



Improving Security in Power Line Communication Networks Using OFDMA Technique in the Presence of Multiple Users and Eavesdroppers

Moslem Forouzes¹, Reza Aghaei² and Arshia Rangamiz³

1. Corresponding author, Assistant Prof, Electrical Engineering Department, Faculty of Modern Technologies Engineering, Amol University of Special Modern Technologies, Amol, Iran Email: m.forouzes@ausmt.ac.ir
2. MSc. Student of Telecommunication Network Engineering, Faculty of Modern Technologies Engineering, Amol University of Special Modern Technologies, Amol, Iran Email: Aghaeirezash@ausmt.ac.ir
3. MSc. Student of Telecommunication Network Engineering, Faculty of Modern Technologies Engineering, Amol University of Special Modern Technologies, Amol, Iran Email: arshia.rang@ausmt.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	In the present era, given the rapid growth of communication technologies and the need for smart networks, novel techniques such as Power Line Communication (PLC) and Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) have been introduced as effective solutions for improving data transmission security and reducing infrastructure costs. This paper examines communication systems based on power lines using Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) techniques, which play a crucial role in network management, with the aim of enhancing data transmission security and minimizing interference effects. To evaluate the proposed system model, an optimization problem is formulated and analyzed using mathematical optimization models and the NOMAD and CVX tools in MATLAB. The analysis focuses on key performance parameters, including the number of subcarriers and users, distance, data rate constraints, total power, and noise. Therefore, to analyze the proposed system model, comprehensively, we investigate the minimum required secrecy rate for users in the presence of eavesdroppers. The optimization results demonstrate a significant improvement in the performance of PLC-based communication systems and an increase in data transmission rates. This research contributes to a better understanding of the challenges and security solutions in such networks, emphasizing the importance of resource optimization in multi-user networks.
Article history: Received 28 October 2024 Received in revised form 16 March 2025 Accepted 4 August 2025 Published online 21 August 2025	
Keywords: Power line communication, Orthogonal frequency division multiple access, Security, Optimization, Secrecy rate, Eavesdropper.	

Cite this article: Forouzes, M. & et al, (2025), Improving Security in Power Line Communication Networks Using OFDMA Technique in the Presence of Multiple Users and Eavesdroppers. *Engineering Management and Soft Computing*, 11 (1). 115-133. DOI: <https://doi.org/10.22091/jemsc.2025.11503.1212>



© The Author(s)
DOI: 10.22091/jemsc.2025.11503.1212

Publisher: University of Qom

1) INTRODUCTION

With the rapid growth of communication technologies and the increasing demand for smart networks, technologies such as PLC¹ and OFDM² have emerged as efficient solutions for enhancing data transmission and reducing infrastructure costs. PLC has been widely adopted in residential and industrial applications due to its ability to utilize existing power infrastructure without requiring additional wiring. However, issues related to noise and frequency interference remain significant challenges in these networks. The integration of PLC with OFDM has led to improved spectral efficiency and reduced noise impact in data transmission over power lines [1]-[3]. PLC is a technology that utilizes existing electrical wiring for data transmission. Essentially, just as power lines are used to deliver electrical energy to homes and industries, the same wires can also be employed for transmitting digital information. This is achieved by superimposing high-frequency signals onto the primary power current, allowing data to be transmitted electronically over the power grid. Consequently, PLC serves as a cost-effective solution for establishing communication in smart grids and monitoring systems, as it eliminates the need for new cabling. This technology is applied in home automation, energy system control, and power network monitoring. Additionally, with the rapid advancement of telecommunications technologies and the growing demand for secure and efficient wireless networks, OFDMA³ has emerged as one of the primary methods for optimizing bandwidth and resource allocation. These systems, by providing high flexibility in resource management and interference mitigation, alongside ensuring QoS⁴, play a crucial role in enhancing the security of wireless networks [4]-[6].

In this paper, we examine and optimize power allocation and subcarrier assignment in OFDMA techniques for PLC systems. Our primary objective is to enhance data transmission Security and reduce the impact of interference in PLC-based communication systems. In this regard, and given the importance of security in such networks, the physical layer security is examined as a solution for securing communications in this context. For the analysis and evaluation of the proposed network, we formulate an optimization problem aimed at maximizing the aggregate data transmission rate, utilizing mathematical optimization models. We then examine the results of these optimizations. In this research, we employ two tools, NOMAD and CVX in MATLAB, to conduct the optimizations. In this model, constraints include power limitations, QoS requirements, and user security guarantees, while the objective function is to optimize the total data transmission rate. Through these methods, we have achieved an optimal allocation for subcarriers that enhances the overall system efficiency. Furthermore, we analyse the effects of various parameters, such as the number of subcarriers, the number of users per subcarrier, distance, and noise levels, on system performance. The results of these analyses indicate a significant improvement in system performance.

2) Solution Method

The research methodology in this study consists of three main stages: the proposed system model, the optimization problem formulation and its solution, and the assurance of user security.

3) Equations

The Signal-to-Noise Ratio (SNR) for user m on subcarrier n , denoted as $SNR_{n,m}$, is given by:

$$SNR_{n,m} = \frac{\rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,m}|^2}{\sigma^2} \quad (1)$$

where the data rate for user m on subcarrier n can be calculated using the following formula:

$$R_{n,m} = \log_2(1 + SNR_{n,m}) \quad (2)$$

¹ Power Line Communication

² Orthogonal Frequency Division Multiplexing

³ Orthogonal Frequency Division Multiple Access

⁴ Quality of Service

Here, $\rho_{n,m}$ represents the allocation parameter for subcarrier n to user m , and $P_{n,m}$ denotes the power allocated to user m on subcarrier n . $h_{n,m}$ indicates the channel gain between the transmitter and user m on subcarrier n , while σ^2 represents the noise variance, which accounts for thermal noise and other interferences.

To evaluate the proposed system model, the following optimization problem is formulated:

$$\max_{\rho, P} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \log_2 \left(1 + \frac{\rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,m}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (3)$$

subject to:

$$C_1: \sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{\rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,m}|^2}{\sigma^2} \right) \geq R_m \quad \forall m \quad (4)$$

$$C_2: \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \rho_{n,m} P_{n,m} \leq P_{total} \quad (5)$$

$$C_3: P_{n,m} \geq 0 \quad \forall n, m \quad (6)$$

$$C_4: \sum_{m=1}^M \rho_{n,m} \leq 1 \quad \forall n \quad (7)$$

$$C_5: \log_2 \left(1 + \frac{\rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,m}|^2}{\sigma^2} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{\rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,e}|^2}{\sigma^2} \right) \geq R_{min}^{sec} \quad \forall n, m \quad (8)$$

The objective of the above problem is to maximize the total data rate, subject to the following constraints. C_1 ensures that the data rate requirement R_m is met for each user m . Constraint C_2 specifies the total power limit, while C_3 enforces the non-negativity of power allocation. Constraint C_4 limits the number of users assigned to each subcarrier, and C_5 guarantees communication security by maintaining a minimum secure data rate, denoted as R_{min}^{sec} , for each user.

4) Conclusion

The simulations in this paper revealed that variations in the number of subcarriers have a direct correlation with the total received data rate, whereas changes in noise power and the distance to the transmitter have an inverse impact on the data rate. Additionally, the requirement for security in these systems was addressed. By reducing the transmitter power to prevent eavesdropping, the data rate decreases to an acceptable level, demonstrating a balance between security and performance in the design of communication systems.

5) Figures

According to the simulation results shown in Figure 1, where the noise power is 0.001 W, the number of users is 2, the number of subcarriers is 4, and the receiver's distance from the transmitter is randomly set. This random variable with a minimum value of 1, we investigate the impact of distance on sum rate. As the distance increases, the total data rate delivered to the user decreases because the transmitted power decays over the path, leading to a drop in the received data rate. For comparison, we consider a total power of 10 W. The data rate delivered to two users within a 20-meter range is approximately 24.54 bps/Hz. For users within a 60-meter range, the rate is about 16.1 bps/Hz, showing a 34.39% reduction in data transmission compared to the curve for distances between 1-20 meters. For users up to 100 meters away, the data rate is 11.3 bps/Hz, indicating a 29.81% drop compared to the curve for 1-60 meters and a 53.95% reduction relative to the 1-20-meter range. Furthermore, an increase in total power

improves the received data rate. However, at higher power levels, we observe a diminishing slope in the total received data rate due to saturation in the data rate of users in optimal reception conditions.

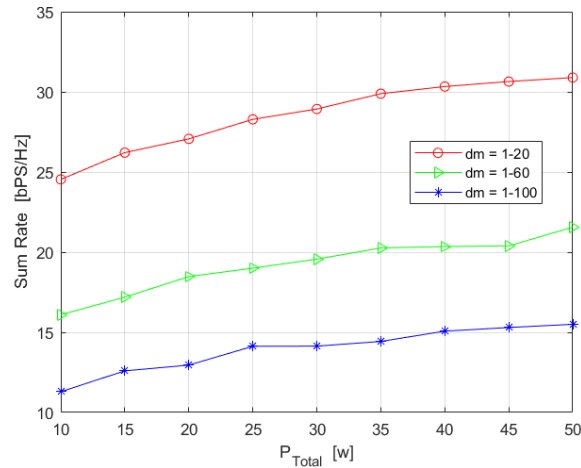


Figure 2: Total rate versus maximum total power and evaluation of transmitter-receiver distance.

