**Electronic & Cyber Defense**
Vol. 13, No. 3, 2025 (Serial No. 51). pp 115- 128
ISSN: 2322-4347, E-ISSN: 2980-8979

# Improving Physical Layer Security in 5G Networks Based on Cooperative Node Performance

**Amir Roostaei**[1], **Reza Esfahani***[2]

[1] PhD student,, Imam Hossein University, Tehran, Iran. resfahani@ihu.ac.ir
[2] Assistant Professor, Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran. (Correspondence: amirroostaei21@gmail.com)

ARTICLE INFO

**Article history:**

**Article Type:** Research paper

**Receive:** 22 July 2025
**Revise:** 30 August 2025
**Accept:** 14 October 2025
**Available online:** 23 October 2025

**Keywords:**
Physical Layer Security
Eavesdropping Link Outage Probability
Cooperative Interference
Beamforming.

ABSTRACT

With the expansion of 5G wireless networks and the need for sensitive information exchange, security has become a fundamental challenge. Traditional cryptographic methods, despite their algorithmic complexity, are vulnerable to technological advancements and require secure communication channels for cryptographic key exchange. This paper examines Physical Layer Security (PLS) solutions that enable secure data exchange by utilizing the inherent characteristics of wireless communication channels. The proposed system in this paper is a multi-antenna wireless communication system where users exchange secure information through a relay node in the presence of an eavesdropping node. To counter eavesdropping, a cooperative interference strategy is presented in two distinct phases, which, through artificial interference beamforming and information reception beamforming, reduces the Signal-to-Interference-and-Noise Ratio (SINR) at the eavesdropping node while increasing it at authorized nodes. The optimal system design is solved using Semi-Definite Relaxation (SDR), and the Transmit Zero-Forcing (TZF) beamforming scheme is also introduced for comparison with optimal performance. Simulation results show that the optimal scheme improves the average secrecy rate by 11.98 bps/Hz and 16.33 bps/Hz compared to the TZF scheme and reference system, respectively, and achieves an eavesdropping link outage probability of 81%. Meanwhile, the TZF scheme, with acceptable performance compared to the reference system, improves the secrecy rate by 4.35 bps/Hz and increases the eavesdropping link outage probability to 0.9%.

**Cite this article:** Roostaei, A., & Esfahani, .R. (2025). Improving Physical Layer Security in 5G Networks Based on Cooperative Node Performance. *Electronic and Cyber Defense*, *13*(3), 115- 128.
DOR: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1404.13.3.8.7

«پدافند الکترونیکی و سایبری»
سال سیزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴، ص ۱۱۵- ۱۲۸
شاپا الکترونیکی: ۴۳۴۷ -۲۳۲۲ شاپا چاپی: ۸۹۷۹- ۲۹۸۰

# بهبود امنیت لایه فیزیکی در شبکه 5G مبتنی بر عملکرد مشارکتی گره‌ها

**امیر روستایی[1]، رضا اصفهانی[2*]**

[1] دانشجوی دکتری، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. resfahani@ihu.ac.ir
[2] استادیار، دانشگاه امام حسین(ع) ، تهران ، ایران. (نویسنده مسئول: amirroostaei21@gmail.com)

**چکیده**

با گسترش شبکه‌های بی‌سیم 5G و نیاز به تبادل اطلاعات حساس، تأمین امنیت به چالشی اساسی تبدیل‌شده است. روش‌های رمزنگاری سنتی، باوجود پیچیدگی الگوریتم‌ها، در برابر پیشرفت‌های فناوری آسیب‌پذیر هستند و برای تبادل کلیدهای رمزنگاری به کانال‌های ارتباطی امن نیاز دارند. این مقاله به بررسی راهکارهای امنیت لایه فیزیکی (PLS) می‌پردازد که با بهره‌گیری از ویژگی‌های ذاتی کانال‌های مخابراتی بی‌سیم، امکان تبادل امن داده‌ها را فراهم می‌آورد. سیستم پیشنهادی در این مقاله یک سیستم ارتباطی بی‌سیم چندآنتنه است که کاربران از طریق گره رله و در حضور گره استراق سمع کننده به تبادل امن اطلاعات می‌پردازند. برای مقابله با شنود، راهکار تداخل مشارکتی در دو فاز مجزا ارائه می‌شود که با شکل‌دهی پرتوی تداخل ساختگی و شکل‌دهی پرتوی دریافت اطلاعات، نسبت سیگنال به تداخل و نویز (SINR) را در گره استراق سمع کننده کاهش و در گره‌های مجاز افزایش می‌دهد. طراحی بهینه سیستم با روش آزادسازی نیمه معین (SDR) حل‌شده و طرح شکل‌دهی پرتوی ارسال اجبار به صفر (TZF) نیز برای مقایسه با عملکرد بهینه معرفی‌شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که طرح بهینه، نرخ محرمانگی متوسط را نسبت به طرح TZF و سیستم مرجع به ترتیب 11/98 bps/Hz و 16/33 bps/Hz بهبود داده و احتمال قطع لینک شنود را به 81 درصد می‌رساند. در این میان، طرح TZF با عملکردی قابل‌قبول نسبت به سیستم مرجع، نرخ محرمانگی را به میزان 4/35 bps/Hz بهبود داده و احتمال قطع لینک شنود را به 0/9 درصد افزایش می‌دهد.

**مشخصات مقاله**

**تاریخچه مقاله:**
**نوع مقاله: علمی- پژوهشی**

**دریافت**: 31 تیر 1404
**بازنگری**: 09 شهریور 1404
**پذیرش**: 22 مهر 1404
**ارائه آنلاین**: 01 آبان 1404

**کلیدواژه‌ها:**
امنیت لایه فیزیکی
احتمال قطع لینک شنود
تداخل مشارکتی
شکل‌دهی پرتو

**استناد**: روستائی, امیر ,اصفهانی, رضا. (۱۴۰۴). بهبود امنیت لایه فیزیکی در شبکه ۵ Gمبتنی بر عملکرد مشارکتی گره‌ها .پدافند الکترونیکی و سایبری، ۱۳(۳)، ۱۱۵- ۱۲۸. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1404.13.3.8.7



**ناشر**: دانشگاه جامع امام حسین(ع).

## ۱. مقدمه

با گسترش فناوری‌های نوین ارتباطی و ظهور شبکه‌های نسل پنجم (5G)، تأمین امنیت اطلاعات و محرمانگی داده‌ها در شبکه‌های بی‌سیم به یکی از چالش‌های اصلی تبدیل شده است. ماهیت پخشی محیط بی‌سیم، امکان شنود غیرمجاز ارتباطات را فراهم می‌کند و این مسئله اهمیت ارائه راهکارهایی برای تأمین امنیت در لایه فیزیکی را برجسته می‌سازد [1]. تاکنون استفاده از روش‌های رمزنگاری در لایه‌های بالاتر، راهکار اصلی تأمین امنیت اطلاعات بوده است. با این حال، این روش‌ها با محدودیت‌هایی مواجه هستند، از جمله نیاز به کانال ارتباطی امن برای مبادله کلیدها و وابستگی به پیچیدگی الگوریتم‌های رمزنگاری [2]. در این راستا، امنیت لایه فیزیکی [۱] (PLS) که اولین بار توسط واینر مطرح شد، به‌عنوان یک راهکار نوین برای بهبود امنیت شبکه‌های بی‌سیم شناخته می‌شود [3]. این رویکرد از ویژگی‌های ذاتی کانال‌های مخابرات بی‌سیم مانند نویز، تداخل و محوشدگی برای ارتقای امنیت بهره می‌برد. مزایای عمده PLS شامل استقلال از پیچیدگی محاسباتی و قابلیت مقیاس‌پذیری بالا در شبکه‌های بزرگ و پیچیده است [4]. در سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی در زمینه امنیت لایه فیزیکی برای ارتقای سطح امنیت در شبکه‌های بی‌سیم انجام شده است. به عنوان مثال، در [5]، استفاده از گره‌های چندآنتنه [۲] (MIMO) مورد بررسی قرار گرفته است. این روش علاوه بر افزایش قابل توجه نرخ محرمانگی [۳]، احتمال قطع محرمانگی [۴] (SOP) را نیز کاهش می‌دهد. مزیت این رویکرد، افزایش ظرفیت کانال و نرخ داده کاربران مجاز از طریق چندگانگی فضایی و همچنین کاهش سیگنال‌های شنود شده توسط استراق‌سمع کنندگان با استفاده از تکنیک‌های شکل‌دهی پرتو [۵] است. علاوه بر این، در [6] محققان یک راهکار استفاده از رله‌ی مشارکتی [۶] مبتنی بر پروتکل کدگشایی و ارسال مجدد [۷] (DF) را پیشنهاد کرده‌اند. هدف این روش، بهبود کیفیت کانال ارتباطی بین مبدأ و مقصد است که منجر به افزایش نسبت سیگنال به نویز [۸] (SNR) بین کاربران مجاز و در نتیجه بهبود نرخ محرمانگی و امنیت ارتباطات می‌شود. پژوهشگران در [7] به طراحی شکل‌دهی پرتو برای پروتکل رله تقویت و ارسال مجدد [۹] (AF) در ارتباطات امن دو گره‌ای پرداخته‌اند. آنها استراتژی بهینه تخصیص توان را برای کانال‌های شنود با محوشدگی رایلی [۱۰] در سیستم‌های چندآنتنه پیشنهاد کرده‌اند که موجب بیشینه‌سازی نرخ محرمانگی قابل دستیابی از طریق شکل‌دهی پرتو می‌شود. در [8]، عملکرد محرمانه رله مشارکتی با انتخاب بهینه رله برای موارد مختلف اطلاعات حالت کانال [۱۱] (CSI) مورد بررسی قرار گرفته است. پژوهشگران در [9] یک طرح تداخل مشارکتی در استراق‌سمع کننده با استفاده از نویز مصنوعی را برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه دادند. این طرح از ترکیب امنیت لایه فیزیکی و خوشه‌بندی استفاده می‌کند و با افزودن نویز مصنوعی به سیگنال‌های ارسالی، ظرفیت محرمانگی را افزایش می‌دهد. مزیت اصلی این روش، بهبود قابل توجه امنیت ارتباطات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. در [10]، راهکار استفاده از گره مسدود کننده خارجی برای اعمال تداخل دوستانه و کاهش توانایی گره‌های استراق‌سمع کننده مطرح شده است. این روش با ایجاد تداخل برای گره استراق‌سمع کننده، از رمزگشایی اطلاعات محرمانه توسط آن جلوگیری می‌کند. پژوهشگران در [11] به بررسی تأثیر نارسایی سخت‌افزاری بر امنیت لایه فیزیکی در شبکه‌های اینترنت اشیاء با حضور تعداد دلخواه استراق‌سمع کننده پرداختند. آنها با در نظر گرفتن ظرفیت غیر صفر برای بررسی امنیت لایه فیزیکی، عبارت‌های ریاضی را برای حالت‌های مختلف با مقدار نارسایی متفاوت در فرستنده، گیرنده و استراق‌سمع کننده استخراج کردند. این روش با مزیت عدم محدودیت در تعداد استراق‌سمع کنندگان و ارائه مدل دقیق برای نارسایی‌های سخت‌افزاری همراه است. با این حال به دلیل نیاز به محاسبات پیچیده برای مدل‌سازی اثرات ترکیبی نارسایی‌های سخت‌افزاری، پیاده‌سازی آن با چالش‌هایی همراه است. در [12] امنیت لایه فیزیکی در شبکه‌های بی‌سیم مشارکتی با رله‌های غیر قابل اعتماد چندآنتنه مورد بررسی قرار گرفت. محققان با مدل‌سازی سیستمی شامل منبع و مقصد تک آنتنه و مسدودکننده‌های توزیع‌شده با فرآیند پواسون، از تکنیک پارازیت مشارکتی با کمک مقصد برای مقابله با رله‌های غیر قابل اعتماد استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد آنتن‌های رله و چگالی مسدودکننده‌ها منجر به کاهش نرخ محرمانگی می‌شود. با این حال، محققان با ارائه فرمول‌های جدید برای نرخ محرمانگی ارگودیک و تخصیص بهینه توان، توانستند این اثرات منفی را به‌طور قابل‌توجهی جبران کنند. پیشرفت‌های اخیر در حوزه‌های الکترونیک، فناوری آنتن و پردازش سیگنال، حالت عملیاتی کاملاً دوطرفه [۱۲] (FD) را برای گره‌ها فراهم کرده است؛ به‌طوری‌که گره‌ها قادر به ارسال و دریافت همزمان اطلاعات می‌باشند [13]. در این راستا، پژوهشگران به بررسی امنیت لایه فیزیکی در شبکه‌های بی‌سیم توزیع‌شده با استفاده از گیرنده‌های FD تداخل‌زا پرداخته‌اند [14]. این مطالعه به تحلیل احتمال قطع محرمانگی و تعیین

[1] Physical Layer Security
[2] Multiple-Input Multiple-Output
[3] Secrecy Rate
[4] Secrecy Outage Probability
[5] Beamforming
[6] Cooperative Relay
[7] Decode-and-Forward
[8] Signal-to-Noise Ratio
[9] Amplify-and-Forward
[10] Rayleigh Fading
[11] Channel State Information
[12] Full Duplex

