصیص توان برای مقادیر مختلف زاویه شنودگر نسبت به فرستنده.

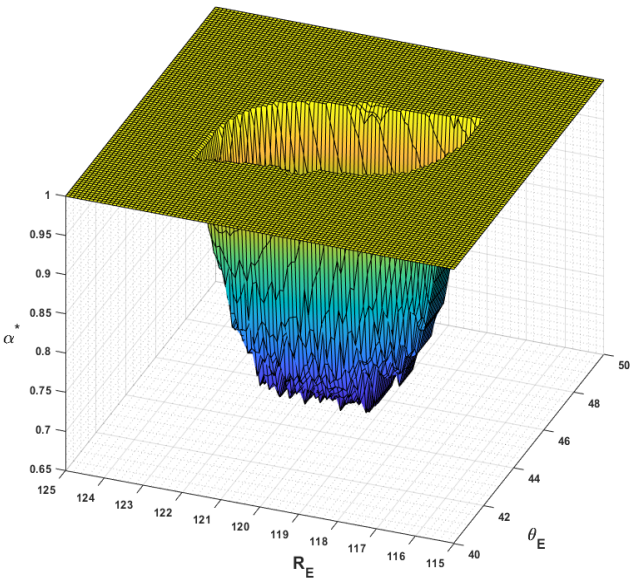


شکل ۸: منحنی نرخ محرمانگی به‌ازای ضریب تخصیص توان برای مقادیر مختلف فاصله شنودگر نسبت به فرستنده.

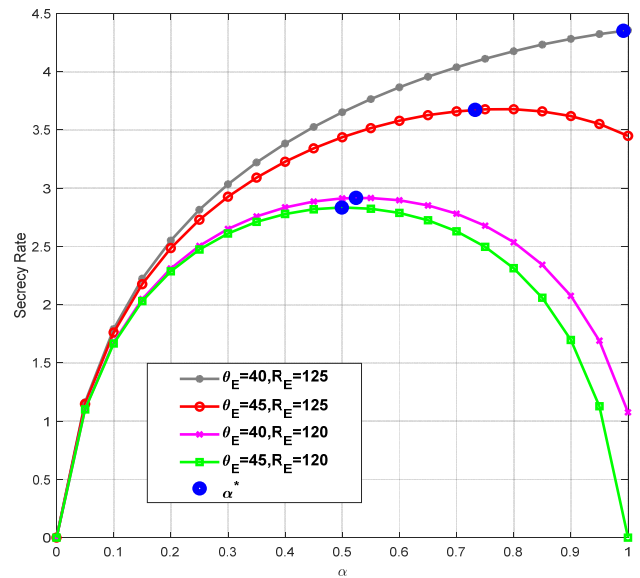
مصنوعی (به‌ازای $\alpha = 1$)، نرخ محرمانگی به سمت صفر میل می‌کند؛ اما با تخصیص بخشی از توان به نویز مصنوعی، بهبود قابل توجهی در نرخ محرمانگی حاصل می‌شود. مطابق شکل ۷ زمانی که موقعیت شنودگر نسبت به گیرنده قانونی ۵ درجه اختلاف دارد، تخصیص ۳۵٪ توان ارسالی به نویز مصنوعی باعث بهبود بیش از دو برابری نرخ محرمانگی می‌شود. در شکل ۸، مقدار نرخ محرمانگی ناشی از راهکار پیشنهادی به‌ازای ضریب تخصیص توان بین سیگنال پیام و نویز مصنوعی برای مقادیر مختلف فاصله شنودگر قانونی‌ای که در زاویه ثابت ۴۵ درجه نسبت به فرستنده قرار دارد، آمده است. مطابق شکل، زمانی که اختلاف فاصله بین شنودگر و گیرنده قانونی کم است (کمتر از ۵ متر)، ترکیب نویز مصنوعی و مدولاسیون جهتی می‌تواند باعث بهبود نرخ محرمانگی سیستم شود. زمانی که موقعیت شنودگر نسبت به گیرنده قانونی ۳ متر اختلاف دارد، تخصیص ۳۰ درصد توان ارسالی به نویز مصنوعی باعث بهبودی نرخ محرمانگی به میزان ۳ بیت بر ثانیه بر هرتز می‌شود.