ACKNOWLEDGEMENTS

REFERENCES

- F.Khan, S.Baig, U.Noreen, & A.Yousaf, (2012). An overview of OFDM based narrowband and power line communication standards for smart grid applications. *World Applied Sciences Journal*, 20(9), 1236-1242. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2012.20.09.2757
- J. H.Fernandez, A.Omri, & R.Di Pietro, (2022). Channel Impulse Response Multilevel Quantization for Power Line Communications. *IEEE Access*, 10, 66113-66126. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3184038
- P.Agarwal, & M. K.Shukla, (2022). MITA interleaver for OFDM-IDMA and SCFDMA-IDMA techniques using QPSK modulation over PLC. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 11(3), 1418-1427. DOI: 10.11591/eei.v11i3.3598
- K.Jiravanstitt, & W.Santipach, (2020). Energy-minimizing bit allocation for powerline OFDM with multiple delay constraints. *Physical Communication*, 39, 101015. DOI: 10.1016/j.phycom.2020.101015
- S.Karachontzitis, S.Timotheou, I.Krikidis, & K.Berberidis, (2014). Security-aware max-min resource allocation in multiuser OFDMA downlink. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 10(3), 529-542. DOI: 10.1109/TIFS.2014.2384392
- M.Jeong, S. W.Choi, & J.Kim, (2023). On the design of an OFDMA-based software-defined modem: A CFO estimation perspective. *ICT Express*. DOI: 10.1016/j.icte.2023.10.003.

بهبود امنیت در شبکه‌های ارتباطی خطوط انتقال قدرت با استفاده از تکنیک دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی متعامد در حضور چند کاربر و شنودگر

مسلم فروزش^۱، رضا آقایی^۲ و عرشیا رنگ‌آمیز^۳

۱. نویسنده مسئول، استادیار دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه تخصصی فناوری‌های نوین آمل، آمل، ایران. رایانامه: m.frouzesh@ausmt.ac.ir

۲. کارشناسی ارشد شبکه‌های مخابراتی، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه تخصصی فناوری‌های نوین آمل، آمل، ایران. رایانامه:

Aghaeirezash@ausmt.ac.ir

۳. کارشناسی ارشد شبکه‌های مخابراتی، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه تخصصی فناوری‌های نوین آمل، آمل، ایران. رایانامه: arshia.rang@ausmt.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
در عصر حاضر، با توجه به رشد سریع فناوری‌های ارتباطی و نیاز به شبکه‌های هوشمند، تکنیک‌های نوینی مانند ارتباط از طریق خطوط برق و تقسیم فرکانسی متعامد به‌عنوان راهکارهای موثر جهت بهبود امنیت انتقال داده‌ها و کاهش هزینه‌های زیرساختی معرفی شده‌اند. این مقاله به بررسی سیستم‌های ارتباطی مبتنی بر خطوط برق با استفاده از تکنیک‌های دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی متعامد پرداخته‌است که نقش حیاتی در مدیریت شبکه دارند. هدف آن افزایش امنیت انتقال داده‌ها و کاهش تأثیرات تداخل است. به‌منظور ارزیابی مدل، سیستم پیشنهادی یک مسئله بهینه‌ساز پیشنهاد داده و با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی و ابزارهای NOMAD و CVX در نرم‌افزار متلب، به تحلیل و ارزیابی پارامترهای موثر بر عملکرد سیستم از جمله تعداد زیرحامل‌ها و کاربران، فاصله، محدودیت‌های نرخ داده، توان کل و نویز پرداخته شده‌است. همچنین برای بررسی جامع سیستم پیشنهادی، حداقل نرخ امن موردنیاز کاربران را در حضور شنودگر مورد بررسی قرار می‌دهیم. نتایج حاصل از بهینه‌سازی، نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در عملکرد سیستم‌های ارتباطی مبتنی بر خطوط برق و افزایش نرخ انتقال داده‌هاست. این پژوهش به درک بهتر چالش‌ها و راهکارهای نرخ امن در این شبکه‌ها کمک کرده و بر اهمیت بهینه‌سازی منابع در شبکه‌های چندکاربره تأکید می‌کند.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰ کلیدواژه‌ها: ارتباط از طریق خطوط برق، امنیت، بهینه‌سازی، دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی متعامد، شنودگر، نرخ امن

استناد: فروزش، مسلم و همکاران. (۱۴۰۴). «بهبود امنیت در شبکه‌های ارتباطی خطوط انتقال قدرت با استفاده از تکنیک دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی

متعامد در حضور چند کاربر و شنودگر». مدیریت مهندسی و رایانش نرم، دوره ۱۱ (۱). صص: ۱۱۵-۱۳۳.

<https://doi.org/10.22091/jemsc.2025.11503.1212>



© نویسنده گان.

ناشر: دانشگاه قم

(۱) مقدمه

با رشد سریع فناوری‌های ارتباطی و نیاز به شبکه‌های هوشمند^۱، فناوری‌هایی مانند ارتباط از طریق خطوط برق^۲ و تقسیم فرکانسی متعامد^۳ به عنوان راه حل‌های کارآمد جهت بهبود انتقال داده و کاهش هزینه‌های زیرساختی مطرح شده‌اند. ارتباط از طریق خطوط برق به دلیل استفاده از زیرساخت‌های موجود برق بدون نیاز به سیم کشی جدید، بطور گسترده در کاربردهای خانگی و صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، مسئله نویزها و تداخلات فرکانسی در این شبکه‌ها همچنان به عنوان چالشی عمده باقی مانده است. ترکیب این فناوری با تقسیم فرکانسی متعامد منجر به بهبود کارایی طیفی و کاهش تاثیر نویز در انتقال داده‌ها از طریق خطوط برق شده است [۱]–[۳]. ارتباط از طریق خطوط برق یک فناوری می‌باشد که از سیم‌های برق موجود برای انتقال داده‌ها استفاده می‌کند. در واقع همانطور که خطوط برق برای انتقال انرژی الکتریکی به خانه‌ها و صنایع بکار می‌روند، می‌توان از همان سیم‌ها برای ارسال اطلاعات دیجیتال نیز بهره برد. این کار با افزودن سیگنال‌های فرکانس بالاتر بر روی جریان اصلی انجام می‌شود. به گونه‌ای که داده‌ها به صورت الکترونیکی بر روی شبکه برق منتقل می‌شوند. به همین دلیل، ارتباط از طریق خطوط برق به عنوان یک راه حل اقتصادی برای برقراری ارتباط در شبکه‌های هوشمند و سیستم‌های نظارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد چرا که نیازی به کشیدن کابل‌های جدید نیست. این فناوری در کاربردهایی مانند اتوماسیون خانگی، کنترل سیستم‌های انرژی و پایش شبکه‌های برق بکار می‌رود. همچنین با توجه به پیشرفت سریع فناوری‌های مخابراتی و نیاز روزافزون به شبکه‌های بی سیم امن و کارآمد، تکنیک‌های دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی متعامد^۴ به عنوان یکی از اصلی‌ترین روش‌های بهینه‌سازی پهنای باند و تخصیص منابع مطرح شده‌اند. این سیستم‌ها با ارائه انعطاف پذیری بالا در تخصیص منابع و مدیریت تداخل، در کنار افزایش تضمین کیفیت خدمات یا سرویس^۵، در بهبود امنیت شبکه‌های بی سیم نقش کلیدی ایفا می‌کنند [۴]–[۶]. یکی از چالش‌های اصلی این نوع شبکه‌ها ایجاد امنیت در آنهاست که امنیت لایه فیزیکی^۶ به عنوان یک رویکرد نوین در این زمینه مورد توجه قرار گرفته است. مقاله [۷] روش‌های جدید از جمله استفاده از صورت فلکی سه بعدی^۷ برای مخفی سازی اطلاعات و راه حل‌هایی موثر برای مقابله با حملات و شنودگران مخرب ارائه کرده است. همچنین استفاده از تکنیک‌های رمزنگاری آشوب^۸ و مدولاسیون دامنه تریبی^۹ برای افزایش امنیت در شبکه‌های نوری غیرفعال^{۱۰} و سیستم‌های دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی عمودبرهم بسیار موثر بوده است [۸]، [۹]. از دیگر چالش‌های مرتبط با این سیستم‌ها، مسئله بهینه‌سازی منابع در شبکه‌های چندکاربره است. بکارگیری الگوریتم‌های زمان بندی لایه‌ای و تخصیص منعطف منابع در شبکه‌های رادیویی شناختی^{۱۱} و شبکه‌های دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی عمودبرهم منجر به کاهش تاخیر و بهبود امنیت می‌شود [۱۰]. در این راستا،

¹ Smart Grids

² Power Line Communication

³ Orthogonal Frequency-Division Multiple

⁴ Orthogonal Frequency-Division Multiple Access

⁵ Quality Of Service

⁶ Physical Layer Security

⁷ 3D Constellation

⁸ Chaos encryption

⁹ Quadrature Amplitude Modulation

¹⁰ Passive Optical Network

¹¹ Cognitive Radio Networks

یادگیری فدرال^{۱۲} نیز به عنوان یک روش نوین برای بهبود کارایی و کاهش بار محاسباتی در سیستم‌های دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی عمودبرهم معرفی شده است که به کاهش ازدحام و افزایش دقت مدل‌های یادگیری کمک می‌کند [۱۱]. علاوه بر این، استفاده از سطوح بازتابی هوشمند^{۱۳} در شبکه‌های دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی عمودبرهم به منظور بهبود بازدهی طیفی و کاهش هزینه‌های انرژی مورد توجه قرار گرفته است. این تکنولوژی با بهینه‌سازی بازتاب سیگنال‌ها، به بهبود ارتباطات در شبکه‌های چند کاربره کمک کرده و بهره‌وری انرژی را افزایش می‌دهد [۶]، [۱۲].