تراکم بهینه شبکه FD برای بیشینه کردن نرخ محرمانگی منجر شده است. در [15]، محققان عملکرد ارتباطات بی‌سیم محرمانه را با استفاده از پروتکل‌های DF و AF بررسی کردند. نتایج نشان داد که پروتکل DF نسبت به AF عملکرد بهتری در احتمال قطع محرمانگی دارد. همچنین، سیستم‌های رله‌گذاری با عملکرد FD حتی در شرایط خودتداخلی[1] (SI) بین آنتن‌های رله نیز عملکرد مناسبی از خود نشان دادند. علاوه بر این، در [16]، عملکرد فناوری‌های کاملاً دوطرفه (FD) و نیمه دوطرفه[2] (HD) در سیستم‌های کنترل پهپاد به‌طور جامع بررسی و مقایسه شده است. در این مطالعه، طرحی امنیتی در لایه فیزیکی مبتنی بر مسدودکننده‌های دوستانه ارائه شده که می‌تواند به بهبود امنیت و کارایی این سیستم‌ها کمک کند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که این طرح، با بهره‌گیری از قابلیت‌های FD و بهینه‌سازی توان تداخل، می‌تواند تأخیر را کاهش، تشخیص تهدیدات را بهبود و ظرفیت شبکه را افزایش دهد. پژوهشگران در [17] یک طرح نوین برای تولید کلید مخفی[3] (SKG) در لایه فیزیکی ارائه کردند که از تزریق فاز تصادفی گسسته و کوانتیزه کننده تک بیتی در حضور رله غیرقابل اعتماد استفاده می‌کند. این طرح با بهره‌گیری از نواحی محافظ در فرآیند کوانتیزاسیون و ارائه روابطی برای نرخ تطبیق کلید، نرخ خطا و نرخ دور ریزی، امنیت ارتباطات را در برابر رله غیرقابل اعتماد و استراق‌سمع کننده خارجی تضمین می‌کند. افزایش محدوده نواحی محافظ اگرچه نرخ خطای کلید را کاهش می‌دهد، اما به کوتاه شدن طول دنباله کلید و کاهش کارایی سیستم منجر می‌شود. در [18] امنیت لایه فیزیکی در ارتباطات بی‌سیم مشارکتی با استفاده از حسگری فشرده بررسی شد. محققان سیستمی با چندین رله متوالی را مدل‌سازی کرده و راهکاری نوین برای ارتقای محرمانگی ارائه دادند که از ماتریس کانال معادل به عنوان ماتریس اندازه‌گیری امن استفاده می‌کرد. این روش به افزایش قابل توجه نرخ محرمانگی منجر شد، اگرچه با افزایش اندک پیچیدگی محاسباتی همراه بود. در [19] با ارائه روشی مبتنی بر بردارهای متعامد و جداسازی الگوی تشعشعی، امکان ارسال همزمان چند سیگنال با مدولاسیون جهتی به همراه نویز مصنوعی تصادفی را فراهم کردند که به بهبود احتمال خطای بیت و افزایش نرخ محرمانگی منجر شد. در [20] مسئله بهینه‌سازی نرخ محرمانگی در یک سیستم مخابراتی با فرستنده تک‌آنتنه، استراق‌سمع کننده تک‌آنتنه و گیرنده دوطرفه چندآنتنه مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، یک روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای برای تخصیص بهینه توان و تغییر حالت آنتن‌های گیرنده پیشنهاد شده تا نرخ محرمانگی سیستم را بیشینه نماید. در [21]، پژوهشگران یک مدل سیستمی برای افزایش امنیت در لایه فیزیکی شبکه‌های بی‌سیم ارائه کرده‌اند. این مدل از ترکیب سه تکنیک رله FD، گره مسدودکننده دوستانه و برداشت انرژی استفاده می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این پروتکل قادر است میانگین نرخ محرمانگی را به میزان 2/5 برابر در مقایسه با پروتکل رله معمولی بهبود بخشد. با وجود این دستاورد قابل توجه، این سیستم با چالش‌های مختلفی روبروست. امنیت سیستم به یک گره مسدودکننده خارجی وابسته است که این موضوع می‌تواند نقطه ضعفی محسوب شود. علاوه بر این، عدم بهره‌گیری از تکنیک شکل‌دهی پرتو برای سیگنال تداخل، کارایی سیستم را محدود می‌کند. نکته دیگر اینکه در طراحی گره رله، راهکار مشخصی برای کاهش خودتداخلی پیش‌بینی نشده است. همچنین استفاده از گره‌های مبدأ و مقصد تک آنتنه با عملکرد یک‌سویه باعث افت نسبت سیگنال به تداخل و نویز[4] (SINR) در کل سیستم می‌شود. برای غلبه بر محدودیت‌های مذکور، در مقاله حاضر یک سیستم بی‌سیم مشارکتی با استفاده از گره‌های چندآنتنه پیشنهاد شده است. این سیستم از سه گره مجاز شامل کاربر A، کاربر B و یک گره رله تشکیل شده که همگی از فناوری چندآنتنه با قابلیت FD بهره می‌برند. برای برقراری ارتباط امن، فرآیند تبادل اطلاعات در دو فاز مجزا صورت می‌گیرد: در فاز اول، هر دو کاربر اطلاعات خود را به گره رله ارسال می‌کنند. همزمان، برای جلوگیری از شنود اطلاعات توسط گره استراق‌سمع کننده، گره رله یک سیگنال تداخل ساختگی به سمت آن ارسال می‌کند که باعث کاهش چشمگیر SINR در گره استراق‌سمع کننده می‌شود. در فاز دوم، گره رله با استفاده از پروتکل DF، سیگنال‌های دریافتی را پردازش کرده و پس از کدگشایی، تصحیح خطا و حذف نویز گاوسی سفید افزودنی[5] (AWGN)، مجدداً کدگذاری می‌کند. سپس اطلاعات هر کاربر را به کاربر دیگر ارسال می‌نماید. در این فاز نیز برای حفظ امنیت، کاربران به طور همزمان سیگنال تداخل ساختگی به سمت گره استراق‌سمع کننده ارسال می‌کنند. در سیستم پیشنهادی، طرح شکل‌دهی پرتوی بهینه و طرح شکل‌دهی پرتو ارسال مبتنی بر معیار اجبار به صفر[6] (TZF) ارائه شده است. این طرح‌ها برای ارسال تداخل ساختگی به سمت گره استراق‌سمع کننده، دریافت اطلاعات از گره‌های مجاز دیگر و حذف اثر خود تداخلی ناشی از عملکرد FD گره‌های مجاز طراحی شده‌اند. طرح بهینه، با وجود پیچیدگی محاسباتی بیشتر نسبت به طرح TZF، دو دستاورد مهم دارد: نخست، قابلیت حذف کامل خودتداخلی ناشی از عملکرد FD در گره‌های مجاز را فراهم می‌کند و دوم، SINR را در گره‌های مجاز بیشینه می‌سازد، در حالی که SINR گره استراق‌سمع کننده را زیر یک آستانه مشخص نگه می‌دارد.

[1] Self-Interference
[2] Half-duplex
[3] Secret Key Generation
[4] Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio
[5] Additive White Gaussian Noise
[6] Transfer Zero Forcing

نوآوری‌های اصلی این پژوهش عبارتند از:

- ایجاد یک سیستم مخابراتی امن و کارآمد از طریق ترکیب همزمان فناوری چندآنتنه، قابلیت FD و پروتکل DF در یک سیستم با عملکرد مشارکتی دو فازه.
- بررسی عملکرد و تحلیل مقایسه‌ای سیستم پیشنهادی با سیستم مرجع [21] از طریق ارزیابی احتمال قطع لینک شنود و نرخ محرمانگی متوسط در دو طرح شکل‌دهی پرتوی بهینه و TZF.
- طراحی سیستمی که به دلیل عملکرد مشارکتی گره‌های مجاز، از صفر شدن نرخ محرمانگی در صورت نزدیک شدن گره استراق‌سمع کننده به گره‌های مجاز جلوگیری می‌کند.

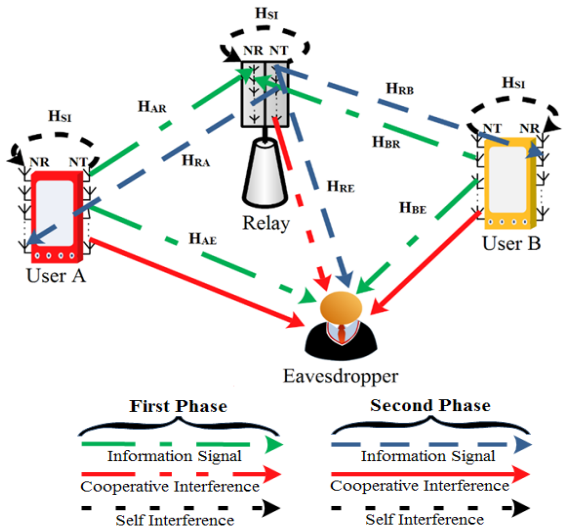
ساختار مقاله به این صورت تنظیم شده است: در بخش ۲، مدل سیستم پیشنهادی همراه با تعاریف و روابط مورد نیاز ارائه می‌گردد. در بخش 3، عملکرد امنیتی سیستم پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در بخش ۴، نتایج شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرند و در نهایت، مقاله با نتیجه‌گیری در بخش ۵ خاتمه می‌یابد.

نشانه‌گذاری: از حروف انگلیسی بزرگ و کوچک با فونت توپر **(Bold)** به ترتیب برای نشان دادن ماتریس و بردار استفاده می‌شود. بالانویس $(.)^{\dagger}$، ترانهاده مزدوج یک بردار یا ماتریس را نشان می‌دهد. عملگر $\|.\|$، برای نشان دادن اندازه بردار یا ماتریس استفاده می‌شود. از نماد $X \sim CN(\mu,\sigma^2)$ برای نشان دادن توزیع گاوسی مختلط متقارن با میانگین $\mu$ و واریانس $\sigma^2$ برای متغیر تصادفی $X$ استفاده می‌شود. $E\{x\}$، $P_r(x)$ و $F_x(.)$ به ترتیب برای نشان دادن، امید ریاضی، احتمال، تابع توزیع تجمعی $(cdf)$ متغیر تصادفی $X$ استفاده می‌شوند.

## ۲. مدل سیستم

مدل سیستم پیشنهادی در این مقاله، همان‌طور که در شکل (1) نشان داده شده، از سه گره مجاز چندآنتنه (شامل کاربر A، کاربر B و یک گره رله) و یک گره استراق‌سمع کننده چندآنتنه تشکیل شده است.

هدف اصلی این سیستم، برقراری ارتباط امن میان کاربران A و B در حضور گره استراق‌سمع کننده است. عملیات تبادل اطلاعات در این سیستم طی دو فاز مجزا صورت می‌گیرد. در فاز اول، کاربران A و B اطلاعات خود را به سمت گره رله ارسال می‌کنند. همزمان، برای جلوگیری از شنود اطلاعات کاربران توسط گره استراق‌سمع کننده، گره رله یک سیگنال تداخل ساختگی به سمت گره استراق‌سمع کننده ارسال می‌کند. این اقدام موجب کاهش چشمگیر SINR در گره استراق‌سمع کننده شده و در نتیجه، شنود اطلاعات را ناممکن می‌سازد. در فاز دوم، گره رله با استفاده از پروتکل DF، سیگنال‌های دریافتی از کاربران A و B را پردازش می‌کند. این پروتکل ابتدا سیگنال‌ها را کدگشایی کرده، خطاهای احتمالی را تصحیح می‌کند و نویز AWGN را حذف می‌نماید. سپس، سیگنال‌ها مجدداً کدگذاری شده و گره رله، اطلاعات کاربر A را به سمت کاربر B و بالعکس ارسال می‌کند. در این فاز نیز، برای جلوگیری از شنود اطلاعات ارسالی از گره رله توسط گره استراق‌سمع کننده، کاربران A و B همزمان با دریافت اطلاعات، سیگنال‌های تداخل ساختگی را به سمت گره استراق‌سمع کننده ارسال می‌کنند. این عمل مجدداً باعث کاهش قابل توجه SINR در گره استراق‌سمع کننده شده و از شنود اطلاعات جلوگیری می‌کند.




شکل (1). امنیت لایه فیزیکی در مدل سیستم پیشنهادی

این سیستم پیشنهادی با بهره‌گیری از تکنیک‌های متنوعی مانند رله‌کردن با پروتکل DF، تداخل مشارکتی، شکل‌دهی پرتوی ارسال تداخل ساختگی و شکل‌دهی پرتوی دریافت اطلاعات، امنیت لایه فیزیکی را در سیستم ارتباطی بی‌سیم چندآنتنه تأمین می‌کند. این روش با ایجاد تداخل هدفمند و کنترل شده، ارتباط امن بین کاربران مجاز را تضمین می‌کند، در حالی که شنود اطلاعات توسط گره استراق‌سمع کننده را به طور مؤثری مختل می‌سازد.

برای فعال‌سازی عملکرد FD در این سیستم، هر سه گره مجاز باید دارای قابلیت ارسال و دریافت همزمان سیگنال باشند. هر گره مجاز با استفاده از $N_T$ آنتن، در یک فاز به ارسال سیگنال اطلاعات و در فاز دیگر به ارسال سیگنال تداخل ساختگی می‌پردازد. همچنین $N_R$ آنتن برای دریافت اطلاعات در هر دو فاز به کار می‌رود. از آنجا که گره‌های مجاز همزمان عملیات دریافت اطلاعات و ارسال تداخل ساختگی را انجام می‌دهند، حلقه‌ی خودتداخلی با ماتریس بهره کانال $N_{SI}$ و ابعاد $N_T \times N_R$ برای هر سه گره مجاز ایجاد می‌شود. گره استراق‌سمع کننده نیز برای شنود اطلاعات از $N_E$ آنتن دریافت در هر دو فاز استفاده می‌کند. در این سیستم ارتباطی، ماتریس $\mathbf{H}_{AR}$ نشان‌دهنده بهره کانال از کاربر A به گره رله و ماتریس $\mathbf{H}_{RA}$ بیانگر بهره کانال از گره رله به کاربر A است. به طور مشابه، ماتریس $\mathbf{H}_{BR}$ بهره کانال از کاربر

B به گره رله و ماتریس $\mathbf{H}_{\mathrm{RB}}$ بهره کانال از گره رله به کاربر B را نمایش می‌دهد. همچنین ماتریس‌های $\mathbf{H}_{\mathrm{AE}}$، $\mathbf{H}_{\mathrm{BE}}$ و $\mathbf{H}_{\mathrm{RE}}$ به ترتیب بهره کانال بین کاربر A، کاربر B و گره رله با گره استراق‌سمع کننده را نشان می‌دهند. ماتریس بهره کانال بین گره‌های مجاز دارای ابعاد $N_T \times N_R$ می‌باشد، در حالی که ماتریس بهره کانال بین گره‌های مجاز و گره استراق‌سمع کننده دارای ابعاد $N_T \times N_{ER}$ است. $N_{ER}$ نشان‌دهنده تعداد آنتن‌های گیرنده در گره استراق‌سمع کننده می‌باشد. در این سیستم، فرض بر این است که CSI کامل گره‌های مجاز و گره استراق‌سمع کننده در دسترس فرستنده است [22] و [23]. با در اختیار داشتن این اطلاعات، می‌توان از آنها برای بهبود طراحی شکل‌دهی پرتو در گره‌های مجاز استفاده نمود.