۳-۴ تأثیر تعداد المان‌ها روی نرخ محرمانگی

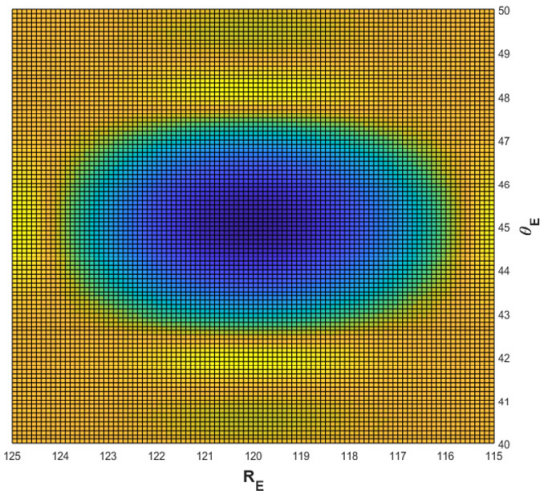
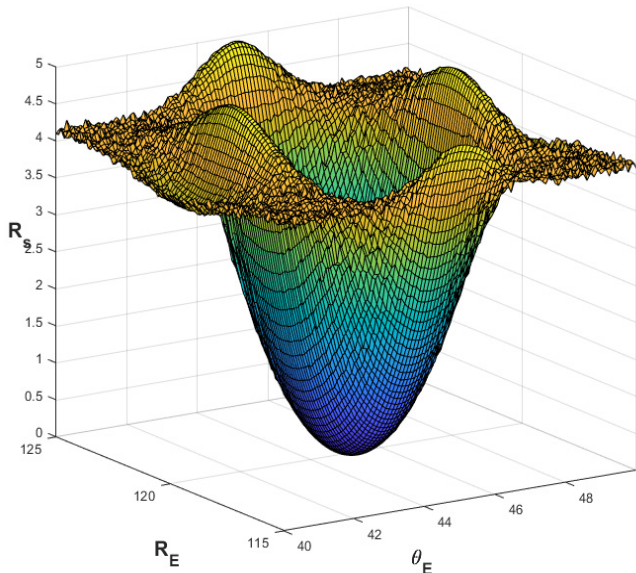
در شکل ۹، نرخ محرمانگی سیستم به‌ازای تعداد المان‌های مختلف آرایه آنتن فرستنده نشان داده شده است. مطابق انتظار با افزایش تعداد المان‌های آرایه، قدرت تفکیک‌پذیری مدولاسیون جهتی افزایش یافته و



شکل ۱۲: منحنی ضریب تخصیص توان بهینه به ازای مقادیر مختلف فاصله و زاویه شنودگر.



شکل ۱۱: منحنی نرخ محرمانگی به ازای ضریب تخصیص توان و تعیین ضریب تخصیص توان بهینه برای بیشینه کردن نرخ محرمانگی.



شکل ۱۳: منحنی نرخ محرمانگی به ازای مقادیر مختلف فاصله، زاویه شنودگر و $\alpha^* = 1$.

مختلف زاویه و فاصله شنودگر و برای مقدار ضریب تخصیص توان ۱ و ۰٫۷ نشان داده شده است. در شکل ۱۳، صرفاً مدولاسیون جهتی بر عملکرد سیستم تأثیر دارد و با نزدیک شدن موقعیت شنودگر به گیرنده قانونی، نرخ محرمانگی به صفر میل می کند؛ اما با تخصیص ۳۰ درصد از توان به نویز مصنوعی، مطابق شکل ۱۴ در موقعیت هایی که شنودگر در نزدیکی گیرنده قانونی قرار دارد، عملکرد محرمانگی سیستم تا ۳ بیت بر ثانیه بر هرتر بهبود خواهد یافت.