فناوری مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد یکی از روش‌های نوین در مدیریت منابع فرکانسی و دسترسی چند کاربره است که به طور گسترده در شبکه‌های Wi-Fi6 و شبکه‌های محاسبات لبه موبایل^{۱۴} استفاده می‌شود. این فناوری باعث افزایش نرخ انتقال داده و کاهش تاخیر شده و به ویژه در محیط‌های با تراکم بالا مانند استادیوم‌ها و فرودگاه‌ها، عملکرد شبکه را بهبود بخشیده است. استفاده از دسترسی چندگانه با قابلیت شنود سیگنال حامل^{۱۵} در ترکیب با دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی عمودبرهم، امکان بهبود دسترسی همزمان چند کاربره را فراهم می‌آورد. بطوریکه با کنترل هوشمندانه دسترسی کاربران به کانال‌های ارتباطی، نرخ تداخل و برخورد سیگنال‌ها به حداقل می‌رسد [۱۳]–[۱۵]. یکی از دیگر چالش‌های اساسی در شبکه‌های ارتباط از طریق خطوط برق و Wi-Fi 6، مسئله امنیت و جلوگیری از حملات سایبری است. استفاده از رمزنگاری لایه فیزیکی در این شبکه‌ها به عنوان راهکاری موثر برای محافظت از داده‌های حساس پیشنهاد شده است. این روش با بهره‌گیری از اطلاعات حالت کانال و بهینه‌سازی مصرف انرژی، امنیت بیشتری را در انتقال داده‌ها فراهم می‌کند. همچنین استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند کنترل تاخیر بازگشتی در دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی متعامد^{۱۶} و تکنیک‌های بهبود یافته مدولاسیون، باعث افزایش نرخ موفقیت در انتقال داده‌ها و کاهش مصرف انرژی شده است [۱]، [۴]، [۱۶]. تحقیقات در زمینه رمزنگاری مبتنی بر نقطه عبور^{۱۷} نیز به عنوان رویکردی نوین برای ایجاد امنیت در شبکه‌های ارتباط از طریق خطوط برق مطرح شده است. با استفاده از روش‌های زمان‌بندی مقصد^{۱۸} و توزیع ایمن کانال‌ها^{۱۹}، امکان مقابله با حملات سایبری در این شبکه‌ها فراهم می‌شود [۱۷]. همچنین استفاده از روش‌های فشرده‌سازی تصاویر و داده‌های چند رسانه‌ای در سیستم‌های دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی عمودبرهم به عنوان راهکاری کارآمد برای بهینه‌سازی پهنای باند و کاهش مصرف انرژی مورد توجه قرار گرفته است. تحقیقات نشان داده‌اند که ترکیب تکنیک‌های مدولاسیون با روش‌های فشرده‌سازی تصویر نظیر فشرده‌سازی مبتنی بر تقسیم مجموعه‌ها در درخت‌های سلسله‌مراتبی^{۲۰} و دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی متعامد مبتنی بر تبدیل سینوسی گسسته^{۲۱} به ویژه در محیط‌های با نویز بالا، می‌تواند عملکرد سیستم‌های ارتباطی را بهبود بخشد. این ترکیب باعث کاهش نسبت سیگنال به نویز مورد نیاز برای بازیابی داده‌ها شده و در نتیجه کارایی سیستم افزایش یافته است [۱۳]، [۱۵]، [۱۸]. روش‌های نوین مانند تقسیم نرخ چندحاملی^{۲۲} که به عنوان

¹² Federated Learning

¹³ Intelligent Reflecting Surfaces

¹⁴ Mobile Edge Compute

¹⁵ Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance

¹⁶ OFDMA Back-Off Control

¹⁷ pinhole

¹⁸ Destination Scheduling

¹⁹ Secure Channel Distribution

²⁰ Set Partitioning in Hierarchical Trees

²¹ Discrete Sine Transform OFDMA

²² Rate-Splitting Multiple Access

جایگزینی برای دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی عمودبرهم مطرح شده‌اند، با مدیریت تداخل و بهبود کارایی طیفی، قابلیت رقابت با سایر تکنیک‌های چندکاربره مانند دسترسی چندگانه غیر متعامد^{۲۳} را دارند[۱۹]. استفاده از پهپادهای مجهز به فناوری‌های دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی عمودبرهم^{۲۴} و امواج میلی‌متری^{۲۵} با هدف بهبود پوشش شبکه و تضمین کیفیت خدمات برای کاربران مختلف، نشان‌دهنده پتانسیل بالای این تکنولوژی‌ها در پاسخ به نیازهای روزافزون ارتباطات است. این تکنیک‌ها با بهینه‌سازی تخصیص زیرحامل‌ها و توان، منجر به افزایش ظرفیت شبکه و بهبود کیفیت ارتباطات در مناطق دورافتاده می‌شوند [۱۲]، [۲۰]. در سیستم‌های اتوماسیون خانگی، ارتباطات مبتنی بر خطوط قدرت می‌توانند برای کنترل و نظارت بر تجهیزات خانگی مانند روشنایی، سیستم‌های امنیتی و دستگاه‌های الکتریکی مورد استفاده قرار گیرند[۲۱]. همچنین در محیط‌های صنعتی، ارتباطات مبتنی بر خطوط قدرت می‌توانند برای ارتباطات بین ماشین‌ها و سیستم‌های کنترل استفاده شوند. این ارتباطات برای اتوماسیون و نظارت بر فرآیندهای تولیدی ضروری هستند[۲۲]. اگرچه ارتباطات مبتنی بر خطوط قدرت پهن باند، قادر به ارائه پهنای باند بالاست اما در مقایسه با تکنولوژی‌های فیبر نوری^{۲۶} محدودیت‌هایی دارد. از آنجاییکه ارتباطات مبتنی بر خطوط قدرت از شبکه برق برای انتقال داده‌ها استفاده می‌کند، مسائل امنیتی از جمله تداخل داده‌ها و دسترسی غیرمجاز به اطلاعات مطرح می‌شود. راه‌حل‌های امنیتی مختلفی برای حفاظت از داده‌ها در شبکه‌های ارتباطی مبتنی بر خطوط قدرت مورد بررسی قرار گرفته‌اند[۲۳]. فناوری‌های دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی عمودبرهم و ارتباط از طریق خطوط برق، به همراه بهینه‌سازی منابع و افزایش نرخ بهره‌وری انرژی، نقش مهمی در بهبود ارتباطات چندکاربره و کاهش تداخلات دارند. استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی توان و تخصیص کانال‌ها در این سیستم‌ها باعث افزایش کارایی و کاهش مصرف انرژی شده‌است[۲۴]. در نهایت پیشرفت‌های اخیر در حوزه مخابرات بی‌سیم نشان داده‌است که ترکیب این فناوری‌ها با یکدیگر می‌تواند باعث ایجاد شبکه‌هایی با کارایی بالا و امنیت بیشتر شود. تکنیک‌هایی مانند دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی عمودبرهم، ارتباط از طریق خطوط برق و مکانیسم‌های مدیریت کانال‌های چندکاربره به شبکه‌های هوشمند اجازه می‌دهند که نه تنها انتقال داده‌ها را با سرعت بالا امکان‌پذیر کنند بلکه از امنیت و پایداری بیشتری در محیط‌های پیچیده برخوردار شوند[۳]، [۱۴]، [۱۸].

در این مقاله، ما به بررسی و بهینه‌سازی تخصیص توان و زیرحامل‌ها در تکنیک دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی متعامد برای سیستم‌های ارتباطات مبتنی بر خطوط قدرت پرداخته‌ایم. هدف اصلی ما افزایش امنیت انتقال داده‌ها و کاهش تاثیر تداخلات در سیستم‌های ارتباطات مبتنی بر خطوط قدرت است. در همین راستا و با توجه به اهمیت امنیت در این نوع از شبکه‌ها به بررسی امنیت لایه فیزیکی به عنوان یک راهکار در امن کردن ارتباطات در این بستر پرداخته می‌شود. برای بررسی و تحلیل شبکه پیشنهادی، یک مسئله بهینه‌سازی با هدف افزایش مجموع نرخ انتقال داده و مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی استفاده می‌کنیم و نتایج حاصل از این بهینه‌سازی‌ها را مورد بررسی قرار داده‌ایم. در این پژوهش، از دو ابزار NOMAD و CVX در نرم‌افزار متلب برای انجام بهینه‌سازی‌ها استفاده شده‌است. در این مدل، قیود شامل محدودیت‌های توان و کیفیت سرویس و همچنین تضمین امنیت کاربران می‌باشد و تابع هدف بهینه‌سازی مجموع نرخ انتقال داده‌هاست. با

²³ Non-Orthogonal Multiple Access

²⁴ Ofdma-Unmanned Aerial Vehicle

²⁵ mmWave

²⁶ Optical Fiber

استفاده از این روش‌ها، توانسته‌ایم تخصیص بهینه‌ای برای زیرحامل‌ها پیدا کنیم که کارایی کلی سیستم را بهبود می‌بخشد. همچنین تاثیر پارامترهای مختلف مانند تعداد زیرحامل‌ها و تعداد کاربران در هر زیرحامل، میزان فاصله و میزان نویز بر کارایی سیستم مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان‌دهنده بهبود قابل توجهی در عملکرد سیستم است.