## 2-1. مدل سیگنال‌ها

با توجه به مدل سیستم پیشنهادی، سیگنال اطلاعات ارسالی از کاربران A و B به سمت گره رله، به ترتیب به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$x_{AR}[n] = \sqrt{P_A}\, x_A[n] \quad (1)$$

$$x_{BR}[n] = \sqrt{P_B}\, x_B[n] \quad (2)$$

که در روابط فوق، $x_A$ و $x_B$ به ترتیب نشان‌دهنده سیگنال اطلاعات ارسالی از کاربر A و کاربر B با توزیع گوسی نرمال می‌باشند. همچنین، $P_A$ و $P_B$ به ترتیب توان سیگنال اطلاعات ارسالی از کاربر A و کاربر B را نشان می‌دهند.

سیگنال تداخل ساختگی ارسالی از گره رله به سمت گره استراق‌سمع کننده به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$x_{RE}[n] = \sqrt{P_{RJ}}\, \mathbf{W}_{\mathrm{t}}\, x_J[n] \quad (3)$$

که در آن، $P_{RJ}$ توان سیگنال تداخل ارسالی از گره رله به سمت گره استراق‌سمع کننده است. ماتریس $\mathbf{W}_{\mathrm{t}}$ با ابعاد $N_T \times N_{ER}$، نشان دهنده ماتریس وزن‌دهی سیگنال تداخل ساختگی از گره‌های مجاز به سمت گره استراق‌سمع کننده است. هدف از طراحی ماتریس $\mathbf{W}_{\mathrm{t}}$ ایجاد بیشترین تداخل ممکن در گره استراق‌سمع کننده و در نتیجه تضعیف کانال شنود است. علاوه بر این، $x_J$ سیگنال تداخل ساختگی ارسالی از گره‌های مجاز به سمت گره استراق‌سمع کننده است.

بر اساس عملکرد مدل سیستم پیشنهادی، سیگنال دریافتی در گره رله به صورت زیر است:

$$y_R[n] = \sqrt{\frac{P_A}{d_{AR}^{\mu}}}\, \mathbf{H}_{\mathrm{AR}}\, \mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{\dagger}\, x_A[n] + \sqrt{\frac{P_B}{d_{BR}^{\mu}}}\, \mathbf{H}_{\mathrm{BR}}\, \mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{\dagger}\, x_B[n] + \sqrt{P_{RJ}}\, \mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{\dagger}\, \mathbf{H}_{\mathrm{SI}}\, \mathbf{W}_{\mathrm{t}}\, \boldsymbol{x}_J[n] + \mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{\dagger}\, \boldsymbol{n}_R[n] \quad (4)$$

در این مقاله، فرض می‌شود کانال‌های ارتباطی تحت تأثیر دو نوع محوشدگی قرار می‌گیرند: محوشدگی مقیاس بزرگ (افت مسیر) و محوشدگی مقیاس کوچک (بهره کانال). برای مدل‌سازی محوشدگی مقیاس بزرگ، از مدل افت مسیر $d^{-\mu}$ استفاده شده است، که در آن $\mu > 2$ ضریب افت مسیر است. برای مدل‌سازی محوشدگی مقیاس کوچک، از ماتریس‌های بهره کانال‌های ارتباطی استفاده می‌شود. همچنین، در این مقاله فرض می‌شود که کانال‌های ارتباطی بین گره‌ها تحت تأثیر محوشدگی رایلی قرار می‌گیرند. متغیرهای تصادفی مرتبط با این محوشدگی به طور مستقل تغییر می‌کنند و دارای توزیع گاوسی با واریانس $\sigma^2$ و میانگین صفر هستند. علاوه بر این، $d_{AR}$ و $d_{BR}$ به ترتیب نشان‌دهنده فاصله بین کاربران A و B نسبت به گره رله می‌باشند. $\boldsymbol{n}_R$ نشان‌دهنده سیگنال نویز AWGN دریافتی در گره رله با میانگین صفر و واریانس $\sigma_R^2$ است. ماتریس $\mathbf{W}_{\mathrm{r}}$ با ابعاد $N_T \times N_R$ ماتریس وزن‌دهی دریافت است. این ماتریس برای وزن‌دهی و ترکیب سیگنال‌های دریافتی از آنتن‌های متعدد در گره‌های مجاز FD استفاده می‌شود. هدف از این وزن‌دهی، بهینه‌سازی SINR در سیستم چندآنتنه و بهبود کیفیت سیگنال خروجی است.

بنابراین، با توجه به رابطه (4)، SINR در گره رله به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\gamma_R = \left( \frac{\frac{P_A}{d_{AR}^{\mu}} \left\| \mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{\dagger} \mathbf{H}_{\mathrm{AR}} \right\|^2 + \frac{P_B}{d_{BR}^{\mu}} \left\| \mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{\dagger} \mathbf{H}_{\mathrm{BR}} \right\|^2}{P_{RJ} \left\| \mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{\dagger} \mathbf{H}_{\mathrm{SI}} \mathbf{W}_{\mathrm{t}} \right\|^2 + \sigma_R^2} \right) \quad (5)$$

سیگنال ارسالی از گره رله به سمت کاربران A و B، پس از اعمال پروتکل DF در گره رله، به ترتیب به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$x_{RA}[n] = \sqrt{P_R}\, x_B[n] \quad (6)$$

$$x_{RB}[n] = \sqrt{P_R}\, x_A[n] \quad (7)$$

که در روابط بالا، $P_R$ نشان دهنده توان سیگنال اطلاعات ارسالی از گره رله می‌باشد.

سیگنال تداخل ارسالی از کاربران A و B به سمت گره استراق‌سمع کننده، به ترتیب به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$x_{AE}[n] = \sqrt{P_{AJ}}\, \mathbf{W}_{\mathrm{t}}\, x_J[n] \quad (8)$$

$$x_{BE}[n] = \sqrt{P_{BJ}}\, \mathbf{W}_{\mathrm{t}}\, x_J[n] \quad (9)$$

که در روابط فوق، $P_{AJ}$ و $P_{BJ}$ نشان‌دهنده توان سیگنال تداخل ارسالی از کاربر A و کاربر B به سمت گره استراق‌سمع کننده می‌باشند.

با توجه به ساختار سیستم پیشنهادی، می‌توان سیگنال دریافتی در کاربر A و کاربر B را به ترتیب به صورت زیر نمایش داد:

$$y_A[n] = \sqrt{\frac{P_R}{d_{RA}^{\mu}}}\, \mathbf{H}_{\mathrm{RA}} \mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{\dagger}\, x_B[n] + \sqrt{P_{AJ}}\, \mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{\dagger}\, \mathbf{H}_{\mathrm{SI}} \mathbf{W}_{\mathrm{t}}\, \boldsymbol{x}_J[n] + \mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{\dagger}\, \boldsymbol{n}_A[n] \quad (10)$$

$$y_B[n] = \sqrt{\frac{P_R}{d_{RB}^{\mu}}}\, \mathbf{H}_{\mathrm{RB}} \mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{\dagger}\, x_A[n] + \sqrt{P_{BJ}}\, \mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{\dagger}\, \mathbf{H}_{\mathrm{SI}} \mathbf{W}_{\mathrm{t}}\, \boldsymbol{x}_J[n] + \mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{\dagger}\, \boldsymbol{n}_B[n] \quad (11)$$

$\boldsymbol{n}_A$ سیگنال نویز AWGN دریافتی در کاربر A با میانگین صفر و واریانس $\sigma_A^2$ است. همچنین $\boldsymbol{n}_B$ سیگنال نویز AWGN دریافتی در کاربر B با میانگین صفر و واریانس $\sigma_B^2$ می‌باشد.

با توجه به روابط (10) و (11)، SINR برای کاربران A و B به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\gamma_A = \left( \frac{\frac{P_R}{d_{RA}^{\mu}} \left\| \mathbf{W}_\mathbf{r}^\dagger \mathbf{H}_{\mathrm{RA}} \right\|^2}{P_{AJ} \left\| \mathbf{W}_\mathbf{r}^\dagger \mathbf{H}_{\mathrm{SI}} \mathbf{W}_\mathrm{t} \right\|^2 + \sigma_A^2} \right) \tag{12}$$

$$\gamma_B = \left( \frac{\frac{P_R}{d_{RB}^{\mu}} \left\| \mathbf{W}_\mathbf{r}^\dagger \mathbf{H}_{\mathrm{RB}} \right\|^2}{P_{BJ} \left\| \mathbf{W}_\mathbf{r}^\dagger \mathbf{H}_{\mathrm{SI}} \mathbf{W}_\mathrm{t} \right\|^2 + \sigma_B^2} \right) \tag{13}$$

در سیستم پیشنهادی، عملیات تبادل اطلاعات و ارسال تداخل ساختگی به سمت گره استراق‌سمع کننده در دو فاز مجزا صورت می‌گیرد. به دلیل این ساختار دو فازی، SINR نیز در دو فاز جداگانه محاسبه می‌شود.

بنابراین، SINR در فاز اول، مطابق با رابطه (4) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma_{AR,BR} = \frac{\frac{P_A}{d_{AR}^{\mu}} \left\| \mathbf{W}_\mathbf{r}^\dagger \mathbf{H}_{\mathrm{AR}} \right\|^2 + \frac{P_B}{d_{BR}^{\mu}} \left\| \mathbf{W}_\mathbf{r}^\dagger \mathbf{H}_{\mathrm{BR}} \right\|^2}{P_{RJ} \left\| \mathbf{W}_\mathrm{r}^\dagger \mathbf{H}_{\mathrm{SI}} \mathbf{W}_\mathrm{t} \right\|^2 + \sigma_R^2} \tag{14}$$

همچنین، SINR در فاز دوم، مطابق با رابطه (10) و (11) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma_{RA,RB} = min \left( \frac{\frac{P_R}{d_{RA}^{\mu}} \left\| \mathbf{W}_\mathbf{r}^\dagger \mathbf{H}_{\mathrm{RA}} \right\|^2}{P_{AJ} \left\| \mathbf{W}_\mathbf{r}^\dagger \mathbf{H}_{\mathrm{SI}} \mathbf{W}_\mathrm{t} \right\|^2 + \sigma_A^2}, \frac{\frac{P_R}{d_{RB}^{\mu}} \left\| \mathbf{W}_\mathbf{r}^\dagger \mathbf{H}_{\mathrm{RB}} \right\|^2}{P_{BJ} \left\| \mathbf{W}_\mathbf{r}^\dagger \mathbf{H}_{\mathrm{SI}} \mathbf{W}_\mathrm{t} \right\|^2 + \sigma_B^2} \right) \tag{15}$$

با توجه به استفاده از پروتکل DF در گره رله سیستم پیشنهادی، می‌توان SINR کل سیستم را به صورت زیر بیان کرد:

$$\gamma_{Total} = min \left( \underbrace{\gamma_{AR,BR}}_{First\ Phase}, \underbrace{\gamma_{RA,RB}}_{Second\ Phase} \right) \tag{16}$$

در رابطه (16)، عملگر min برای تعیین SINR کل سیستم استفاده می‌شود، که ضعیف‌ترین لینک را معیار قرار داده و امنیت لایه فیزیکی را حتی در پایین‌ترین سطح SINR تضمین می‌کند.

با توجه به ساختار سیستم پیشنهادی، سیگنال‌های دریافتی در گره استراق‌سمع کننده، در فاز اول به شرح زیر است:

$$y_E[n] = \sqrt{\frac{P_A}{d_{AE}^{\mu}}} \mathbf{H}_{\mathrm{AE}} x_A[n] + \sqrt{\frac{P_B}{d_{BE}^{\mu}}} \mathbf{H}_{\mathrm{BE}} x_B[n] + \sqrt{\frac{P_{RJ}}{d_{RE}^{\tau}}} \mathbf{H}_{\mathrm{RE}} \mathbf{W}_\mathrm{t} x_J[n] + \boldsymbol{n}_E[n] \tag{17}$$

$\boldsymbol{n}_E$ سیگنال نویز AWGN دریافتی در گره استراق‌سمع کننده با میانگین صفر و واریانس $\sigma_E^2$ است. $d_{BE}$، $d_{AE}$ و $d_{RE}$ به ترتیب نشان‌دهنده فاصله بین کاربر A، کاربر B و گره رله نسبت به گره استراق‌سمع کننده است.