۵- نتیجه گیری

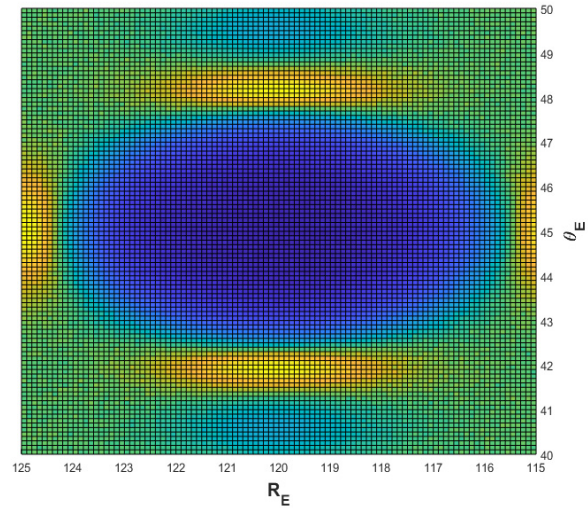
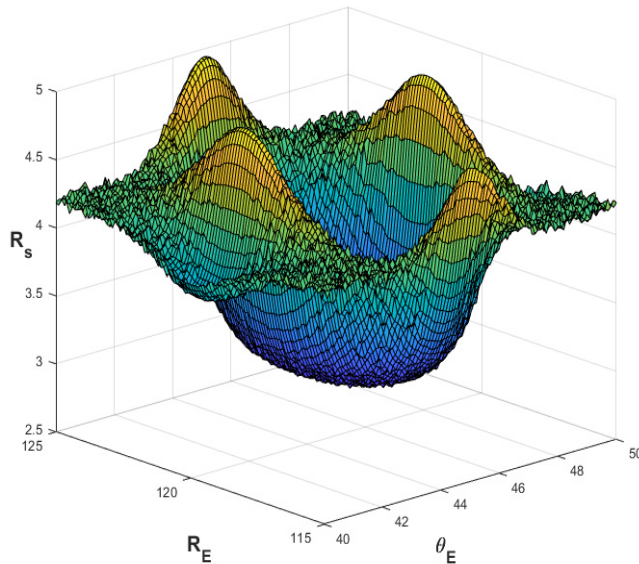
در این مقاله راهکار ترکیبی استفاده از مدولاسیون جهتی مبتنی بر آرایه چندگانگی فرکانسی تصادفی به همراه نویز مصنوعی، جهت بهبود عملکرد امنیت لایه فیزیکی مطرح شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. برخلاف مدولاسیون جهتی آرایه فازی، با استفاده از مدولاسیون جهتی مبتنی بر آرایه چندگانگی فرکانسی می توان مخابره امنی را در دو بعد زاویه و فاصله برای گیرنده قانونی فراهم آورد. در روش پیشنهادی به منظور اجتناب از برهم نهی زوج فاصله و زاویه، از افزایش اختلاف فرکانسی المان های آرایه

۴-۴ بررسی عملکرد تخصیص توان بهینه

در شکل ۱۱، مقادیر ضریب تخصیص توان بهینه برای بیشینه شدن نرخ محرمانگی به ازای موقعیت های مختلف شنودگر با توجه به (۲۹) نشان داده شده است. مشاهده می شود که در موقعیت های نزدیک به گیرنده قانونی، تأثیر مدولاسیون جهتی به صورت قابل توجهی کاهش می یابد؛ اما با تخصیص بهینه توان بین سیگنال اطلاعات و نویز مصنوعی می توان کماکان مخابره امن با نرخ محرمانگی مثبت را انتظار داشت.