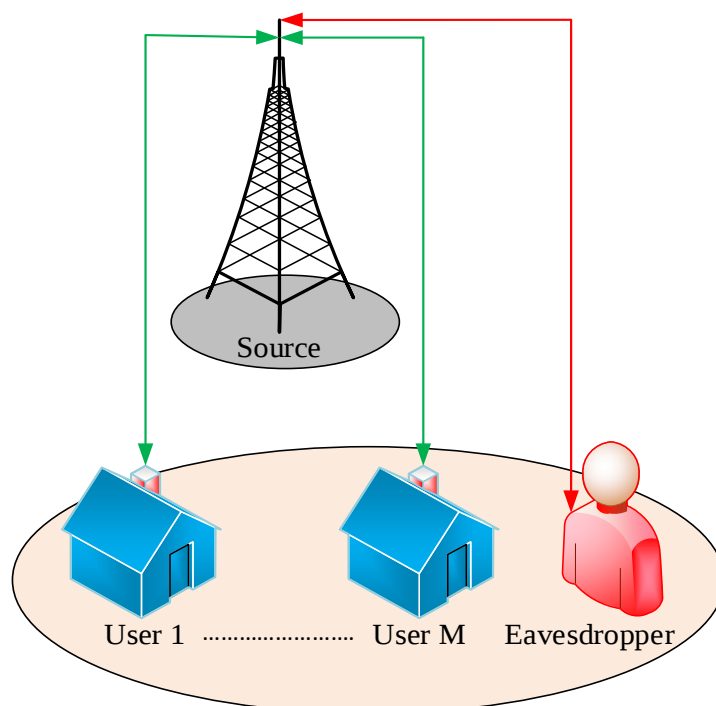
۲) روش تحقیق

اصول روش تحقیق در این پژوهش شامل سه مرحله: سیستم مدل پیشنهادی، مسئله بهینه‌سازی و حل آن و تضمین امنیت کاربران می‌شود که در ادامه به بررسی این سه روش می‌پردازیم.

۲-۱) الف) سیستم مدل پیشنهادی

مدل سیستم پیشنهادی شامل N زیرحامل (کانال فرکانسی) و M کاربر است، که اطلاعات از یک فرستنده به چند گیرنده ارسال می‌شود، همچنین یک شنودگر غیر مجاز در سیستم قصد دسترسی به اطلاعات ارسال شده را دارد، این مدل پیشنهادی در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است. در ارتباطات مبتنی بر خطوط قدرت، شنودگر به هر دستگاه یا موجودیتی اطلاق می‌شود که سعی در نظارت بر سیگنال‌های ارتباطی و یا شنود اطلاعاتی که از طریق خطوط برق بین دستگاه‌های مشروع (مانند کنتورهای هوشمند، دستگاه‌های خانگی و دروازه‌های ارتباطی) منتقل می‌شود، دارد. هدف از بررسی حضور شنودگر در سیستم‌های مورد نظر، ارزیابی تهدیدات امنیتی ناشی از استراق سمع به منظور افزایش امنیت اطلاعات در بسترهای مخابراتی است. در سیستم‌های ارتباطات مبتنی بر خطوط قدرت، شنودگر می‌تواند با قطع سیگنال‌های اطلاعاتی، نقض حریم خصوصی، دستکاری داده‌ها یا دسترسی غیرمجاز به اطلاعات حساس، امنیت سیستم را به خطر بیندازد. تحلیل حضور شنودگر به ما کمک می‌کند تا تاثیر این حملات را بر عملکرد سیستم بررسی کرده و راهکارهایی مانند رمزنگاری، احراز هویت، تغییر فرکانس، کاهش تابش سیگنال و استفاده از سیستم‌های تشخیص نفوذ را برای کاهش این تهدیدات توسعه دهیم. برای اینکه بتوانیم به همه کاربران سرویس بدهیم باید برای ارسال اطلاعات از روش دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی متعامد استفاده کنیم، که در آن در هر زیرحامل فقط به یک کاربر بصورت همزمان سرویس داده می‌شود. در این بین کاربرانی وجود خواهند داشت که ممکن است نرخ داده موردنیازشان متفاوت باشد و بسته به نرخ موردنیازشان ممکن است چند زیرحامل به یک کاربر تخصیص داده شود. قرار است با در نظر گرفتن محدودیت توان ارسالی و امنیت لایه فیزیکی، کیفیت سیستم و امنیت را برای هر کاربر تضمین کنیم و سعی داریم با مدل ریاضی پیشنهادی با هدف بیشینه کردن مجموع نرخ اطلاعات دریافتی در کاربران آن را بهینه کنیم. هر کاربر بطور همزمان از یک یا چند کانال فرکانسی استفاده می‌کند. برای هر کاربر، میزان تخصیص توان و زیرحامل‌ها باید به گونه‌ای بهینه‌سازی شود که کارایی کلی سیستم افزایش یابد و تداخل‌های بین کاربران کاهش یابد. در سیستم دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی متعامد، هر کاربر می‌تواند از طریق زیرحامل‌های مختلف اطلاعات دریافت کند. سیگنال دریافتی در کاربر m در زیر حامل n ام به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$y_{n,m} = \rho_{n,m} \sqrt{P_{n,m}} h_{n,m} x_{n,m} + z_{n,m} \quad (۱)$$



شکل ۱. سیستم مدل پیشنهادی

که $\rho_{n,m}$ پارامتر تخصیص زیر حامل n به کاربر m است و $P_{n,m}$ نشان دهنده توان تخصیص یافته به کاربر m در زیر حامل n می باشد. $x_{n,m}$ بیانگر سیگنال ارسالی و $z_{n,m}$ بیانگر نویز گوسی با میانگین صفر و واریانس σ^2 است. ضریب کانال بین فرستنده و کاربر m در زیر حامل n نیز با $h_{n,m}$ نشان داده شده است که به صورت زیر فرمول بندی خواهد شد:

$$h_{n,m} = \alpha \tilde{h}_{n,m} \quad (۲)$$

$\tilde{h}_{n,m}$ قسمت تصادفی کانال کاربر m در زیر حامل n بوده که مشخصات کانال را نشان می دهد و معمولاً به عنوان توزیع لگاریتم نرمال مدل سازی می شود. این متغیر بیانگر تغییرات کیفیت کانال به دلیل عوامل محیطی است. α یک ضریب تضعیف است که بیانگر کاهش سیگنال در کانال است و به صورت زیر فرمول بندی می شود:

$$\alpha = e^{-(b_0 + b_1 f^k) d_m} \quad (۳)$$

در اینجا b_0 و b_1 ثابت های تضعیف به شمار می آیند که از داده های تجربی به دست می آیند و به خصوصیات فیزیکی خط برق (مثل امپدانس و کیفیت سیم کشی) بستگی دارد. همچنین f فرکانس سیگنال ارسالی است که بر حسب مگاهرتز اندازه گیری می شود. k یک ثابت نمایی است (معمولاً از اندازه گیری های تجربی به دست می آید) که نشان می دهد فرکانس چگونه بر تضعیف اثر می گذارد. d_m فاصله بین فرستنده و کاربر است که نشان می دهد سیگنال باید چه مسافتی را طی

کند. همچنین باید توجه داشت که با افزایش فاصله، تضعیف بیشتر می‌شود. نرخ داده‌ها برای کاربر m در زیر حامل n با استفاده از فرمول ظرفیت کانال محاسبه می‌شود:

$$R_{n,m} = \log_2(1 + SNR_{n,m}) \quad (۴)$$

$$SNR_{n,m} = \frac{\rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,m}|^2}{\sigma^2} \quad (۵)$$

نسبت سیگنال به نویز برای کاربر m در زیر حامل n را $SNR_{n,m}$ گویند. ضریب کانال $h_{n,m}$ می‌تواند شامل اثرات محوشدگی ۲۷ و آفت مسیر ۲۸ باشد و ممکن است با استفاده از مدل‌های کانال خاص مانند محوشدگی رایلی یا نرمال لگاریتمی مدل شود. واریانس نویز σ^2 می‌تواند نشان‌دهنده توان نویز حرارتی و سایر تداخلات باشد.