بنابراین، با توجه به رابطه (17)، SINR دریافتی در گره استراق‌سمع کننده در فاز اول از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\gamma_{E_1} = \frac{\frac{P_A}{d_{AE}^{\mu}} \left\| \mathbf{H}_{\mathrm{AE}} \right\|^2 + \frac{P_B}{d_{BE}^{\mu}} \left\| \mathbf{H}_{\mathrm{BE}} \right\|^2}{\frac{P_{RJ}}{d_{RE}^{\mu}} \left\| \mathbf{H}_{\mathrm{RE}} \mathbf{W}_\mathrm{t} \right\|^2 + \sigma_E^2} \tag{18}$$

همچنین سیگنال‌های دریافتی در گره استراق‌سمع کننده، در فاز دوم به شرح زیر است:

$$y_E[n] = \sqrt{\frac{P_R}{d_{RE}^{\mu}}} \mathbf{H}_{\mathrm{RE}} x_R[n] + \sqrt{\frac{P_{AJ}}{d_{AE}^{\mu}}} \mathbf{H}_{\mathrm{AE}} \mathbf{W}_\mathrm{t} x_J[n] + \sqrt{\frac{P_{BJ}}{d_{BE}^{\mu}}} \mathbf{H}_{\mathrm{BE}} \mathbf{W}_\mathrm{t} x_J[n] + \boldsymbol{n}_E[n] \tag{19}$$

$x_R$ نشان‌دهنده سیگنال اطلاعات ارسالی از گره رله با توزیع گوسی نرمال است.

بنابراین، با توجه به رابطه (19)، SINR دریافتی در گره استراق‌سمع کننده در فاز دوم از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\gamma_{E_2} = \frac{\frac{P_R}{d_{RE}^{\mu}} \left\| \mathbf{H}_{\mathrm{RE}} \right\|^2}{\frac{P_{AJ}}{d_{AE}^{\mu}} \left\| \mathbf{H}_{\mathrm{AE}} \mathbf{W}_\mathrm{t} \right\|^2 + \frac{P_{BJ}}{d_{BE}^{\mu}} \left\| \mathbf{H}_{\mathrm{BE}} \mathbf{W}_\mathrm{t} \right\|^2 + \sigma_E^2} \tag{20}$$

با در نظر گرفتن روابط SINR در فازهای اول و دوم در گره استراق‌سمع کننده، می‌توان SINR کل را برای این گره به صورت زیر نمایش داد:

$$\gamma_{E\,Total} = min \left( \underbrace{\gamma_{E_1}}_{First\ Phase}, \underbrace{\gamma_{E_2}}_{Second\ Phase} \right) \tag{21}$$

در سیستم پیشنهادی جهت ارتقای امنیت اطلاعات، گره‌های مجاز در دو فاز مجزا قادر به ارسال سیگنال تداخل ساختگی به سمت گره استراق‌سمع کننده هستند. از آنجایی که گره‌های مجاز از عملکرد FD استفاده می‌کنند، سیگنال خودتداخلی در هر سه گره مجاز تولید می‌گردد. این سیگنال خودتداخلی منجر به کاهش SINR در گره‌های مجاز شده و در نتیجه امنیت لایه فیزیکی سیستم را کاهش می‌دهد. به‌منظور حذف اثر خودتداخلی، افزایش تأثیرگذاری سیگنال تداخل بر روی گره استراق‌سمع کننده و دریافت بهینه سیگنال اطلاعات توسط گره‌های مجاز، یک طرح شکل‌دهی پرتوی بهینه پیشنهاد می‌گردد. همچنین، برای مقایسه با این طرح بهینه، عملکرد طرح شکل‌دهی پرتوی TZF را نیز در سیستم پیشنهادی بررسی خواهیم کرد.

## 2-2. طراحی شکل‌دهی پرتوی بهینه

همان‌طور که در روابط SINR مشاهده می‌شود، مقادیر SINR دریافتی در گره‌های مجاز و گره استراق‌سمع کننده به طراحی شکل‌دهی پرتو در گره‌های مجاز وابسته است. بنابراین، در این بخش به طراحی شکل‌دهی پرتو بهینه در گره‌های مجاز خواهیم پرداخت.

### 2-2-1. طراحی شکل‌دهی پرتوی بهینه در فاز اول

در طراحی شکل‌دهی پرتوی بهینه، هدف ما حذف اثر خودتداخلی در گره‌های مجاز، به حداکثر رساندن SINR دریافتی در این گره‌ها و کاهش SINR در گره استراق‌سمع کننده به کمتر از یک آستانه مشخص است. مسئله بهینه‌سازی در فاز اول را، که مربوط به تبادل اطلاعات از کاربران A و B به گره رله است، می‌توان به صورت یک فرمول ریاضی به شرح زیر بیان کرد [24]:

$$\begin{aligned} &\underset{\mathbf{W_t},\mathbf{W_r}}{max} \quad \gamma_{AR,BR}\left(\mathbf{W_t},\mathbf{W_r}\right) \\ &s.t. \quad \gamma_E\left(\mathbf{W_t}\right) \le \gamma_{th} \\ &\|\mathbf{W_t}\| = \|\mathbf{W_r}\| = 1 \end{aligned} \tag{22}$$

که در آن $\gamma_{th}$ حد آستانه از پیش تعیین‌شده‌ای است که SINR در استراق‌سمع کننده باید کمتر یا مساوی آن باشد.

با استفاده از روابط (14) و (18)، می‌توان مسئله بهینه‌سازی فاز اول در معادله (22) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} &\underset{\mathbf{W_t},\mathbf{W_r}}{max} \quad \left(\frac{\frac{P_A}{d_{AR}^{\mu}}\left\|\mathbf{W_r^{\dagger}H_{AR}}\right\|^2+\frac{P_B}{d_{BR}^{\mu}}\left\|\mathbf{W_r^{\dagger}H_{BR}}\right\|^2}{P_{RJ}\left\|\mathbf{W_r^{\dagger}H_{SI}W_t}\right\|^2+\sigma_R^2}\right) \\ &s.t. \quad \frac{\frac{P_A}{d_{AE}^{\mu}}\|\mathbf{H_{AE}}\|^2+\frac{P_B}{d_{BE}^{\mu}}\|\mathbf{H_{BE}}\|^2}{\frac{P_{RJ}}{d_{RE}^{\mu}}\|\mathbf{H_{RE}W_t}\|^2+\sigma_E^2} \le \gamma_{th} \\ &\|\mathbf{W_t}\| = \|\mathbf{W_r}\| = 1 \end{aligned} \tag{23}$$

همان‌طور که در بخش اول رابطه (23) مشاهده می‌شود، جمله درون پرانتز به ماتریس $\mathbf{W_r}$ وابسته است. بنابراین، برای ماتریس ثابت $\mathbf{W_t}$، ماتریس بهینه $\mathbf{W_r}$ با بیشینه کردن نسبت $\frac{\left\|\mathbf{W_r^{\dagger}H_{AR}}\right\|^2+\left\|\mathbf{W_r^{\dagger}H_{BR}}\right\|^2}{P_{RJ}\left\|\mathbf{W_r^{\dagger}H_{SI}W_t}\right\|^2+\sigma_R^2}$ در گره رله، به دست می‌آید. با حل این مسئله بهینه‌سازی و یافتن ماتریس بهینه $\mathbf{W_r}$، می‌توان SINR دریافتی در گره رله را بیشینه کرد. بنابراین، مسئله‌ی بهینه‌سازی با هدف بیشینه کردن SINR دریافتی در گره رله به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\underset{\|\mathbf{W_r}\|=1}{max} \quad \frac{\mathbf{W_r^{\dagger}H_{AR}H_{AR}^{\dagger}W_r}+\mathbf{W_r^{\dagger}H_{BR}H_{BR}^{\dagger}W_r}}{\mathbf{W_r^{\dagger}RW_r}} \tag{24}$$

در رابطه‌ی فوق $\mathbf{R}=P_{RJ}\,\mathbf{H_{SI}}\,\mathbf{W_t}\,\mathbf{W_t^{\dagger}}\,\mathbf{H}_{\mathbf{SI}}^{\dagger}+\sigma_R^2\mathbf{I}$ است. بنابراین، ماتریس بهینه $\mathbf{W_r}$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\mathbf{W_r}=\frac{\mathbf{R}^{-1}\left(\mathbf{H_{AR}}+\mathbf{H_{BR}}\right)}{\|\mathbf{R}^{-1}\left(\mathbf{H_{AR}}+\mathbf{H_{BR}}\right)\|} \tag{25}$$

درنتیجه با قرار دادن ماتریس بهینه $\mathbf{W_r}$ در رابطه (14) و استفاده از فرمول شرمن-موریسون [25]، رابطه (14) را می‌تواند به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} &\gamma_{AR,BR}= \\ &\frac{P_A}{d_{AR}^{\tau}}\mathbf{H_{AR}^{\dagger}}\left(P_{RJ}\,\mathbf{W_t}\,\mathbf{H_{SI}}\,\mathbf{W_t^{\dagger}H_{SI}^{\dagger}}+\mathbf{C}\right)^{-1}\mathbf{H_{AR}} \\ &+\frac{P_B}{d_{BR}^{\tau}}\mathbf{H_{BR}^{\dagger}}\left(P_{RJ}\,\mathbf{W_t}\,\mathbf{H_{SI}}\,\mathbf{W_t^{\dagger}H_{SI}^{\dagger}}+\mathbf{C}\right)^{-1}\mathbf{H_{BR}} \\ &=\frac{P_A}{d_{AR}^{\tau}}\left(\mathbf{H_{AR}^{\dagger}C^{-1}H_{AR}}-\frac{P_{RJ}\left\|\mathbf{H_{AR}^{\dagger}C^{-1}\,H_{SI}\,W_t}\right\|^2}{\left(1+P_{RJ}\mathbf{W_t^{\dagger}\,H_{SI}^{\dagger}\,C^{-1}H_{SI}W_t}\right)}\right)+ \\ &\frac{P_B}{d_{BR}^{\tau}}\left(\mathbf{H_{BR}^{\dagger}C^{-1}H_{BR}}-\frac{P_{RJ}\left\|\mathbf{H_{BR}^{\dagger}\,C^{-1}\,H_{SI}\,W_t}\right\|^2}{\left(1+P_{RJ}\mathbf{W_t^{\dagger}\,H_{SI}^{\dagger}\,C^{-1}H_{SI}W_t}\right)}\right) \\ &=\frac{P_A}{d_{AR}^{\tau}}\left(\mathbf{H_{AR}^{\dagger}C^{-1}H_{AR}}-\frac{P_{RJ}\left\|\mathbf{H_{AR}^{\dagger}\,C^{-1}\,H_{SI}\,W_t}\right\|^2}{\mathbf{W_t^{\dagger}}\left(\mathbf{I}+P_{RJ}\,\mathbf{H_{SI}^{\dagger}\,C^{-1}H_{SI}}\right)\mathbf{W_t}}\right)+ \\ &\frac{P_B}{d_{BR}^{\tau}}\left(\mathbf{H_{BR}^{\dagger}C^{-1}H_{BR}}-\frac{P_{RJ}\left\|\mathbf{H_{BR}^{\dagger}\,C^{-1}\,H_{SI}\,W_t}\right\|^2}{\mathbf{W_t^{\dagger}}\left(\mathbf{I}+P_{RJ}\,\mathbf{H_{SI}^{\dagger}\,C^{-1}H_{SI}}\right)\mathbf{W_t}}\right) \end{aligned} \tag{26}$$

که در آن $\mathbf{C}=\sigma_R^2\mathbf{I}$ است. مسئله بهینه‌سازی رابطه (22) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\begin{aligned} &\underset{\|\mathbf{W_t}\|=1}{max}\left(\frac{P_A}{\sigma_R^2 d_{AR}^{\tau}}\|\mathbf{H_{AR}}\|^2-\frac{\frac{P_A}{d_{AR}^{\tau}}P_{RJ}\left\|\mathbf{H_{AR}^{\dagger}\,C^{-1}\,H_{SI}\,W_t}\right\|^2}{\mathbf{W_t^{\dagger}}\left(\mathbf{I}+P_{RJ}\,\mathbf{H_{SI}^{\dagger}\,C^{-1}H_{SI}}\right)\mathbf{W_t}}+\right. \\ &\left.\frac{P_B}{\sigma_R^2 d_{BR}^{\tau}}\|\mathbf{H_{BR}}\|^2-\frac{\frac{P_B}{d_{BR}^{\tau}}P_{RJ}\left\|\mathbf{H_{BR}^{\dagger}\,C^{-1}\,H_{SI}\,W_t}\right\|^2}{\mathbf{W_t^{\dagger}}\left(\mathbf{I}+P_{RJ}\,\mathbf{H_{SI}^{\dagger}\,C^{-1}H_{SI}}\right)\mathbf{W_t}}\right) \\ &\text{s.t.} \quad \|\mathbf{H_{RE}W_t}\|^2 \ge q=\mathbf{H_{RE}}\,\mathbf{W_t}\,\mathbf{W_t^{\dagger}H_{RE}^{\dagger}} \ge q \\ &\|\mathbf{W_t}\| = \|\mathbf{W_r}\| = 1 \end{aligned} \tag{27}$$

که در آن $q$ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$q=\frac{P_A\|\mathbf{H_{AE}}\|^2\,d_{RE}^{\mu}\,d_{BE}^{\mu}+P_B\|\mathbf{H_{BE}}\|^2\,d_{RE}^{\mu}\,d_{AE}^{\mu}}{P_{RJ}\,\gamma_{th}\,d_{AE}^{\mu}\,d_{BE}^{\mu}}-\frac{\sigma_E^2\,d_{RE}^{\mu}}{P_{RJ}} \tag{28}$$

برای خطی سازی رابطه (27) که به دلیل حاصلضرب $\mathbf{W_t}$ و $\mathbf{W_t^{\dagger}}$ در صورت و مخرج کسر غیرخطی شده است، می‌توان از تغییر متغیر به صورت زیر استفاده کرد:

اگر فرض کنیم:

$$\begin{aligned} &\frac{P_{RJ}\left\|\mathbf{H_{AR}^{\dagger}C^{-1}H_{SI}W_t}\right\|^2+P_{RJ}\left\|\mathbf{H_{BR}^{\dagger}C^{-1}H_{SI}W_t}\right\|^2}{\mathbf{W_t^{\dagger}}\left(\mathbf{I}+P_{RJ}\,\mathbf{H_{SI}^{\dagger}\,C^{-1}H_{SI}}\right)\mathbf{W_t}}= \\ &P_{RJ}\,\mathbf{W_t^{\dagger}\,H_{SI}^{\dagger}\,C^{-1}\,H_{AR}\,H_{AR}^{\dagger}C^{-1}\,H_{SI}\,W_t}+ \\ &P_{RJ}\,\mathbf{W_t^{\dagger}\,H_{SI}^{\dagger}\,C^{-1}\,H_{BR}\,H_{BR}^{\dagger}C^{-1}\,H_{SI}\,W_t} \end{aligned} \tag{29}$$

و تغییر متغیر زیر را تعریف کنیم:

$$\begin{aligned} &\mathbf{W_t^{\dagger}}\left(\mathbf{I}+P_{RJ}\mathbf{H_{SI}^{\dagger}C^{-1}H_{SI}}\right)\mathbf{W_t} \\ &=\left(\mathbf{I}+P_{RJ}\mathbf{H_{SI}^{\dagger}C^{-1}H_{SI}}\right)\mathbf{W_t}^2 \\ &=\mathbf{F}\,\mathbf{W_t}^2 \rightarrow \bar{\mathbf{W}}_{\mathbf{t}}=\mathbf{F}^{\frac{1}{2}}\,\mathbf{W_t} \end{aligned} \tag{30}$$

آنگاه معادله (27) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned} &\underset{\|\mathbf{W_t}\|=1}{min}\left(\mathbf{F}^{-\frac{1}{2}}\,\bar{\mathbf{W}}_{\mathbf{t}}^{\dagger}\mathbf{H_{SI}^{\dagger}C^{-1}H_{AR}H_{AR}^{\dagger}C^{-1}H_{SI}F}^{-\frac{1}{2}}\,\bar{\mathbf{W}}_{\mathbf{t}}\right. \\ &\left.+\,\mathbf{F}^{-\frac{1}{2}}\,\bar{\mathbf{W}}_{\mathbf{t}}^{\dagger}\mathbf{H_{SI}^{\dagger}C^{-1}H_{BR}H_{BR}^{\dagger}C^{-1}H_{SI}F}^{-\frac{1}{2}}\,\bar{\mathbf{W}}_{\mathbf{t}}\right) \\ &s.t. \quad \left(\mathbf{H_{RE}}\,\mathbf{F}^{-\frac{1}{2}}\,\bar{\mathbf{W}}_{\mathbf{t}}\,\mathbf{F}^{-\frac{1}{2}}\,\bar{\mathbf{W}}_{\mathbf{t}}^{\dagger}\mathbf{H_{RE}^{\dagger}}\right)\ge q \end{aligned} \tag{31}$$

مسئله بهینه‌سازی به دلیل غیرخطی بودن تابع هدف و محدودیت نسبت به ضرب متغیرهای طراحی ( $\bar{\mathbf{W}}_{\mathbf{t}}$ و $\bar{\mathbf{W}}_{\mathbf{t}}^{\dagger}$)، فاقد جواب تحلیلی بسته یا فرم محدب است. برای رفع این مشکل، متغیر جدیدی به صورت $\bar{\mathbf{Z}}_{\mathbf{t}}=\bar{\mathbf{W}}_{\mathbf{t}}\,\bar{\mathbf{W}}_{\mathbf{t}}^{\dagger}$ تعریف می‌شود. با استفاده از این متغیر جدید، مسئله را می‌توان به صورت یک مسئله آزادسازی نیمه‌معین[1] (SDR) به شکل زیر بازنویسی کرد:

[1] Semi Definite Relaxation

$$\min_{\|\bar{\mathbf{Z}}_t\|=1} \ \mathrm{tr}\left(\bar{\mathbf{Z}}_t\,\mathbf{F}^{-\frac{1}{2}}\,\mathbf{H}_{SI}^{\dagger}\mathbf{C}^{-1}\,\mathbf{H}_{AR}\,\mathbf{H}_{AR}^{\dagger}\,\mathbf{C}^{-1}\,\mathbf{H}_{SI}\,\mathbf{F}^{-\frac{1}{2}} + \bar{\mathbf{Z}}_t\,\mathbf{F}^{-\frac{1}{2}}\,\mathbf{H}_{SI}^{\dagger}\mathbf{C}^{-1}\,\mathbf{H}_{BR}\,\mathbf{H}_{BR}^{\dagger}\,\mathbf{C}^{-1}\,\mathbf{H}_{SI}\,\mathbf{F}^{-\frac{1}{2}}\right)$$
$$s.t. \quad \mathrm{tr}\left(\mathbf{H}_{RE}\,\mathbf{F}^{-\frac{1}{2}}\,\bar{\mathbf{Z}}_t\,\mathbf{F}^{-\frac{1}{2}}\,\mathbf{H}_{RE}^{\dagger}\right) \geq q$$
$$\mathrm{tr}(\bar{\mathbf{Z}}_t) = 1$$
$$\bar{\mathbf{Z}}_t \geq 0 \qquad (32)$$

مسئله SDR رابطه (32)، مسئله‌ای استاندارد با دو قید نامساوی است. این مسئله توسط نرم‌افزار بهینه‌سازی محدب CVX حل می‌شود [26]. در جواب نهایی، ماتریس $\bar{\mathbf{Z}}_t$ یک مقدار ویژه غیر صفر دارد که متناظر با ماتریس $\mathbf{W}_t$ در مسئله بهینه‌سازی است.

### 2-2-2. طراحی شکل‌دهی پرتوی بهینه در فاز دوم

مسئله بهینه‌سازی در فاز دوم، که مربوط به تبادل اطلاعات از گره رله به کاربران A و B است، را می‌توان به صورت یک مسئله ریاضی به شرح زیر بیان کرد [24]:

$$\max_{\mathbf{W}_t,\mathbf{W}_r} \ \gamma_{RA,RB}(\mathbf{W}_t,\mathbf{W}_r)$$
$$s.t. \quad \gamma_E(\mathbf{W}_t) \leq \gamma_{th}$$
$$\|\mathbf{W}_t\| = \|\mathbf{W}_r\| = 1 \qquad (33)$$

مسئله بهینه‌سازی فاز دوم که در معادله (33) آمده است را می‌توان با استفاده از روابط (15) و (20) به شکل زیر بیان کرد:

$$\max_{\mathbf{W}_t,\mathbf{W}_r} \ \min\left(\frac{\frac{P_R}{d_{RA}^{\mu}}\|\mathbf{W}_r^{\dagger}\mathbf{H}_{RA}\|^2}{P_{AJ}\|\mathbf{W}_r^{\dagger}\mathbf{H}_{SI}\mathbf{W}_t\|^2+\sigma_A^2}, \frac{\frac{P_R}{d_{RB}^{\mu}}\|\mathbf{W}_r^{\dagger}\mathbf{H}_{RB}\|^2}{P_{BJ}\|\mathbf{W}_r^{\dagger}\mathbf{H}_{SI}\mathbf{W}_t\|^2+\sigma_B^2}\right)$$
$$s.t. \quad \frac{\frac{P_R}{d_{RE}^{\mu}}\|\mathbf{H}_{RE}\|^2}{\frac{P_{AJ}}{d_{AE}^{\mu}}\|\mathbf{H}_{AE}\mathbf{W}_t\|^2+\frac{P_{BJ}}{d_{BE}^{\mu}}\|\mathbf{H}_{BE}\mathbf{W}_t\|^2+\sigma_E^2} \leq \gamma_{th}$$
$$\|\mathbf{W}_t\| = \|\mathbf{W}_r\| = 1 \qquad (34)$$

در بخش اول رابطه (34)، هر دو عبارت درون عملگر min به ماتریس $\mathbf{W}_r$ وابسته بوده و فرآیند بهینه‌سازی یکسانی در فاز دوم دارند. بنابراین با بررسی لینک گره رله با کاربر A، برای ماتریس ثابت $\mathbf{W}_t$، می‌توان با بیشینه‌سازی نسبت $\frac{\|\mathbf{W}_r^{\dagger}\mathbf{H}_{RA}\|^2}{P_{AJ}\|\mathbf{W}_r^{\dagger}\mathbf{H}_{SI}\mathbf{W}_t\|^2+\sigma_A^2}$ ماتریس بهینه $\mathbf{W}_r$ را به دست آورد. حل این مسئله بهینه‌سازی و یافتن ماتریس بهینه $\mathbf{W}_r$ منجر به بیشینه شدن SINR دریافتی در کاربر A می‌شود. بر این اساس، مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\max_{\|\mathbf{W}_r\|=1} \ \frac{\mathbf{W}_r^{\dagger}\,\mathbf{H}_{RA}\,\mathbf{H}_{RA}^{\dagger}\,\mathbf{W}_r}{\mathbf{W}_r^{\dagger}\mathbf{A}\,\mathbf{W}_r} \qquad (35)$$

در رابطه‌ی فوق $\mathbf{A} = P_{AJ}\mathbf{H}_{SI}\mathbf{W}_t\mathbf{W}_t^{\dagger}\mathbf{H}_{SI}^{\dagger} + \sigma_A^2\mathbf{I}$ است. بنابراین، ماتریس بهینه $\mathbf{W}_r$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\mathbf{W}_r = \frac{\mathbf{A}^{-1}\,\mathbf{H}_{RA}}{\|\mathbf{A}^{-1}\,\mathbf{H}_{RA}\|} \qquad (36)$$

درنتیجه با قرار دادن ماتریس بهینه $\mathbf{W}_r$ در رابطه (12) و استفاده از فرمول شرمن-موریسون [25]، رابطه $\gamma_A$ می‌تواند به صورت زیر بازنویسی شود:

$$\gamma_A = \frac{P_R}{d_{RA}^{\tau}}\mathbf{H}_{RA}^{\dagger}\left(P_{AJ}\,\mathbf{H}_{SI}\,\mathbf{W}_t\,\mathbf{W}_t^{\dagger}\,\mathbf{H}_{SI}^{\dagger}+\mathbf{D}\right)^{-1}\mathbf{H}_{RA}$$
$$= \frac{P_R}{d_{RA}^{\tau}}\left(\mathbf{H}_{RA}^{\dagger}\,\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}_{RA} - \frac{P_{AJ}\|\mathbf{H}_{RA}^{\dagger}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}_{SI}\mathbf{W}_t\|^2}{(1+P_{AJ}\mathbf{W}_t^{\dagger}\,\mathbf{H}_{SI}^{\dagger}\,\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}_{SI}\mathbf{W}_t)}\right)$$
$$= \frac{P_R}{d_{RA}^{\tau}}\left(\mathbf{H}_{RA}^{\dagger}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}_{RA} - \frac{P_{AJ}\|\mathbf{H}_{RA}^{\dagger}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}_{SI}\mathbf{W}_t\|^2}{\mathbf{W}_t^{\dagger}(\mathbf{I}+\mathrm{P}_{AJ}\,\mathbf{H}_{SI}^{\dagger}\,\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}_{SI})\mathbf{W}_t}\right) \qquad (37)$$

که در آن $\mathbf{D} = \sigma_A^2\mathbf{I}$ است. مسئله بهینه‌سازی (33) را برای کاربر A می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\max_{\|\mathbf{W}_t\|=1}\left(\frac{P_R}{\sigma_A^2 d_{RA}^{\tau}}\|\mathbf{H}_{RA}\|^2 - \frac{\frac{P_R}{d_{RA}^{\tau}}P_{AJ}\|\mathbf{H}_{RA}^{\dagger}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}_{SI}\mathbf{W}_t\|^2}{\mathbf{W}_t^{\dagger}(\mathbf{I}+P_{AJ}\,\mathbf{H}_{SI}^{\dagger}\,\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}_{SI})\mathbf{W}_t}\right)$$
$$s.t. \ \|\mathbf{H}_{AE}\,\mathbf{W}_t\|^2 + \|\mathbf{H}_{BE}\,\mathbf{W}_t\|^2 \geq q$$
$$= \mathbf{H}_{AE}\mathbf{W}_t\,\mathbf{W}_t^{\dagger}\mathbf{H}_{AE}^{\dagger} + \mathbf{H}_{BE}\,\mathbf{W}_t\,\mathbf{W}_t^{\dagger}\mathbf{H}_{BE}^{\dagger} \geq q$$
$$\|\mathbf{W}_t\| = \|\mathbf{W}_r\| = 1 \qquad (38)$$

که در آن $q$ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$q = \frac{P_R\,\|\mathbf{H}_{RE}\|^2 d_{AE}^{\mu}\,d_{BE}^{\mu}}{P_{AJ}\,\gamma_{th}d_{RE}^{\tau}\,d_{BE}^{\tau} + P_{BJ}\,\gamma_{th}d_{RE}^{\tau}\,d_{AE}^{\tau}} - \frac{\sigma_E^2\,d_{AE}^{\mu}\,d_{BE}^{\mu}}{P_{AJ}\,\gamma_{th}d_{RE}^{\tau}\,d_{BE}^{\tau} + P_{BJ}\,\gamma_{th}d_{RE}^{\tau}\,d_{AE}^{\tau}} \qquad (39)$$

می‌توان برای خطی‌سازی رابطه (37)، همانند فاز اول از تغییر متغیر به شکل زیر بهره گرفت:

اگر فرض کنیم:

$$\frac{P_{AJ}\left\|\mathbf{H}_{RA}^{\dagger}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}_{SI}\mathbf{W}_t\right\|^2}{\mathbf{W}_t^{\dagger}\left(\mathbf{I}+P_{AJ}\,\mathbf{H}_{SI}^{\dagger}\,\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}_{SI}\right)\mathbf{W}_t}$$
$$= P_{AJ}\,\mathbf{W}_t^{\dagger}\,\mathbf{H}_{SI}^{\dagger}\,\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}_{RA}\,\mathbf{H}_{RA}^{\dagger}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}_{SI}\,\mathbf{W}_t \qquad (40)$$