مطابق شکل ۱۲ در مواقعی که شنودگر فاصله قابل توجهی از گیرنده قانونی دارد مطابق انتظار، مقدار تخصیص توان بهینه به نویز مصنوعی برابر صفر خواهد بود؛ یعنی مدولاسیون جهتی به تنهایی قادر به تأمین محرمانگی مورد نیاز خواهد بود و اضافه کردن نویز مصنوعی تأثیر مثبتی بر عملکرد محرمانگی سیستم نخواهد داشت؛ اما هرچه این موقعیت به گیرنده قانونی نزدیک شود، عملکرد محرمانگی به شدت افت کرده و تأثیر اضافه کردن نویز مصنوعی بر عملکرد سیستم مشهود می شود.

در شکل های ۱۳ و ۱۴، منحنی های نرخ محرمانگی به ازای مقادیر



شکل ۱۴: منحنی نرخ محرمانگی به ازای مقادیر مختلف فاصله، زاویه شنودگر و $\alpha^* = 0.7$.

- [9] P. F. Sammartino, C. J. Baker, and H. D. Griffiths, "Frequency diverse MIMO techniques for radar," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 49, no. 1, pp. 201-222, Jan. 2013.
- [10] W. Q. Wang, "Frequency diverse array antenna: new opportunities," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 57, no. 2, pp. 145-152, Apr. 2015.
- [11] Y. Liu, "Range azimuth indication using a random frequency diverse array," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP'16*, pp. 3111-3115, Shanghai, China, 20-25 Mar. 2016.
- [12] Y. Liu, H. Ruan, L. Wang, and A. Nehorai, "The random frequency diverse array: a new antenna structure for uncoupled direction-range indication in active sensing," *IEEE J. of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 11, no. 2, pp. 295-308, Mar. 2017.
- [13] N. Yang, et al., "Artificial noise: transmission optimization in multi-input single-output wiretap channels," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 63, no. 5, pp. 1771-1783, May 2015.
- [14] M. Ragheb, A. Kuhestani, M. Kazemi, H. Ahmadi, and L. Hanzo, "RIS-aided secure millimeter-wave communication under RF-chain impairments," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 73, no. 1, pp. 952-963, Jan. 2023.
- [15] R. Dong and F. Shu, "Power Allocation and Beamforming Design for RIS-Aided Secure Directional Modulation Network," arXiv preprint arXiv:2312.15504, 2023.
- [16] S. Wan, et al., "Power allocation strategy of maximizing secrecy rate for secure directional modulation networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 38794-38801, 2018.
- [17] J. Hu, F. Shu, and J. Li, "Robust synthesis method for secure directional modulation with imperfect direction angle," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 6, pp. 1084-1087, Jun. 2016.
- [18] S. S. Rao, *Engineering Optimization: Theory and Practice*, John Wiley & Sons, 2019.
- [19] H. K. Bizaki and A. Falahati, "Tomlinson-Harashima precoding with imperfect channel state information," *IET Communications*, vol. 2, no. 1, pp. 151-158, Jan. 2008.

[۲۰] ح. خالقی بیزکی و م. طیب‌مسعود، "آشکارسازی عمیق MIMO در حضور خطای تخمین کانال"، مجله پردازش سیگنال پیشرفته، جلد ۵، شماره ۱، صص. ۷-۱۱، بهار و تابستان ۱۴۰۰.

مهدی طیب‌مسعود در سال ۱۳۸۷ مدرک کارشناسی مهندسی برق گرایش مخابرات خود را از دانشگاه امام حسین (ع) و در سال ۱۳۹۲ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش مخابرات سیستم خود را از دانشگاه شاهد دریافت نمود. نام برده از سال ۱۳۸۷ در مراکز تحقیقاتی کشور در زمینه ارتباطات سیار مشغول به کار بوده و از سال ۱۳۹۷ در مقطع دکتری رشته مهندسی برق گرایش سیستم در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران مشغول به تحصیل است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شامل موضوعاتی مانند ارتباطات بی‌سیم، پردازش سیگنال، هوش مصنوعی، امنیت لایه فیزیکی و ارتباطات سیار است.