۲-۲) مسئله بهینه‌سازی و حل آن

برای ارزیابی مدل سیستم پیشنهادی در حضور چند کاربر، مسئله بهینه‌سازی زیر را با هدف بیشینه کردن مجموع نرخ انتقال داده‌ها پیشنهاد می‌دهیم:

$$\max_{\rho, P} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \log_2 \left(1 + \frac{\rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,m}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (۶)$$

$$C_1: \sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{\rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,m}|^2}{\sigma^2} \right) \geq R_m \quad \forall m \quad (۷)$$

$$C_2: \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \rho_{n,m} P_{n,m} \leq P_{total} \quad (۸)$$

$$C_3: P_{n,m} \geq 0 \quad \forall n, \quad (۹)$$

$$C_4: \sum_{m=1}^M \rho_{n,m} \leq 1 \quad \forall n \quad (۱۰)$$

C_1 حداقل نرخ داده را برای هر کاربر به میزان R_m تضمین می‌کند. C_2 نشان‌دهنده محدودیت توان کل می‌باشد. همچنین C_3 غیرمنفی بودن توان تخصیص یافته را تضمین می‌کند و C_4 محدودیت تخصیص تعداد کاربران در هر زیر حامل را نشان می‌دهد. مسئله فوق نامحدوب است بنابراین از الگوریتم ASM29 بهره می‌بریم. این الگوریتم مسئله را به دو زیرمسئله تقسیم می‌کند. یک زیرمسئله برای یافتن P و زیرمسئله دیگر برای یافتن ρ . زیرمسئله یافتن P به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\max_P \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \log_2 \left(1 + \frac{\rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,m}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (۱۱)$$

$$C_1, C_2, C_3 \quad (۱۲)$$

مسئله فوق یک مسئله محدب است زیرا تابع هدف مقعر بوده و قیود محدب می‌باشند. بنابراین می‌توان مقدار P را با استفاده از ابزار CVX در متلب به دست آورد. برای حل مسائل محدب، ابزار CVX به عنوان راه‌حلی مناسب جهت حل مسائلی که شامل توابع هدف و قیود محدب می‌باشند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ابزار با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته‌ای مانند روش‌های نقطه داخلی ۳۰ قادر به حل مسائل بهینه‌سازی است. از آنجاییکه CVX به دلیل سادگی در

²⁷ Fading

²⁸ Path loss

²⁹ Alternative search method

³⁰ Interior-Point Methods

استفاده و قابلیت یکپارچه سازی با نرم افزار متلب مورد استقبال قرار گرفته است، در تحقیقات و پروژه های مهندسی و علمی بطور گسترده کاربرد دارد. همچنین این ابزار امکان حل مسائل با ابعاد بزرگ را فراهم می آورد و برای مسائلی که نیازمند بهینه سازی منابع، تخصیص توان و مدیریت تداخلات هستند، بسیار مناسب است [۲۵]. در قدم بعدی برای یافتن مقدار ρ مسئله را اینگونه بیان می کنیم:

$$\max_{\rho} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \log_2 \left(1 + \frac{\rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,m}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (13)$$

$$C_1, C_2, C_4 \quad (14)$$

که در این مسئله هم مقدار ρ را با استفاده از ابزار NOMAD در نرم افزار متلب به دست می آوریم.

۲-۳) تضمین امنیت کاربران

برای اینکه بتوانیم امنیت کاربران شبکه را تضمین کنیم، از امنیت لایه فیزیکی به عنوان یک رویکرد نویدبخش در شبکه های مخابرات سیمی استفاده می کنیم. در امنیت لایه فیزیکی، نرخ داده امن از طریق تفاوت ظرفیت کانال بین گیرنده مجاز و شنودگر محاسبه می شود. اگر سیگنال فرستاده شده به گیرنده مجاز قوی تر از سیگنالی باشد که به شنودگر می رسد (به علت فاصله یا شرایط محیطی)، ظرفیت کانال برای گیرنده مجاز بیشتر خواهد بود و در نتیجه نرخ داده امن بالا خواهد بود. در ادامه قیدی که ارائه می کنیم به محاسبه دقیق این نسبت ها می پردازد و تلاش می کند تا با استفاده از تخصیص توان و زیر حامل، امنیت ارتباط را تضمین کند. مسئله بهینه سازی پیشنهادی جدید علاوه بر تمامی قیدهای مذکور دارای یک قید جدید برای تضمین امنیت کاربران است:

$$\max_{\rho, P} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \log_2 \left(1 + \frac{\rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,m}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (15)$$

$$C_1, C_2, C_3, C_4 \quad (16)$$

$$C_5: \log_2 \left(1 + \frac{\rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,m}|^2}{\sigma^2} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{\rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,e}|^2}{\sigma^2} \right) \geq (\rho_{n,m} R_{min}^{sec}) \quad \forall n, m \quad (17)$$

در اینجا R_{min}^{sec} بیانگر حداقل نرخ انتقال داده امن مورد نیاز کاربر می باشد. نرخ انتقال داده امن به تفاوت بین نرخ کلی اطلاعات انتقال یافته به گیرنده مجاز و اطلاعاتی که به یک شنودگر بالقوه می رسد، گفته می شود. ضریب کانال بین فرستنده و کاربر شنودگر e در زیر حامل n نیز با $h_{n,e}$ نشان داده شده که به صورت زیر فرمول بندی می شود:

$$h_{n,e} = \alpha_e \tilde{h}_{n,e} \quad (18)$$

$$\alpha_e = e^{-(b_0 + b_1 f_e^k) d_{me}} \quad (19)$$

که همانند معادله (۲) محاسبه می شود اما با این تفاوت که به فاصله مخصوص شنودگر e بستگی دارد. در اینجا α_e ضریب تضعیف برای شنودگر است که بیانگر کاهش سیگنال هنگام انتقال از فرستنده به شنودگر است. $\tilde{h}_{n,e}$ متغیر تصادفی مربوط به کانال شنودگر است. این متغیر نشان دهنده تغییرات کانال شنودگر به دلیل شرایط محیطی و نویز است. f_e فرکانس سیگنال ارسالی به شنودگر است. d_{me} فاصله بین فرستنده و شنودگر است. فاصله بر میزان تضعیف سیگنال شنود شده، تاثیر می گذارد به این معنا که هر چه شنودگر دور تر باشد، سیگنال ضعیف تر خواهد شد. برای حل این مسئله چون قید C_5 محدب

نیست باید با استفاده از برخی مفاهیم مسئله را به صورت یک قید محدب بازنویسی کنیم برای این منظور قید C_5 را با استفاده از مفاهیم لگاریتم به یک عبارت کسری تبدیل می‌کنیم:

$$\log_2 \left(\frac{\sigma^2 + \rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,m}|^2}{\sigma^2} \right) \geq (\rho_{n,m} R_{min}^{sec}) \quad \forall n, m \quad (20)$$

با استفاده از قوانین تابع لگاریتم داریم:

$$\frac{\sigma^2 + \rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,m}|^2}{\sigma^2 + \rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,e}|^2} \geq 2^{(\rho_{n,m} R_{min}^{sec})} \quad \forall n, m \quad (21)$$

در ادامه با اعمال ساده‌سازی‌های ریاضی به یک عبارت خطی می‌رسیم:

$$\sigma^2 + \rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,m}|^2 \geq 2^{(\rho_{n,m} R_{min}^{sec})} (\sigma^2 + \rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,e}|^2) \quad (22)$$

مدل ریاضی ارائه‌شده، تمامی جنبه‌های اصلی مسئله بهینه‌سازی در سیستم دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی متعامد را پوشش می‌دهد. این مدل به ما امکان می‌دهد تا تخصیص بهینه توان و تخصیص تعداد کاربران در هر زیرحامل را به دست آوریم و از محدودیت‌های سیستم پیروی کنیم. با جای‌گذاری نامساوی (۲۲) در قید C_5 یک مسئله محدب به صورت زیر خواهیم داشت که در نهایت می‌توان با استفاده از ابزار CVX مسئله را حل کرد.

$$\max_{\rho, P} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \log_2 \left(1 + \frac{\rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,m}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (23)$$

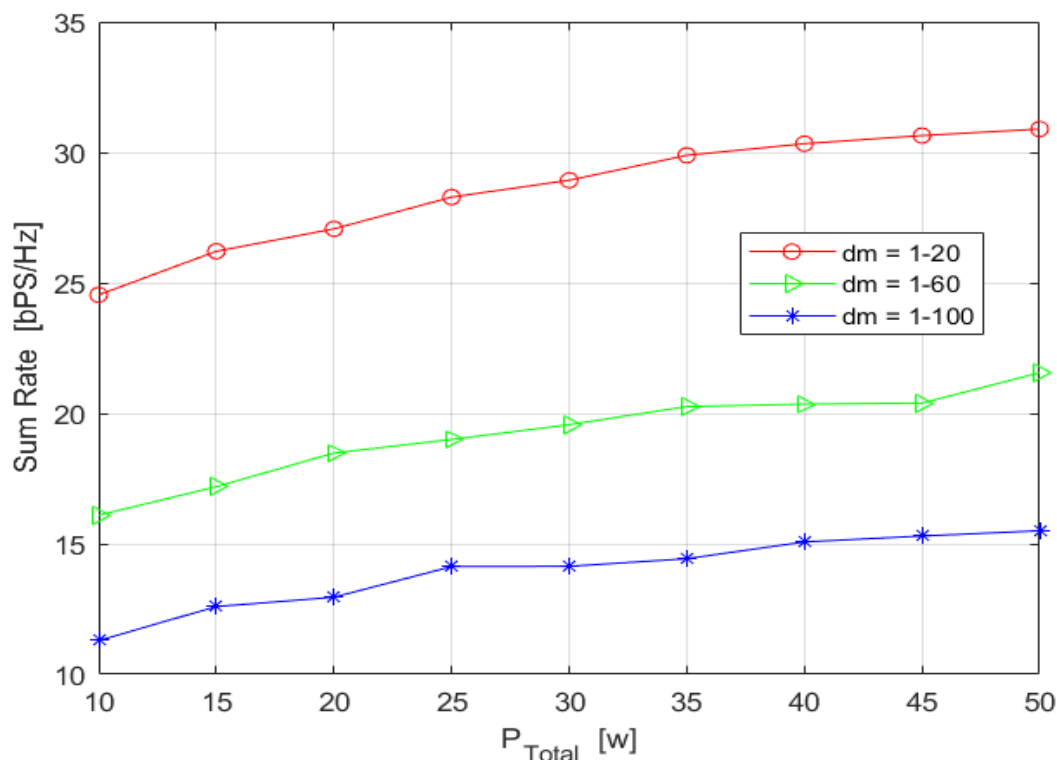
$$C_1, C_2, C_3, C_4 \quad (24)$$

$$\sigma^2 + \rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,m}|^2 \geq 2^{(\rho_{n,m} R_{min}^{sec})} (\sigma^2 + \rho_{n,m} P_{n,m} |h_{n,e}|^2) \quad (25)$$