و تغییر متغیر زیر را تعریف کنیم:

$$\mathbf{W}_t^{\dagger}\left(\mathbf{I}+P_{AJ}\mathbf{H}_{SI}^{\dagger}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}_{SI}\right)\mathbf{W}_t$$
$$= \left(\mathbf{I}+P_{AJ}\mathbf{H}_{SI}^{\dagger}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}_{SI}\right)\mathbf{W}_t{}^2$$
$$= \mathbf{K}\,\mathbf{W}_t{}^2 \rightarrow \bar{\mathbf{W}}_t = \mathbf{K}^{\frac{1}{2}}\,\mathbf{W}_t \qquad (41)$$

آنگاه معادله (38) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\min_{\|\mathbf{W}_t\|}\left(\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\bar{\mathbf{W}}_t^{\dagger}\mathbf{H}_{SI}^{\dagger}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}_{RA}\mathbf{H}_{RA}^{\dagger}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}_{SI}\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\bar{\mathbf{W}}_t\right)$$
$$s.t. \ \left(\mathbf{H}_{AE}\,\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\bar{\mathbf{W}}_t\,\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\bar{\mathbf{W}}_t^{\dagger}\mathbf{H}_{AE}^{\dagger} + \mathbf{H}_{BE}\,\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\bar{\mathbf{W}}_t\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\bar{\mathbf{W}}_t^{\dagger}\mathbf{H}_{BE}^{\dagger}\right) \geq q \qquad (42)$$

با توجه به ضرب متغیرهای طراحی ($\bar{\mathbf{W}}_t^{\dagger}$ و $\bar{\mathbf{W}}_t$) که منجر به غیرخطی شدن تابع هدف و محدودیت می‌شود، مسئله بهینه‌سازی فاقد جواب تحلیلی بسته و فرم محدب است. راه‌حل این مشکل، تعریف متغیر جدید $\bar{\mathbf{U}}_t = \bar{\mathbf{W}}_t\,\bar{\mathbf{W}}_t^{\dagger}$ است که امکان بازنویسی مسئله را به صورت یک مسئله SDR به شکل زیر فراهم می‌کند:

$$\min_{\|\bar{\mathbf{U}}_t\|=1} \ \mathrm{tr}\left(\bar{\mathbf{U}}_t\,\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{H}_{SI}^{\dagger}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}_{RA}\mathbf{H}_{RA}^{\dagger}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}_{SI}\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\right)$$
$$s.t. \quad \mathrm{tr}\left(\mathbf{H}_{AE}\,\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\bar{\mathbf{U}}_t\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{H}_{AE}^{\dagger} + \mathbf{H}_{BE}\,\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\bar{\mathbf{U}}_t\,\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{H}_{BE}^{\dagger}\right) \geq q$$

$$\begin{aligned} &\mathrm{tr}(\bar{\mathbf{U}}_\mathrm{t}) = 1 \\ &\bar{\mathbf{U}}_\mathrm{t} \geq 0 \end{aligned} \tag{43}$$

مشابه فاز اول، در فاز دوم نیز مسئله SDR رابطه (۴۳) یک مسئله استاندارد با دو قید نامساوی است. این مسئله توسط نرم‌افزار بهینه‌سازی محدب CVX حل می‌شود. در جواب نهایی، ماتریس $\bar{\mathbf{U}}_\mathrm{t}$ یک مقدار ویژه غیر صفر دارد که متناظر با ماتریس $\mathbf{W}_\mathrm{t}$ در مسئله بهینه‌سازی است.

## 2-3. طراحی شکل‌دهی پرتوی TZF

در این مقاله، علاوه بر طرح شکل‌دهی پرتوی بهینه، از طرح شکل‌دهی پرتوی TZF نیز برای مقایسه عملکرد سیستم پیشنهادی استفاده شده است. طرح TZF با پیچیدگی محاسباتی کمتر نسبت به طرح بهینه، ضمن محدود کردن سیگنال خودتداخلی در گره‌های مجاز، با افزایش تداخل ساختگی در گره استراق‌سمع کننده و کاهش SINR آن، امنیت قابل قبولی را برای سیستم پیشنهادی فراهم می‌کند. بر این اساس، در ادامه به طراحی شکل‌دهی پرتوی TZF در گره‌های مجاز می‌پردازیم.

### 2-3-1. طراحی شکل‌دهی پرتوی TZF در فاز اول

در فاز اول این طرح، از روش شکل‌دهی پرتوی TZF برای ارسال تداخل ساختگی از گره رله به سمت گره استراق‌سمع کننده استفاده می‌شود. به منظور بهبود SINR در گره رله، از تکنیک شکل‌دهی پرتوی دریافت اطلاعات مبتنی بر روش حداکثر نسبت ترکیب[1] (MRC) بهره گرفته می‌شود. در این روش، ماتریس شکل‌دهی پرتو برای دریافت اطلاعات در گره رله برابر با $\mathbf{W}_\mathrm{r}^{MRC} = \frac{(\mathbf{H}_\mathrm{AR}+\mathbf{H}_\mathrm{BR})}{\|\mathbf{H}_\mathrm{AR}+\mathbf{H}_\mathrm{BR}\|}$ می‌باشد.

در فاز اول، مسئله طراحی ماتریس شکل‌دهی پرتوی ارسال تداخل ساختگی ($\mathbf{W}_t$) را می‌توان برای طرح TZF در گره رله، از طریق حل مسئله زیر به دست آورد [27]:

$$\begin{aligned} &max \quad \|\mathbf{H}_\mathrm{RE}\mathbf{W}_\mathrm{t}\|^2 \\ &s.t. \quad \left(\mathbf{H}_\mathrm{AR}^\dagger + \mathbf{H}_\mathrm{BR}^\dagger\right)\mathbf{H}_\mathrm{SI}\,\mathbf{W}_\mathrm{t} = 0 \end{aligned} \tag{44}$$

در رابطه (44)، طرح TZF به دنبال افزایش توان سیگنال تداخل در گره استراق‌سمع کننده و همزمان کاهش اثر خودتداخلی در گره رله است. برای این منظور، ماتریس شکل‌دهی پرتو $\mathbf{W}_\mathrm{t}$ باید به گونه‌ای طراحی شود که ضمن موازی بودن با ماتریس کانال $\mathbf{H}_\mathrm{RE}$ برای انتقال حداکثر توان به گره استراق‌سمع کننده، در فضایی عمود بر $\left(\mathbf{H}_\mathrm{AR}^\dagger + \mathbf{H}_\mathrm{BR}^\dagger\right)\mathbf{H}_\mathrm{SI}$ قرار گیرد تا خودتداخلی کاهش یابد. از آنجا که این دو ماتریس کاملاً بر هم عمود نیستند، از ماتریس تصحیح $\mathbf{R}$ به شکل زیر برای حذف بخش‌های موازی و مشترک استفاده می‌شود [27]:

$$\mathbf{R} \simeq \mathbf{I} - \frac{\mathbf{H}_\mathrm{SI}^\dagger\left(\mathbf{H}_\mathrm{AR}\,\mathbf{H}_\mathrm{AR}^\dagger + \mathbf{H}_\mathrm{BR}\,\mathbf{H}_\mathrm{BR}^\dagger\right)\mathbf{H}_\mathrm{SI}}{\left\|\left(\mathbf{H}_\mathrm{AR}^\dagger + \mathbf{H}_\mathrm{BR}^\dagger\right)\mathbf{H}_\mathrm{SI}\right\|^2} \tag{45}$$

در رابطه (45)، ماتریس تصحیح $\mathbf{R}$ از طریق نرمال‌سازی و حذف فضای مشترک به دست می‌آید. سپس با ضرب ماتریس $\mathbf{R}$ در $\mathbf{H}_\mathrm{RE}$ و نرمال‌سازی نتیجه، ماتریس $\mathbf{W}_\mathrm{t}^{TZF} = \frac{\mathbf{R}\,\mathbf{H}_\mathrm{RE}^\dagger}{\|\mathbf{R}\,\mathbf{H}_\mathrm{RE}^\dagger\|}$ حاصل می‌شود. این ماتریس می‌تواند با محدود کردن اثر خودتداخلی در گره رله و همچنین افزایش توان تداخل در گره استراق‌سمع کننده، امنیت لایه فیزیکی سیستم را بهبود دهد.

با جایگزینی $\mathbf{W}_\mathrm{r}^{MRC}$ و $\mathbf{W}_\mathrm{t}^{TZF}$ در روابط (14) و (18)، SINR در فاز اول برای گره رله و گره استراق‌سمع کننده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma_{AR,BR}^{TZF} = \frac{\frac{P_A}{d_{AR}^{\mu}}\left\|\mathbf{W}_\mathrm{r}^{MRC\dagger}\mathbf{H}_\mathrm{AR}\right\|^2 + \frac{P_B}{d_{BR}^{\mu}}\left\|\mathbf{W}_\mathrm{r}^{MRC\dagger}\mathbf{H}_\mathrm{BR}\right\|^2}{P_{RJ}\left\|\mathbf{W}_\mathrm{r}^{MRC\dagger}\mathbf{H}_\mathrm{SI}\,\mathbf{W}_\mathrm{t}^{TZF}\right\|^2 + \sigma_R^2} \tag{46}$$

$$\gamma_E^{TZF} = \frac{\frac{P_A}{d_{AE}^{\mu}}\|\mathbf{H}_\mathrm{AE}\|^2 + \frac{P_B}{d_{BE}^{\mu}}\|\mathbf{H}_\mathrm{BE}\|^2}{\frac{P_{RJ}}{d_{RE}^{\mu}}\|\mathbf{H}_\mathrm{RE}\,\mathbf{W}_\mathrm{t}^{TZF}\|^2 + \sigma_E^2} \tag{47}$$

در رابطه (46)، عبارت‌های $\left\|\mathbf{W}_\mathrm{r}^{MRC\dagger}\mathbf{H}_\mathrm{AR}\right\|^2$ و $\left\|\mathbf{W}_\mathrm{r}^{MRC\dagger}\mathbf{H}_\mathrm{BR}\right\|^2$ دارای توزیع مربع کای با درجه آزادی $2N_R$ هستند. این به دلیل وجود $N_R$ آنتن گیرنده در گره رله است، که هر مؤلفه مختلط ماتریس کانال دارای دو درجه آزادی (حقیقی و موهومی) می‌باشد. در رابطه (47)، عبارت‌های $\|\mathbf{H}_\mathrm{AE}\|^2$ و $\|\mathbf{H}_\mathrm{BE}\|^2$ از توزیع رایلی با تابع چگالی احتمال نمایی پیروی می‌کنند. همچنین، عبارت $\|\mathbf{H}_\mathrm{RE}\,\mathbf{W}_\mathrm{t}^{TZF}\|^2$ در طرح شکل‌دهی پرتو TZF دارای توزیع مربع کای با درجه آزادی $2(N_T-1)$ است، زیرا در این طرح یک آنتن برای کاهش خودتداخلی استفاده می‌شود. اما در طرح بهینه، این عبارت دارای توزیع مربع کای با درجه آزادی $2N_T$ است.

### 2-3-2. طراحی شکل‌دهی پرتوی TZF در فاز دوم

در فاز دوم، کاربران A و B اطلاعات خود را از گره رله دریافت می‌کنند. این کاربران با استفاده از روش شکل‌دهی پرتویTZF، به‌طور همزمان تداخل ساختگی را به سمت گره استراق‌سمع کننده ارسال می‌کنند. برای بهبود SINR در کاربران A و B، از تکنیک شکل‌دهی پرتوی MRC در گیرنده استفاده می‌شود. برای ساده‌سازی محاسبات، تنها لینک رله به کاربر A بررسی می‌شود، هرچند در عمل لینک رله به کاربر B نیز موجود است. در این روش، ماتریس شکل‌دهی پرتو دریافت اطلاعات در کاربر A برابر با $\mathbf{W}_\mathrm{r}^{MRC} = \frac{\mathbf{H}_\mathrm{RA}}{\|\mathbf{H}_\mathrm{RA}\|}$ می‌باشد [27].

در فاز دوم، ماتریس شکل‌دهی پرتوی ارسال تداخل ساختگی ($\mathbf{W}_t$) برای کاربر A با استفاده از طرح TZF، از طریق حل مسئله زیر به دست می‌آید [27]:

$$\begin{aligned} &max \quad \|\mathbf{H}_\mathrm{AE}\mathbf{W}_\mathrm{t}\|^2 \\ &s.t. \quad \mathbf{H}_\mathrm{RA}^\dagger\,\mathbf{H}_\mathrm{SI}\,\mathbf{W}_\mathrm{t} = 0 \end{aligned} \tag{48}$$

[1] Maximum Ratio Combining

در نتیجه ماتریس شکل‌دهی پرتوی ارسال تداخل ساختگی برای کاربر A در طرح TZF برابر خواهد بود با $\mathbf{W}_{\mathrm{t}}^{TZF}=\frac{\mathbf{L}\,\mathbf{H}_{\mathrm{AE}}^{\dagger}}{\|\mathbf{L}\,\mathbf{H}_{\mathrm{AE}}^{\dagger}\|}$ که در آن $\mathbf{L}$ برابر است با [27]:

$$\mathbf{L}\simeq\mathbf{I}-\frac{\mathbf{H}_{\mathrm{SI}}^{\dagger}\,\mathbf{H}_{\mathrm{RA}}\,\mathbf{H}_{\mathrm{RA}}^{\dagger}\,\mathbf{H}_{\mathrm{SI}}}{\left\|\mathbf{H}_{\mathrm{RA}}^{\dagger}\,\mathbf{H}_{\mathrm{SI}}\right\|^{2}} \tag{49}$$

ماتریس $\mathbf{L}$ یک ماتریس تصحیح است. ماتریس شکل‌دهی پرتوی ارسال تداخل ساختگی ($\mathbf{W}_{\mathrm{t}}^{TZF}$) از طریق نرمال‌سازی حاصل‌ضرب ماتریس $\mathbf{L}$ در ماتریس $\mathbf{H}_{\mathrm{AE}}$ به دست می‌آید. در فاز دوم، این ماتریس با محدود کردن اثر خودتداخلی در کاربر A و همچنین افزایش توان تداخل در گره استراق‌سمع کننده، موجب بهبود امنیت لایه فیزیکی سیستم می‌شود.