به صورت تصادفی استفاده شد. علاوه بر کارایی مناسب این روش در مواقعی که شنودگر در محدوده نزدیک به گیرنده قانونی قرار دارد، عملکرد محرمانگی به شدت افت پیدا می‌کند. برای حل این مشکل استفاده از نویز مصنوعی پیشنهاد شد. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان داد که ترکیب مدولاسیون جهتی مبتنی بر چندگانگی فرکانسی تصادفی و نویز مصنوعی موجب بهبود قابل توجه در عملکرد محرمانگی سیستم می‌شود. نهایتاً با توجه به تأثیر متقابل نویز مصنوعی بر نسبت سیگنال به نویز در گیرنده قانونی و در نتیجه افت عملکرد محرمانگی، تخصیص توان بهینه به منظور بیشینه‌کردن نرخ محرمانگی در این مقاله پیشنهاد شد. با شبیه‌سازی‌های عددی نشان داده شد که با تسهیم بهینه توان بین سیگنال پیام و نویز مصنوعی، نرخ محرمانگی نسبت به تخصیص ثابت توان، حداقل به میزان یک بیت بر ثانیه بر هر تتر نسبت به روش ارائه شده در [۱۶] بهبود یافته است. یکی از چالش‌های پیش روی مدولاسیون جهتی، وابستگی قابل توجه این راهکار به دقت بالای تخمین موقعیت گیرنده قانونی است. با استفاده از روش ارائه شده در [۱۹] و [۲۰] می‌توان خطای تخمین موقعیت را مدل کرد و بر اساس آن، یک راهکار مقاوم را در برابر خطای تخمین موقعیت توسعه داد.

مراجع

- [1] X. Chen, D. W. K. Ng, W. H. Gerstacker, and H. H. Chen, "A survey on multiple-antenna techniques for physical layer security," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 1027-1053, Second Quarter 2016.
- [2] Y. Wu, T. Q. Duong, and A. L. Swindlehurst, "Safeguarding 5G-and-beyond networks with physical layer security," *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 5, pp. 4-5, Oct. 2019.
- [3] L. J. Rodriguez, et al., "Physical layer security in wireless cooperative relay networks: state of the art and beyond," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 12, pp. 32-39, Dec. 2015.
- [4] C. E. Shannon, "Communication theory of secrecy systems," *the Bell System Technical J.*, vol. 28, no. 4, pp. 656-715, 1949.
- [5] A. D. Wyner, "The wire-tap channel," *Bell System Technical J.*, vol. 54, no. 8, pp. 1355-1387, Oct. 1975.
- [6] J. D. V. Sánchez, L. Urquiza-Aguiar, M. C. P. Paredes, and D. P. M. Osorio, "Survey on physical layer security for 5G wireless networks," *Ann. Telecommun.*, vol. 76, no. 12, pp. 155-174, 2021.
- [7] F. Shu, et al., "Directional modulation: a physical-layer security solution to B5G and future wireless networks," *IEEE Network*, vol. 34, no. 2, pp. 210-216, Mar./Apr. 2020.
- [8] W. Q. Wang, "DM using FDA antenna for secure transmission," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 11, no. 3, pp. 336-345, Feb. 2016.

حسین خالقی بیزکی مدرک دکتری خود را در رشته مهندسی برق گرایش مخابرات سیستم در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه علم و صنعت ایران دریافت نموده است. دکتر خالقی مولف / همکار بیش از هشتاد مقاله و مولف چندین کتاب می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شامل موضوعاتی مانند سیستم‌های مخابرات بی‌سیم، سیستم‌های مخابرات MIMO، نظریه اطلاعات، کدگذاری کانال، پردازش سیگنال‌های مخابراتی و راداری، امنیت لایه فیزیکی و کاربرد هوش مصنوعی در سیستم‌های مخابراتی است.