برای حل مسئله محدب فوق همانند بخش (ب) مسئله را به دو زیرمسئله تقسیم کرده و به حل آن می‌پردازیم. با استفاده از دو ابزار NOMAD و CVX و نیز حل مسئله فوق در متلب، نشان داده شده‌است که می‌توان تخصیص منابع را برای تضمین امنیت کاربران و بهبود کارایی سیستم پیدا کرد. این مدل می‌تواند به عنوان یک مبنا برای توسعه و بهبود سیستم‌های ارتباطی مبتنی بر خطوط انتقال قدرت در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

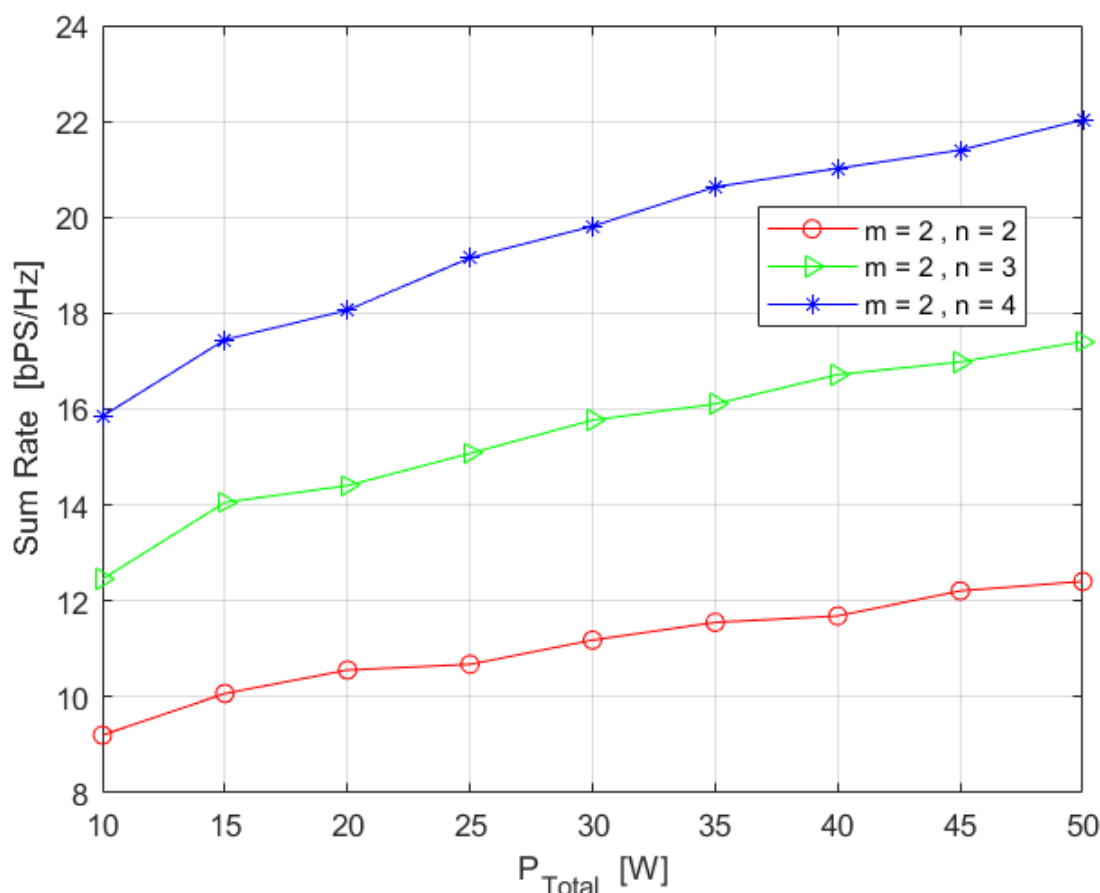
۳ یافته‌ها و نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی مدل سیستم پیشنهادشده، چند حالت مختلف را در نظر می‌گیریم که در هر حالت یک المان متغیر و باقی المان‌ها ثابت هستند. این بررسی‌ها برای دیدن تاثیر تغییراتی مثل فاصله فرستنده تا گیرنده، تعداد زیرحامل، فرکانس و مقدار توان نویز است که در ادامه تاثیر هر کدام از آنها را بر مجموع نرخ داده دریافتی مشاهده می‌کنیم.



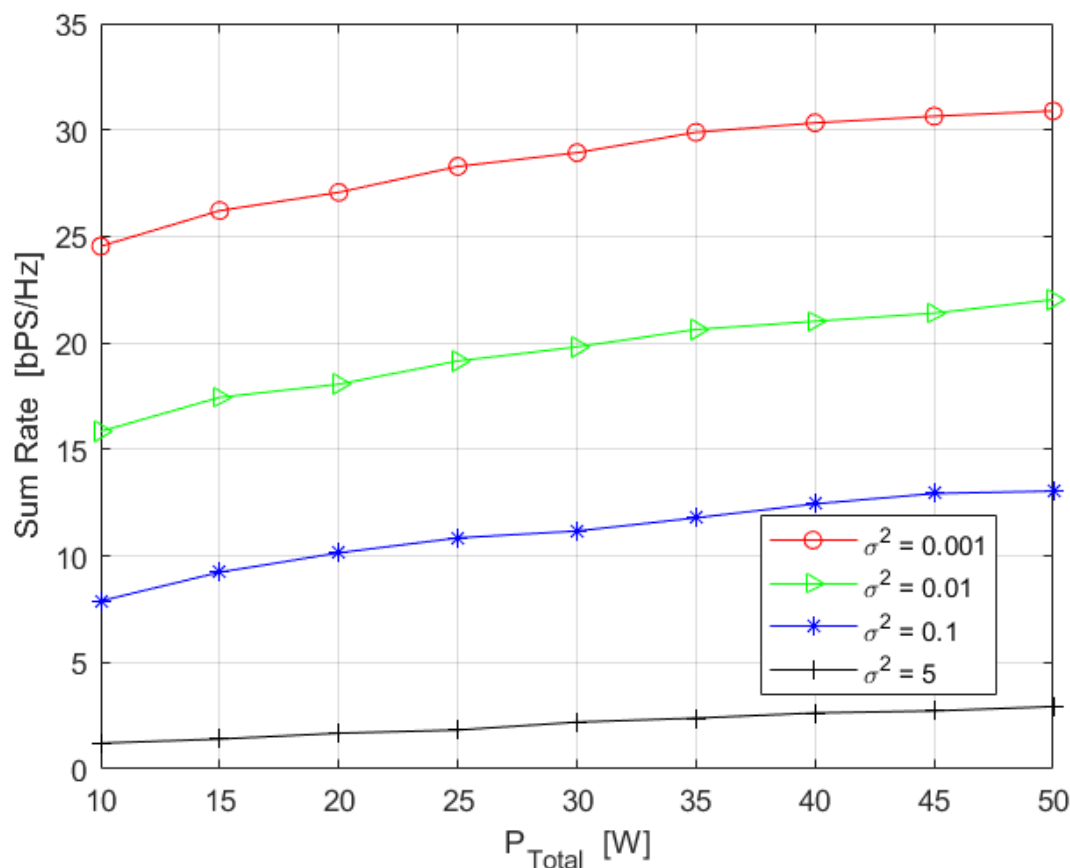
شکل ۲. مجموع نرخ نسبت به حداکثر توان کل و ارزیابی فاصله فرستنده از گیرنده

با توجه به نتایج شبیه‌سازی در شکل (۲) که در آن توان نویز ۰.۰۰۱ وات و تعداد کاربران ۲ و زیرحامل‌ها ۴ است و فاصله گیرنده تا فرستنده به صورت تصادفی در نظر گرفته شده که از متغیر تصادفی پیروی می‌کند و مقدار حداقل آن ۱ و مقدار حداکثر آن را با مقادیر مختلف بررسی کردیم. با افزایش فاصله مجموع نرخ داده تحویلی به کاربر کاهش می‌یابد چون با افزایش فاصله تا فرستنده توان ارسالی در مسیر اُفت پیدا می‌کند و این باعث اُفت نرخ داده دریافتی می‌شود. برای مقایسه توان کل ۱۰ وات را در نظر می‌گیریم. داده تحویلی به دو کاربری که تا فاصله ۲۰ متری هستند، حدود ۲۴.۵۴ bps/Hz است. برای کاربرانی که تا فاصله ۶۰ متری هستند، حدود ۱۶.۱ bps/Hz است یعنی ۳۴.۳۹ درصد افت در انتقال داده نسبت به منحنی با فاصله ۱-۲۰ متر را شاهد هستیم. برای کاربران تا فاصله ۱۰۰ متری هم نرخ دریافت داده ۱۱.۳ bps/Hz را داریم که نشان از افت ۲۹.۸۱ درصدی نسبت به منحنی با فاصله ۱-۶۰ متر و ۵۳.۹۵ درصدی نسبت به منحنی با فاصله ۱-۲۰ متر است. همچنین با افزایش توان کل شاهد بهبود نرخ داده دریافتی هستیم ولی با این افزایش در توان‌های بالاتر با کمتر شدن شیب مجموع نرخ داده دریافتی مواجه هستیم که دلیل آن اشباع شدن نرخ داده دریافتی در کاربران با بهترین وضعیت دریافت است.