با جایگزینی $\mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{MRC}$ و $\mathbf{W}_{\mathrm{t}}^{TZF}$ در روابط (15) و (20)، SINR کل در فاز دوم برای کاربران A و B و همچنین گره استراق‌سمع کننده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma_{RA,RB}^{TZF}=min\left(\frac{\frac{P_R}{d_{RA}^{\mu}}\left\|\mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{MRC\dagger}\,\mathbf{H}_{\mathrm{RA}}\right\|^{2}}{P_{AJ}\left\|\mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{MRC\dagger}\mathbf{H}_{\mathrm{SI}}\,\mathbf{W}_{\mathrm{t}}^{TZF}\right\|^{2}+\sigma_A^2},\frac{\frac{P_R}{d_{RB}^{\mu}}\left\|\mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{MRC\dagger}\,\mathbf{H}_{\mathrm{RB}}\right\|^{2}}{P_{BJ}\left\|\mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{MRC\dagger}\mathbf{H}_{\mathrm{SI}}\,\mathbf{W}_{\mathrm{t}}^{TZF}\right\|^{2}+\sigma_B^2}\right) \tag{50}$$

$$\gamma_E^{TZF}=\frac{\frac{P_R}{d_{RE}^{\mu}}\|\mathbf{H}_{\mathrm{RE}}\|^{2}}{\frac{P_{AJ}}{d_{AE}^{\mu}}\|\mathbf{H}_{\mathrm{AE}}\mathbf{W}_{\mathrm{t}}^{TZF}\|^{2}+\frac{P_{BJ}}{d_{BE}^{\mu}}\|\mathbf{H}_{\mathrm{BE}}\mathbf{W}_{\mathrm{t}}^{TZF}\|^{2}+\sigma_{\mathrm{E}}^{2}} \tag{51}$$

در رابطه (50)، عبارت‌های $\left\|\mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{MRC\dagger}\,\mathbf{H}_{\mathrm{RA}}\right\|^{2}$ و $\left\|\mathbf{W}_{\mathrm{r}}^{MRC\dagger}\,\mathbf{H}_{\mathrm{RB}}\right\|^{2}$ دارای توزیع مربع کای با درجه آزادی $2N_R$ هستند. این به دلیل وجود $N_R$ آنتن گیرنده در کاربران A و B است، که در آن هر مؤلفه مختلط ماتریس کانال دارای دو درجه آزادی (حقیقی و موهومی) می‌باشد. در رابطه (51)، عبارت $\|\mathbf{H}_{\mathrm{RE}}\|^2$ از توزیع رایلی با تابع چگالی احتمال نمایی تبعیت می‌کند. در طرح شکل‌دهی پرتو TZF، به دلیل استفاده از یک آنتن برای کاهش خودتداخلی، عبارت‌های $\|\mathbf{H}_{\mathrm{AE}}\mathbf{W}_{\mathrm{t}}^{TZF}\|^2$ و $\|\mathbf{H}_{\mathrm{BE}}\mathbf{W}_{\mathrm{t}}^{TZF}\|^2$ دارای توزیع مربع کای با درجه آزادی $2(N_T-1)$ هستند. این در حالی است که در طرح بهینه، همین عبارت‌ها از توزیع مربع کای با درجه آزادی $2N_T$ پیروی می‌کنند.

## ۳. ارزیابی عملکرد امنیت سیستم پیشنهادی

در این بخش، به بررسی عملکرد نرخ محرمانگی می‌پردازیم که یکی از معیارهای اساسی برای ارزیابی امنیت در ارتباطات بی‌سیم تحت شنود فعال است. برای یک نمونه مشخص از کانال، نرخ محرمانگی لحظه‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود [28]:

$$R_0^i=\left[C_{Total}^i-C_{E_{Total}}^i\right]^{+} \tag{52}$$

در این سیستم، تابع $[x]^+$ به صورت $\max(x,0)$ تعریف می‌شود و پارامتر $i$ نشان‌دهنده نوع شکل‌دهی پرتو است که می‌تواند یکی از دو حالت طرح بهینه یا TZF را اختیار کند. ظرفیت کل کانال ارتباطی از فرمول $C_{Total}^i=\log_2(1+\gamma_{Total}^i)$ محاسبه می‌شود و ظرفیت کل کانال شنود با فرمول $C_{E_{Total}}^i=\log_2(1+\gamma_{E_{Total}}^i)$ بیان می‌گردد. از آنجایی که نرخ محرمانگی لحظه‌ای برای نمونه‌های مختلف کانال متغیر است، برای ارزیابی امنیت در بازه‌های زمانی طولانی‌مدت می‌توان از نرخ محرمانگی متوسط به عنوان معیار عملکرد استفاده کرد.

نرخ محرمانگی متوسط به صورت زیر تعریف می‌شود [21]:

$$\bar{R}_0^i=E\left\{\left[C_{Total}^i-C_{E_{Total}}^i\right]^{+}\right\} \tag{53}$$

در این مقاله، احتمال قطع لینک شنود به عنوان معیاری نوآورانه در کنار نرخ محرمانگی متوسط برای بررسی امنیت ارتباطات بی‌سیم مورد مطالعه قرار می‌گیرد. احتمال قطع لینک شنود به احتمالی گفته می‌شود که در آن SINR در گره استراق‌سمع کننده به کمتر از یک حد آستانه مشخص برسد. این احتمال از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{\gamma_{E_{Total}}^i}(x)=\mathrm{P_r}\left(\gamma_{E_{Total}}^i<\gamma_{th}\right) \tag{54}$$

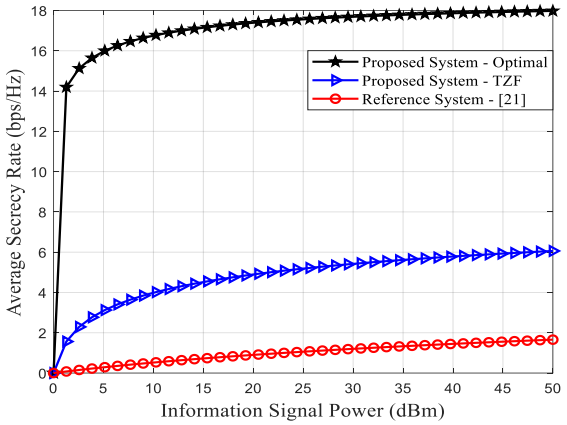
## 4. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، عملکرد سیستم پیشنهادی برای بهبود امنیت لایه فیزیکی ارزیابی شده و صحت نتایج نظری تأیید می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی‌ها می‌تواند راهنمای مناسبی برای طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های ارتباطی امن در برابر گره‌های استراق‌سمع کننده باشد. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول (1) ارائه شده است.

**جدول (1):** پارامترهای شبیه‌سازی

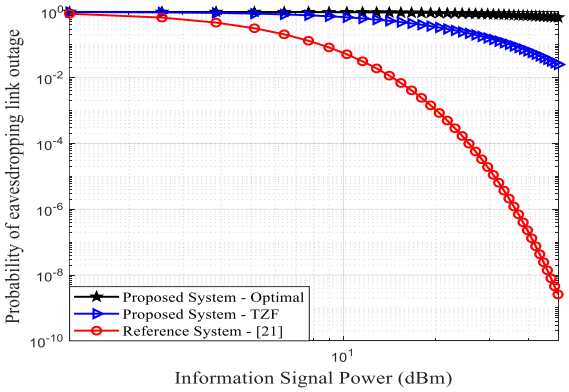
| پارامترها | مقادیر |
|---|---|
| توان سیگنال اطلاعات و تداخل ساختگی ارسالی از گره‌های مجاز | 50 dBm |
| واریانس نویز AWGN برای تمامی گره‌ها | -70 dBm |
| ضریب اتلاف مسیر | 2/6 |
| تعداد آنتن‌های ارسال و دریافت در گره‌های مجاز | 6 |
| تعداد آنتن‌های دریافت در گره استراق‌سمع کننده | 6 |
| فاصله میان گره‌های مجاز | 500 m |
| فاصله میان گره‌های مجاز تا گره استراق‌سمع کننده | 700 m |
| SINR آستانه برای گره استراق‌سمع کننده | -40 dBm |

در شکل (2)، نرخ محرمانگی متوسط سه سیستم مختلف بر حسب تغییرات توان سیگنال اطلاعات گره‌های مجاز به نمایش درآمده است. این سیستم‌ها شامل سیستم پیشنهادی با دو طرح شکل‌دهی پرتوی بهینه و TZF و همچنین سیستم مرجع [21] می‌باشد.



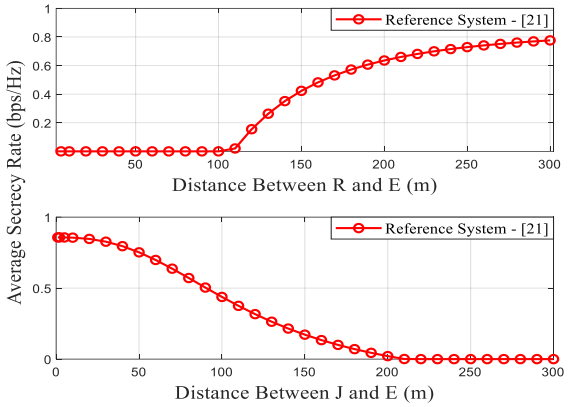

**شکل (2)**. نرخ محرمانگی متوسط بر حسب توان سیگنال اطلاعات

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش توان سیگنال اطلاعات، نرخ محرمانگی متوسط در هر سه سیستم روند صعودی دارد. مقایسه عملکرد این سیستم‌ها در توان 1/28 dBm نشان می‌دهد که طرح بهینه و TZF سیستم پیشنهادی به ترتیب نرخ محرمانگی متوسط 14/19 bps/Hz و 1/56 bps/Hz را فراهم می‌کنند؛ این در حالی است که سیستم مرجع [21] تنها موفق به تولید نرخ محرمانگی متوسط 0/08 bps/Hz شده است. برتری عملکرد سیستم پیشنهادی در توان 50 dBm نیز به وضوح قابل مشاهده است. در این سطح توان، طرح‌های بهینه و TZF سیستم پیشنهادی به ترتیب نرخ محرمانگی متوسط 17/98 bps/Hz و 6 bps/Hz را ایجاد می‌کنند. این در حالی است که سیستم مرجع [21] تنها قادر به تولید نرخ محرمانگی متوسط 1/65 bps/Hz می‌باشد. در نهایت، نتایج حاکی از آن است که سیستم پیشنهادی با طرح بهینه، عملکرد به مراتب بهتری در بهبود امنیت لایه فیزیکی نسبت به طرح TZF و سیستم مرجع [21] از خود نشان می‌دهد.




**شکل (3)**. احتمال قطع لینک شنود بر حسب توان سیگنال اطلاعات

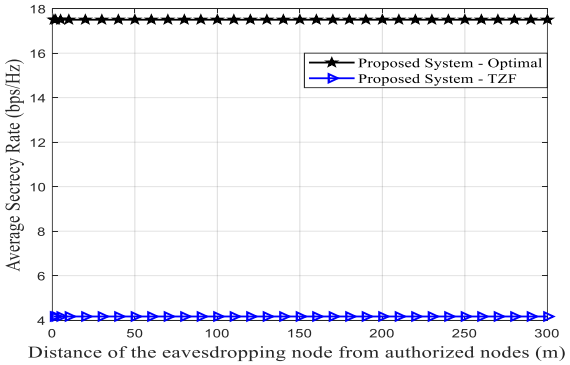
شکل (3)، احتمال قطع لینک شنود را براساس توان سیگنال اطلاعات گره‌های مجاز نشان می‌دهد. این مقایسه بین دو طرح شکل‌دهی پرتوی بهینه و TZF در سیستم پیشنهادی و همچنین سیستم مرجع [21] انجام شده است. با افزایش توان ارسال سیگنال اطلاعات در گره‌های مجاز، علاوه بر افزایش توان سیگنال دریافتی در این گره‌ها، توان سیگنال دریافتی در گره استراق‌سمع کننده نیز افزایش می‌یابد. این افزایش باعث بالا رفتن SINR در گره استراق‌سمع کننده شده و در نتیجه احتمال قطع لینک شنود کاهش می‌یابد. برای حل این مشکل، روش‌های شکل‌دهی پرتوی مناسبی پیشنهاد شده که نتایج شبیه‌سازی کارآمد بودن آنها را تایید می‌کند. در توان 1/28 dBm، طرح بهینه سیستم پیشنهادی توانسته احتمال قطع لینک شنود را به 99 درصد برساند، در حالی که این مقدار برای طرح TZF به 98 درصد و برای سیستم مرجع [21] به 88 درصد می‌رسد. در توان 50dBm، طرح بهینه سیستم پیشنهادی همچنان احتمال قطع لینک شنود را در سطح 71 درصد حفظ کرده است، در صورتی که این مقدار برای طرح TZF به 0/9 درصد و برای سیستم مرجع [21] به $2/57\times10^{-9}$ کاهش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش توان سیگنال اطلاعات، طرح بهینه سیستم پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به طرح TZF و سیستم مرجع [21] از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این، سیستم پیشنهادی با طرح TZF در مقایسه با سیستم مرجع [21]، احتمال قطع لینک شنود بالاتری را تضمین می‌کند.




**شکل (4)**. نرخ محرمانگی متوسط بر حسب تغییر فاصله گره استراق‌سمع کننده از گره رله و گره مسدودکننده خارجی

شکل (4)، نرخ محرمانگی متوسط را بر حسب تغییر فاصله بین گره استراق‌سمع کننده از گره رله و گره مسدودکننده خارجی نمایش می‌دهد. در قسمت بالایی شکل، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در حالتی که گره مسدودکننده خارجی در فاصله 130 متری از گره رله قرار دارد، چنانچه فاصله بین گره استراق‌سمع کننده و گره رله از 110 متر بیشتر شود، به دلیل وجود تداخل ساختگی، تلفات مسیر و نویز کانال، نرخ محرمانگی متوسط افزایش می‌یابد. هنگامی که فاصله بین این دو گره کمتر از 110 متر است، به دلیل نزدیک‌تر بودن گره استراق‌سمع کننده به گره رله نسبت به گره مسدودکننده خارجی، نرخ محرمانگی متوسط به صفر می‌رسد. در قسمت پایینی شکل، نتایج نشان می‌دهد که حداکثر نرخ محرمانگی متوسط برابر با 0/86 bps/Hz زمانی به دست می‌آید که فاصله بین گره مسدودکننده خارجی و گره استراق‌سمع کننده یک متر و فاصله گره رله از گره

استراق‌سمع کننده 130 متر باشد. با افزایش فاصله بین گره استراق‌سمع کننده و گره مسدودکننده خارجی، نرخ محرمانگی متوسط کاهش می‌یابد و در صورتی که این فاصله از 210 متر بیشتر شود، به علت فاصله زیاد بین آن‌ها، نرخ محرمانگی متوسط دیگر ایجاد نخواهد شد.




**شکل (5)**. نرخ محرمانگی متوسط بر حسب تغییرات فاصله گره استراق‌سمع کننده از گره‌های مجاز

شکل (5)، نرخ محرمانگی متوسط را نسبت به تغییرات فاصله گره استراق‌سمع کننده از گره‌های مجاز در سیستم پیشنهادی با دو طرح شکل‌دهی پرتوی بهینه و TZF نمایش می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که طرح بهینه سیستم پیشنهادی می‌تواند نرخ محرمانگی متوسط ثابت 17/5 bps/Hz را برای گره‌های مجاز در تمامی فواصل از گره استراق‌سمع کننده ایجاد کند. از طرفی، به دلیل اینکه طرح TZF نمی‌تواند اثر خودتداخلی را به طور کامل حذف کند و همچنین قادر نیست سطح SINR را در گره استراق‌سمع کننده از یک مقدار مشخص کمتر نماید، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این طرح در سیستم پیشنهادی می‌تواند نرخ محرمانگی متوسط ثابت 4/2 bps/Hz را برای گره‌های مجاز در تمامی فواصل از گره استراق‌سمع کننده ایجاد کند. توانایی هر دو طرح شکل‌دهی پرتوی بهینه و TZF در ایجاد نرخ محرمانگی متوسط ثابت برای گره‌های مجاز در تمامی فواصل از گره استراق‌سمع کننده، به دلیل استفاده از مدل سیستم پیشنهادی با طرح تداخل مشارکتی توسط گره‌های مجاز است. این طرح بدون وابستگی به گره‌های مسدودکننده خارجی، موجب کاهش SINR در گره استراق‌سمع کننده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که طرح‌های شکل‌دهی پرتوی بهینه و TZF در سیستم پیشنهادی، عملکرد بسیار بهتری در مقایسه با سیستم مرجع [21] دارند. در سیستم مرجع [21]، نرخ محرمانگی متوسط با نزدیک شدن گره استراق‌سمع کننده به گره رله و یا دور شدن گره مسدودکننده خارجی از گره استراق‌سمع کننده کاهش می‌یابد. اما در سیستم پیشنهادی، به دلیل ارسال مشارکتی تداخل ساختگی توسط تمامی گره‌های مجاز، نرخ محرمانگی متوسط هیچگاه همانند سیستم مرجع [21] به صفر نمی‌رسد.

## 5. نتیجه گیری

در این مقاله، یک سیستم مخابراتی امن با استفاده از تکنیک‌های نوین امنیت لایه فیزیکی برای پاسخگویی به نیاز روزافزون امنیت در شبکه‌های بی‌سیم 5G ارائه شده است. این سیستم به جای استفاده از روش‌های رمزنگاری سنتی، از ویژگی‌های ذاتی کانال بی‌سیم برای تأمین امنیت ارتباطات استفاده می‌کند. نوآوری اصلی مقاله در ترکیب هوشمندانه سه فناوری است که شامل سیستم چندآنتنه، قابلیت کاملاً دوطرفه و پروتکل کدگشایی و ارسال مجدد می‌باشد. این فناوری‌ها در یک ساختار مشارکتی دو فازه پیاده‌سازی شده‌اند. در این سیستم، گره‌های مجاز علاوه بر تبادل همزمان اطلاعات، به صورت مشارکتی تداخل ساختگی را به سمت گره استراق‌سمع کننده ارسال می‌کنند که این امر موجب حفظ نرخ محرمانگی، حتی در شرایط نزدیک شدن گره استراق‌سمع کننده به گره‌های مجاز می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که طرح بهینه سیستم پیشنهادی توانست نرخ محرمانگی متوسط را در مقایسه با طرح TZF و سیستم مرجع [21] به ترتیب 11/98 bps/Hz و 16/33 bps/Hz بهبود بخشد و احتمال قطع لینک شنود را به 81 درصد برساند. همچنین طرح TZF با وجود پیچیدگی محاسباتی کمتر، عملکرد قابل قبولی از خود نشان داد و توانست نرخ محرمانگی متوسط را 4/35 bps/Hz نسبت به سیستم مرجع [21] افزایش دهد. مهم‌ترین دستاورد این مقاله آن است که سیستم پیشنهادی، برخلاف سیستم مرجع [21]، توانست نرخ محرمانگی را در تمام شرایط حفظ کند. این در حالی است که در سیستم مرجع [21]، نرخ محرمانگی با نزدیک شدن گره استراق‌سمع کننده به گره‌های مجاز به صفر می‌رسید. این موفقیت به دلیل ارسال مشارکتی تداخل ساختگی توسط تمامی گره‌های مجاز حاصل شد و نشان‌دهنده برتری قابل توجه سیستم پیشنهادی در تأمین امنیت پایدار شبکه‌های بی‌سیم 5G است.

## 6. مراجع

[1] M. Harvanek, J. Bolcek, J. Kufa, L. Polak, M. Simka, and R. Marsalek, “Survey on 5G Physical Layer Security Threats and Countermeasures,” Sensors, vol. 24, pp. 5523, 2024. DOI: 10.3390/s24175523.

[2] H. Salman, M. S. J. Solaija, and H. Arslan, “Towards a Unified Framework for Physical Layer Security in 5G and Beyond Networks,” IEEE Open Journal of Vehicular Technology, vol. 3, pp. 321-343, 2022. DOI: 10.1109/OJVT.2022.3183218.

[3] A. D. Wyner, “The wire-tap channel,” in The Bell System Technical Journal, vol. 54, pp. 1355-1387, 1975. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1975.tb02040.x.

[4] L. Mucchi et al., “Physical-Layer Security in 6G Networks,” in IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 2, pp. 1901-1914, 2021. DOI: 10.1109/OJCOMS.2021.3103735.

[17. ] A. Kuhestani and M. Keshavarzi, “A Novel Secret Key Generation Scheme in the Presence of an Untrusted Relay,” Journal of Electronic and Cyber Defense, vol. 10,No.3, pp. 119-126, 2022. (in Persian). DOR:https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1403.12.3.8.0

[18.] H. Khodadadi and S. Falsafi, “Improving Security in Wireless Telecommunication Networks Using Directional Modulation and Artificial Noise,” Journal of Electronic and Cyber Defense, vol. 10, pp. 11-18, 2022. DOR: 20.1001.1.23224347.1401.10.4.2.2. (in Persian).

[19.] M. Baratian, H. Ziyani and A. Koohestani, “Physical Layer Security Using Compressed Sensing in the Presence of Non-Ideal Relays by Eliminating Hardware Impairments Using an Iterative Method,” Journal of Electronic and Cyber Defense, vol. 11, pp. 75-82, 2023. DOR: 20.1001.1.23224347.1402.11.4.6.3. (in Persian).

[20. ] Y. Li, R. Zhao, L. Fan and A. Liu, “Antenna Mode Switching for Full-Duplex Destination-Based Jamming Secure Transmission,” in IEEE Access, vol. 6, pp. 9442-9453, 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2791638.

[21.] Z. Mobini, M. Mohammadi and C. Tellambura, “Wireless-Powered Full-Duplex Relay and Friendly Jamming for Secure Cooperative Communications,” in IEEE Transactions on Information Forensics and Security, vol. 14, pp. 621-634, 2019. DOI: 10.1109/TIFS.2018.2859593.

[22.]W. Wang, K. C. Teh and K. H. Li, “Secrecy Throughput Maximization for MISO Multi-Eavesdropper Wiretap Channels,” in IEEE Transactions on Information Forensics and Security, vol. 12, pp. 505-515, 2017. DOI: 10.1109/TIFS.2016.2620279.

[23.] X. Tang, P. Ren and Z. Han, “Power-Efficient Secure Transmission Against Full-Duplex Active Eavesdropper: A Game-Theoretic Framework,” in IEEE Access, vol. 5, pp. 24632-24645. 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2767283.

[24.] M. Mohammadi, B. K. Chalise, H. A. Suraweera, C. Zhong, G. Zheng and I. Krikidis, “Throughput Analysis and Optimization of Wireless-Powered Multiple Antenna Full-Duplex Relay Systems,” in IEEE Transactions on Communications, vol. 64, pp. 1769-1785, 2016. DOI: 10.1109/TCOMM.2016.2527785.

[25. ] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky and W. T. Vetterling, “Sherman-Morrison Formula,” in Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing, Cambridge, England: Cambridge Univ. Press, pp. 65-67, 1992.

[26]. . CVX Research Inc., “CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming, Version 2.2,” http://cvxr.com/cvx, 2020.

[27]. C. Zhong, X. Jiang, F. Qu and Z. Zhang, “Multi-Antenna Wireless Legitimate Surveillance Systems: Design and Performance Analysis,” in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 16, pp. 4585-4599. 2017. DOI: 10.1109/TWC.2017.2700379.

[28]. G. Chopra, R. K. Jha and S. Jain, “A survey on ultra-dense network and emerging technologies: Security challenges and possible solutions,” Journal of Network and Computer Applications, vol. 95, pp. 54-78. 2017. DOI: 10.1016/j.jnca.2017.07.007

. [5]S. Zhao, J. Liu, Y. Shen, X. Jiang and N. Shiratori, “Secure Beamforming for Full-Duplex MIMO Two-Way Untrusted Relay Systems,” in IEEE Transactions on Information Forensics and Security, vol. 15, pp. 3775-3790, 2020. DOI: 10.1109/TIFS.2020.3001733.

[6]H. Guo, Z. Yang, L. Zhang, J. Zhu and Y. Zou, “Joint Cooperative Beamforming and Jamming for Physical-Layer Security of Decode-and-Forward Relay Networks,” in IEEE Access, vol. 5, pp. 19620-19630, 2017. DOI:

[7] A. Salem and K. A. Hamdi, “Improving Physical Layer Security of AF Relay Networks via Beam-Forming and Jamming,” IEEE 84t7h Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 2016.

[8] L. Yang, J. Chen, H. Jiang, S. A. Vorobyov and H. Zhang, “Optimal Relay Selection for Secure Cooperative Communications With an Adaptive Eavesdropper,” in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 16, pp. 26-42, 2017. DOI: 10.1109/TWC.2016.2617328.

[9] M. Chen and Y. Chen, “Eavesdropping Interference in Wireless Communication Networks Based on Physical Layer Security,” International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), vol. 15, 2024. DOI: 10.14569/IJACSA.2024.0150939.

[10.] M. Tatar Mamaghani, A. Kuhestani and K. -K. Wong, “Secure Two-Way Transmission via Wireless-Powered Untrusted Relay and External Jammer,” in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, pp. 8451-8465, 2018. DOI: 10.1109/TVT.2018.2848648.

. [11] M. Fatehi, S. A. Mohajeran and J. Jahanshiri, “The Study and Analysis of Hardware Impairments Effects with Multiple Eavesdroppers in Internet of Things Network,” Journal of Electronic and Cyber Defense, vol. 10, No.3,pp. 119-126, 2022. (in Persian).DOR:https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1401.10.3.11.9

[12.] H. Saedi, A. Mohammadi and A. Kuhestani, “Secure Communication with a Multiple-Antennas Untrusted Relay in Presence of Randomly Distributed Adversary Jammers,” Physical Communication, vol. 66, pp. 102463, 2024. DOI: 10.1016/j.phycom.2024.102463.

[13.] A. H. Gazestani, S. A. Ghorashi, B. Mousavinasab, and M. Shikh-Bahaei, “A Survey on Implementation and Applications of Full Duplex Wireless Communications,” Physical Communication, vol. 34, pp. 121-134, 2019. DOI: 10.1016/j.phycom.2019.03.006.

[14. ]T. -X. Zheng, H. -M. Wang, Q. Yang and M. H. Lee, “Safeguarding Decentralized Wireless Networks Using Full-Duplex Jamming Receivers,” in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 16, pp. 278-292, 2017. DOI: 10.1109/TWC.2016.2622689.

[15.] A. Sinouvassane and G. Nagarajan, “Performance Of Full-Duplex One-Way And Two-Way Cooperative Relaying Networks,” Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJEECS), vol. 9, pp. 526-538, 2024. DOI: 10.11591/ijeecs.v9.i2.pp526-538.

[16.] K. Pärlin, T. Riihonen, V. Le Nir and M. Adrat, “Physical-Layer Reliability of Drones and Their Counter-Measures: Full Versus Half Duplex,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 23, pp. 1535-1549, 2024. DOI: 10.1109/TWC.2023.3290257.