شکل ۳. مجموع نرخ نسبت به حداکثر توان کل و ارزیابی تعداد زیر حامل‌های موجود در شبکه

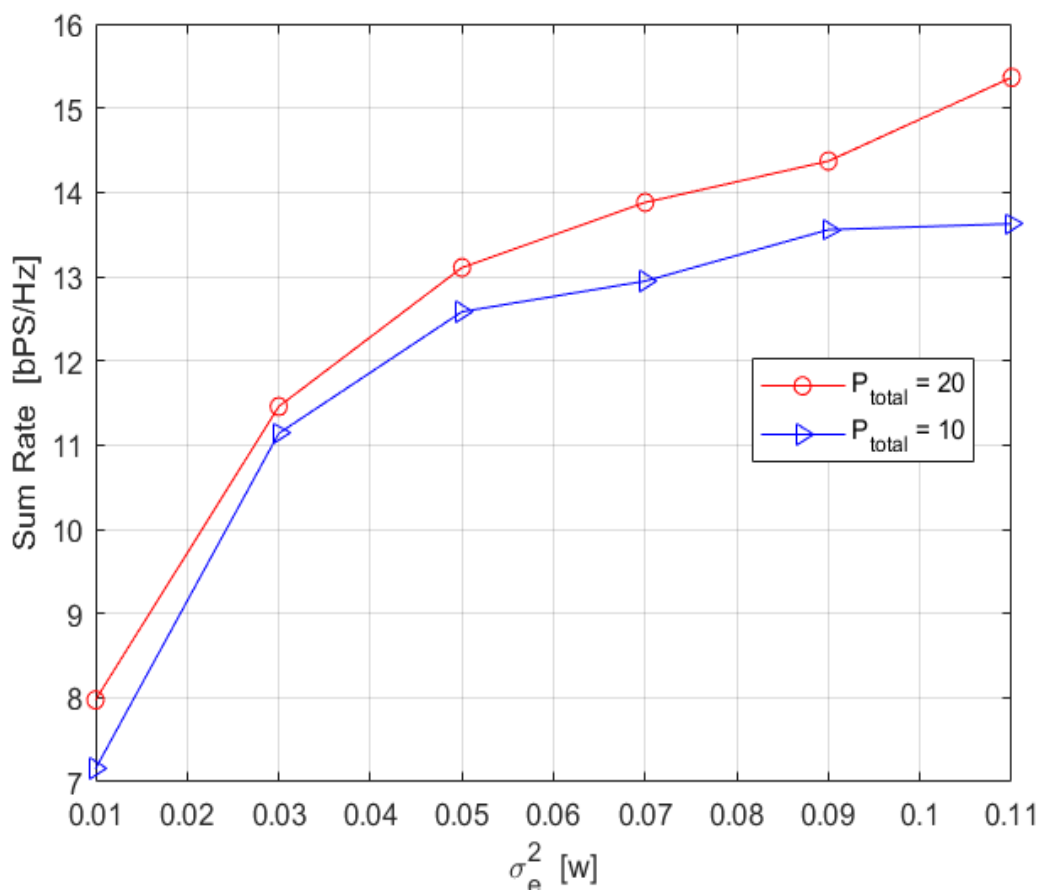
با توجه به شکل (۳) که در آن توان نویز ۰.۰۱ وات و تعداد کاربران ۲ و فاصله کاربران تا منبع از ۱ تا ۲۰ متر متغیر تصادفی است را با مقادیر مختلف بررسی کردیم. با افزایش تعداد زیر حامل، مجموع نرخ داده تحویلی به کاربر بهبود می‌یابد زیرا نرخ داده ارسالی با افزایش پهنای باند افزایش می‌یابد چون با اختصاص دادن چند زیر حامل به یک کاربر، نرخ داده دریافتی دچار افزایش خواهد شد. برای مقایسه توان کل ۱۰ وات را در نظر می‌گیریم، داده تحویلی با دو زیر حامل (یعنی به هر کاربر یک زیر حامل تعلق می‌گیرد)، حدود ۹.۲ bps/Hz است. این مقدار برای سه زیر حامل، حدود ۱۲.۴۶ است یعنی ۳۵.۴۴ درصد بهبود در انتقال داده نسبت به نمودار با تعداد زیر حامل ۲ را شاهد هستیم. نتیجه با افزایش هر زیر حامل تغییر بیشتری پیدا می‌کند و در نمودار قابل مشاهده است که در توان‌های بالاتر حتی این تفاوت‌ها بیشتر هم می‌شود. حال به مقایسه این تفاوت هنگامیکه ۴ زیر حامل در نظر گرفتیم، می‌پردازیم. نرخ دریافت داده ۱۵.۸۵ bps/Hz را داریم که نشان از بهبود ۲۷.۲۱ درصدی نسبت به منحنی با تعداد زیر حامل ۳ و ۷۲.۲۸ درصدی نسبت به منحنی با تعداد زیر حامل ۲ است. همچنین با افزایش توان کل، شاهد بهبود نرخ داده دریافتی هستیم که با تعداد زیر حامل‌های بیشتر، شیب این افزایش بیشتر هم می‌شود ولی با این افزایش در توان‌های بالاتر، با کمتر شدن شیب مجموع نرخ داده دریافتی مواجه هستیم.



شکل ۴. مجموع نرخ نسبت به حداکثر توان کل و ارزیابی مقدار واریانس نویز

در شکل (۴) تعداد کاربران ۲ و تعداد زیرحامل‌ها ۴ و فاصله کاربران تا منبع از ۱ تا ۲۰ متر به صورت تصادفی تغییر می‌کند و نویز را با مقادیر مختلف بررسی کردیم. با افزایش نویز، مجموع نرخ داده تحویلی به کاربر کاهش پیدا می‌کند چون در روش تقسیم فرکانسی متعامد چندگانه دسترسی، نویز تاثیر منفی در نرخ داده دریافتی دارد. برای مقایسه توان کل ۱۰ وات را در نظر می‌گیریم. برای درک بهتر، میزان نویز را خیلی کم تا بسیار بالا در نظر گرفتیم تا تغییرات را مشاهده کنیم. توان دریافتی زمانی که نویز را ۰.۰۰۱ وات در نظر گرفتیم، حدود ۲۴.۵۴ bps/Hz است در صورتی که با توان نویز ۰.۰۱ وات، حدود ۱۵.۸۵ bps/Hz است یعنی ۳۵.۴۱ درصد افت در انتقال داده نسبت به حالت اول را شاهد هستیم در صورتی که توان نویز ۱۰ برابر منحنی با توان نویز ۰.۰۰۱ وات است. با توان نویز ۰.۱ وات، نرخ دریافت داده ۷.۸۹ bps/Hz را داریم که نشان از افت ۵۰.۲۲ درصدی نسبت به منحنی با توان نویز ۰.۰۱ وات و ۶۷.۸۵ درصدی نسبت به منحنی با توان نویز ۰.۰۰۱ وات است. توان نویز ۵ وات که نویز بسیار زیادی است را مورد بررسی قرار دادیم تا به بررسی میزان افت مجموع نرخ دریافتی پردازیم که در شرایط بسیار بد انجام گیرنده در کل چه مقدار داده‌ای را دریافت می‌کند. این مقدار در حدود ۱.۲۱ bps/Hz است که مقدار بسیار کمی است و تقریباً ۸۴.۶۶ درصد نسبت به منحنی با توان نویز ۰.۱ وات و ۹۲.۳۷ درصد نسبت به منحنی با توان نویز ۰.۰۱ وات و ۹۵.۰۷ درصد نسبت به منحنی با توان نویز ۰.۰۰۱ وات افت پیدا کرده است. همچنین با افزایش توان

کل شاهد بهبود نرخ داده دریافتی هستیم ولی با این افزایش در توان‌های بالاتر با کمتر شدن شیب مجموع نرخ داده دریافتی مواجه هستیم.



شکل ۵. مجموع نرخ نسبت به واریانس نویز شنودگر و ارزیابی مقدار حداکثر توان کل

با توجه به شکل شماره (۵) تعداد کاربران ۲ و تعداد زیرحامل ۲ است. همچنین فاصله کاربران تا منبع ۲۰ متر و فاصله شنودگر تا منبع ۴۰ متر است که آن را با مقادیر مختلف واریانس نویز شنودگر و توان کل بررسی کردیم. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش توان نویز برای شنودگر، نرخ داده دریافتی بهبود پیدا می‌کند چون راحت‌تر می‌توان امنیت کاربر را فراهم کرد. ولی این تضمین امنیت باعث افت نرخ داده دریافتی می‌شود زیرا ما برای غیرقابل شنود شدن، توان ارسالی را پایین می‌آوریم تا شنودگر در فاصله‌های دورتر نتواند به کل داده دسترسی داشته باشد. برای درک بهتر نسبت به منحنی مربوط به واریانس نویز ۰.۰۱ در شکل (۴) مقایسه‌ای انجام می‌دهیم. نرخ داده دریافتی در این حالت که امنیت برای کاربران در نظر گرفته شده با واریانس نویز ۰.۰۱ و توان کل ۱۰ وات، حدود ۷.۱۶ bps/Hz است در صورتیکه در حالت بدون امنیت، نرخ داده دریافتی حدود ۹.۲ bps/Hz است. پس ما شاهد افت ۲۲.۱۷ درصدی حالت بدون امنیت نسبت به حالت با امنیت هستیم. برای توان ۲۰ وات نیز نرخ داده در حالت بدون امنیت ۱۰.۰۷ bps/Hz است ولی در حالت با امنیت ۷.۹۷ bps/Hz است یعنی ۲۰.۸۵ درصد افت از حالت بدون امنیت نسبت به حالت با امنیت داریم.

در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده که در هریک از حالات برای رسیدن به مقادیر در هر توان کل، شبیه‌سازی‌ها ۲۰۰ بار تکرار شده‌است تا میانگین به‌دست‌آید زیرا با توجه به تصادفی‌بودن مقدار h ، تغییرات زیادی در جواب هر شبیه‌سازی قابل مشاهده بود که باعث می‌شود نتایج قابل تفسیر نباشد و دارای انحراف بسیار زیادی باشد. تغییرات در تعداد زیرحامل ارتباط مستقیم با مجموع نرخ داده دریافتی دارد ولی تغییرات در توان نویز و فاصله تا فرستنده ارتباط معکوس با مجموع نرخ داده دریافتی دارد. البته با اضافه‌شدن امنیت برای اختلال در سیستم شنودگر، نرخ داده تا مقدار قابل‌پذیرشی پایین می‌آید چون با پایین‌آوردن توان در فرستنده باعث غیرقابل تشخیص شدن مقداری از داده‌ها می‌شود.

۴) نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی بهینه‌سازی نرخ انتقال داده و تخصیص توان در سیستم‌های مخابراتی مبتنی بر خطوط برق پرداخته‌ایم. با استفاده از تکنیک دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی متعامد، شبیه‌سازی‌هایی با ۲۰۰ بار تکرار انجام شد تا میانگین دقیقی از نتایج به‌دست‌آید. این شبیه‌سازی‌ها نشان داد که تغییرات در تعداد زیرحامل‌ها ارتباط مستقیمی با مجموع نرخ داده دریافتی دارند درحالی‌که تغییرات در توان نویز و فاصله تا فرستنده تأثیر معکوسی بر نرخ داده دارند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی ما بطور قابل‌توجهی بهتر از سیستم‌های فعلی عمل می‌کند و افزودن تکنیک دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی متعامد به ارتباطات خطوط قدرت به‌عنوان یک راهکار موثر در افزایش نرخ انتقال داده‌ها اثبات شده‌است. علاوه بر این، نیاز به امنیت در این سیستم‌ها نیز مورد توجه قرار گرفت. با کاهش توان فرستنده به‌منظور جلوگیری از شنود، نرخ داده‌ها تا مقدار قابل‌قبولی کاهش می‌یابد. این نشان‌دهنده تعادل بین امنیت و کارایی در طراحی سیستم‌های مخابراتی است. نتایج این پژوهش می‌تواند راهگشای بهینه‌سازی‌های بیشتر در آینده باشد و بر اهمیت ترکیب تکنیک‌های مختلف در بهبود کارایی و امنیت سیستم‌های مخابراتی تأکید می‌کند. بطور کلی یافته‌های ما نشان می‌دهد که استفاده از تکنیک دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی متعامد در سیستم‌های مبتنی بر خطوط برق می‌تواند بطور موثری به بهبود کیفیت خدمات و افزایش بهره‌وری در شبکه‌های هوشمند کمک کند.

منابع

- A.Liong, F. H.Juwono, L.Gopal, C. W.Chiong & Y.Rong (2021). Multiple blanking preprocessors for impulsive noise mitigation in OFDM-based power-line communication systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 130, 106911. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.106911
- A.Rehman, F. B.Hussain, R.Ali, & T.Khurshaid, (2023). Collision-Based Up-Link OFDMA Random Access Mechanism for Wi-Fi 6. IEEE Access. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3323162
- A.Yousaf, F.Khan, Z.Hameed, & H.Ali, (2018, March). Deployment of smart grid on narrowband power line communication using OFDMA. In 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC) (pp. 1-6). IEEE. DOI: 10.1109/IREC.2018.8362574
- C.Kundu, A.Dubey, A. M.Tonello, A.Nallanathan, & M. F.Flanagan, (2023). Destination Scheduling for Secure Pinhole-Based Power-Line Communication. IEEE Open Journal of the Communications Society. DOI: 10.1109/OJCOMS.2023.3314535
- F.Khan, S.Baig, U.Noreen, & A.Yousaf, (2012). An overview of OFDM based narrowb and power line communication standards for smart grid applications. World Applied Sciences Journal, 20(9), 1236-1242. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2012.20.09.2757
- G.Luwemba, M. M.Kissaka, & P. Mafole, (2022). Exploring Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance Techniques for Resource Sharing in Broadband Power Line Communications. Tanzania Journal of Science, 48(2), 313-323. DOI: 10.4314/tjs.v48i2.8
- I.Mapfumo, T.Shongwe, & K. M. Rabie (2023). Performance analysis of ACO/DCO-OFDM Hybrid PLC-VLC receivers with blanking non-linearity. IEEE Access, 11, 36281-36289. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3266408

- J. A.Cortés, F. J.Cañete & L. Díez, (2023). Channel estimation for OFDM-based indoor broadband power line communication systems. *Journal of Communications and Networks*, 25(2), 151-166. DOI: 10.23919/JCN.2022.000056
- J. H.Fernandez, A.Omri, & R.Di Pietro, (2022). Channel Impulse Response Multilevel Quantization for Power Line Communications. *IEEE Access*, 10, 66113-66126. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3184038
- K. A. Al Soufy, N. H Al-Ashwal, F. S.Al-Kamali, & M.Swillam, (2023). Performance Analysis of Wireless Compressed-Image Transmission over DST-Based OFDMA Systems. DOI: 10.1186/s13638-023-02286-9
- K.Jiravansthit, & W.Santipach, (2020). Energy-minimizing bit allocation for powerline OFDM with multiple delay constraints. *Physical Communication*, 39, 101015. DOI: 10.1016/j.phycom.2020.101015
- L.Zhang, B.Liu, X.Xin, & D.Liu, (2013). A novel 3D constellation-masked method for physical security in hierarchical OFDMA system. *Optics express*, 21(13), 15627-15633. DOI: 10.1364/OE.21.015627
- M. Forouzesh, P. Azmi, N. Mokari, K. K. Wong, & H. Pishro-Nik, H. (2019). Robust physical layer security for power domain non-orthogonal multiple access-based HetNets and HUDNs: SIC avoidance at eavesdroppers. *IEEE Access*, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2932805.
- M. Grant and S. Boyd, CVX: Matlab Software for disciplined convex programming, version 2.1, 2014, <http://cvxr.com/cvx>
- M.Jeong, S. W.Choi, & J.Kim, (2023). On the design of an OFDMA-based software-defined modem: A CFO estimation perspective. *ICT Express*. DOI: 10.1016/j.ict.2023.10.003
- O.Alaca, S.Althunibat, S.Yarkan, S. L.Miller, & K. A. Qaraqe, (2023). Analysis and compensation of tx and rx iq imbalances in uplink im-ofdma systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72(10), 12956-12969. DOI: 10.1109/TVT.2023.3272357
- P.Agarwal, & M. K.Shukla, (2022). MITA interleaver for OFDM-IDMA and SCFDMA-IDMA techniques using QPSK modulation over PLC. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 11(3), 1418-1427. DOI: 10.11591/eei.v11i3.3598
- S.Hu, X.Yuan, W.Ni, X.Wang, E.Hossain, & H. V. Poor, (2024). OFDMA-F 2 L: Federated Learning With Flexible Aggregation Over an OFDMA Air Interface. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. DOI: 10.1109/TWC.2023.3334691
- S.Karachontzitis, S.Timotheou, I.Krikidis, & K.Berberidis, (2014). Security-aware max-min resource allocation in multiuser OFDMA downlink. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 10(3), 529-542. DOI: 10.1109/TIFS.2014.2384392
- T.Wang, C.You, Z.He, & Y.Wang, (2023). Distributed subcarrier assignment and discrete power allocation for multi-UAV millimeter-wave cooperative OFDMA networks with heterogeneous QoS consideration. *IEEE Access*. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3328214
- W.Jiang, & H. D. Schotten, (2023, June). User scheduling and passive beamforming for FDMA/OFDMA in intelligent reflection surface. In *2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring)* (pp. 1-6). IEEE. DOI: 10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10199485
- W.Zhang, C.Zhang, W.Jin, C.Chen, N.Jiang, & K.Qiu, (2014). Chaos coding-based QAM IQ-encryption for improved security in OFDMA-PON. *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(19), 1964-1967. DOI: 10.1109/LPT.2014.2343616
- X.Wu, Y.He, & A.Saleem, (2023). Computation rate maximization in multi-user cooperation-assisted wireless-powered mobile edge computing with OFDMA. *China Communications*, 20(1), 218-229. DOI: 10.23919/JCC.2023.01.018
- X.Zhu, B.Yang, C.Chen, L.Xue, X.Guan, & F.Wu, (2015). Cross-layer scheduling for OFDMA-based cognitive radio systems with delay and security constraints. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(12), 5919-5934. DOI: 10.1109/TVT.2014.2387879
- Z.Guo, B.Liu, J.Ren, Q.Zhong, Y.Mao, X.Wu, ... & Y. Chen, (2023). High security optical OFDM transmission scheme with four-dimensional region joint encryption based on power division multiplexing. *Optics Express*, 31(9), 14673-14684. DOI: 10.1364/OE.488208