Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538



Type of Article (e.g. Research Article)

IFF-PTS algorithm to reduce the peak-to-average power ratio of MIMO-OFDM signals

Abbas Ali Sharifi [a,*], **Hojjat Emami** [b]

[a] *Department of Electrical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran*
[b] *Department of Computer Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran*

UNCORRECTED PROOF

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-03-13
Revised: 2024-05-12
Accepted: 2024-10-19

Keywords:

MIMO-OFDM;
PAPR;
PTS;
Firefly algorithm;
IFF-PTS.

ABSTRACT

MIMO-OFDM system uses the merits of both OFDM and MIMO systems and facilitates the high-rate data transmission capability by increasing the reliability of the communication systems. The MIMO system uses multiple antennas in the transmitter and receiver to create spatial diversity and reduce the destructive effects of fading in wireless communication channels. Besides these advantages, the MIMO-OFDM system faces a high PAPR problem like the OFDM system. One of the well-known methods for PAPR reduction in MIMO-OFDM systems is the partial transmit sequence (PTS). The PTS method searches all possible combinations of phase factors to find the minimum PAPR, which increases the computational complexity. To solve this challenge, we propose the IFF-PTS algorithm, which combines the PTS algorithm and an improved version of the firefly algorithm (IFF). The proposed IFF-PTS algorithm overcomes the computational complexity of the exhaustive search to find the optimal phase factors in the PTS and significantly reduces the PAPR metric. The proposed IFF-PTS algorithm is evaluated in different scenarios and compared with the state-of-the-art algorithms. The results of the simulations show the superiority of the proposed algorithm compared with the counterpart algorithms. When the number of subblocks is 8 and the phase factors are {±1, ±j}, the IFF-PTS algorithm has reduced the PAPR value to 6.8dB. The computational complexity of the proposed method is 2.4% of the complexity of OPTS and has significantly reduced the PAPR value. For the number of subblocks of 16, the IFF-PTS method has only 1.2% of the complexity of OPTS but has reduced the PAPR value to 6.4dB.

DOI: https://doi.org/

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

*** Corresponding author.**
E-mail address: sharifi@ubonab.ac.ir

How to cite this article:

نوع مقاله (به عنوان مثال مقاله پژوهشی)

الگوریتم IFF-PTS برای کاهش نسبت توان بیشینه به متوسط سیگنال‌های مخابراتی MIMO-OFDM

عباسعلی شریفی[۱،*]، حجت امامی[۲]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۵

واژگان کلیدی:
MIMO-OFDM،
PAPR،
PTS،
الگوریتم کرم شب تاب،
IFF-PTS

چکیده

سیستم MIMO-OFDM از مزایای سیستم‌های OFDM و MIMO به صورت توأم بهره برده و با افزایش قابلیت اطمینان، امکان انتقال داده‌ها با نرخ بالا را میسر می‌سازد. سیستم MIMO-OFDM با استفاده از چندین آنتن در فرستنده و گیرنده، چندگانگی فضایی ایجاد کرده و اثرات نامطلوب محوشدگی در کانال‌های مخابراتی بی‌سیم را کاهش می‌دهد. با این حال، سیستم MIMO-OFDM نیز همانند OFDM با مشکل PAPR بالا مواجه است. یکی از راهکارهای شناخته‌شده برای کاهش PAPR در سیستم MIMO-OFDM، روش PTS است. روش PTS برای پیدا کردن حداقل مقدار PAPR، تمام ترکیبات ممکن از فاکتورهای فاز را جستجو می‌کند، که این موضوع موجب افزایش پیچیدگی محاسباتی آن می‌شود. برای رفع این چالش، در این پژوهش، الگوریتم IFF-PTS پیشنهاد می‌شود که ترکیبی از الگوریتم PTS و نسخه بهبودیافته الگوریتم کرم شب‌تاب (IFF) است. الگوریتم پیشنهادی IFF-PTS با جستجوی فاکتورهای فاز بهینه، بر پیچیدگی محاسباتی روش PTS غلبه نموده و PAPR را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. الگوریتم IFF-PTS بر روی سناریوهای مختلف ارزیابی شده و با روش‌های مطرح مقایسه شده است. نتایج آزمایش‌ها، برتری الگوریتم پیشنهادی را در مقایسه با روش‌های مطرح نشان می‌دهد. برای حالتی که تعداد زیربلوک‌ها برابر ۸ و فاکتورهای فاز برابر $\{\pm 1, \pm j\}$ است، الگوریتم IFF-PTS مقدار PAPR را به 6.8dB کاهش داده است. پیچیدگی محاسباتی روش پیشنهادی معادل 2.4% پیچیدگی PTS است و مقدار PAPR را به میزان قابل‌توجهی کاهش داده است. برای تعداد ۱۶ زیربلوک روش IFF-PTS تنها 1.2% پیچیدگی PTS را دارد اما مقدار PAPR را به مقدار 6.4dB کاهش داده است.

DOI: https://doi.org/

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

UNCORRECTED PROOF

۱-مقدمه

توسعه سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم با نرخ بالای انتقال داده‌ها، نیازمند افزایش پهنای بلند سیستم‌ها و بهبود کارایی آن‌ها است. یکی از مشکلات در افزایش پهنای باند سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم، محوشدگی[۱] کانال‌های انتخاب‌گر فرکانس است. برای غلبه بر این مشکل، روش‌های متعدد ارسال و دریافت اطلاعات ارائه شده است.

[1] Fading

یکی از روش‌های شناخته‌شده، مدولاسیون چند حاملی[۲] (OFDM) است. سیستم‌های OFDM با تبدیل کانال باند وسیع به چندین زیر-کانال باند باریک و ارسال موازی اطلاعات از طریق آن‌ها، با مشکل محوشدگی کانال مقابله می‌کند. یکی دیگر از مزایای سیستم‌های OFDM بهره طیفی مناسب‌تر نسبت به دیگر روش‌های چند-حاملی است، زیرا این سیستم‌ها به‌خوبی از همپوشانی زیر کانال‌ها در حوزه فرکانس استفاده می‌کنند [1].

یکی دیگر از روش‌های مقابله با اثرات مخرب محوشدگی، استفاده از چندگانگی فضایی است. در این روش، یک سمبل خاص از چند آنتن مختلف ارسال و دریافت می‌شود [2]. این سیستم‌ها را چند ورودی-چند خروجی[۳] (MIMO) می‌نامیم. در این سیستم‌ها، علاوه بر بهره‌گیری از مزایای چندگانگی می‌توان با استفاده از کدهای بلوکی فضا-زمان[۴] (STBC) از بهره کدینگ آن‌ها بهره برد [3]. همچنین می‌توان بدون استفاده از کدهای فضا-زمان، با ارسال موازی دنباله‌های مستقل اطلاعات از آنتن‌های فرستنده‌های مجزا، نرخ ارسال داده را افزایش داد.

سیستم‌های MIMO-OFDM نیز مانند OFDM دارای پیک‌های بزرگ در سیگنال ارسالی خود هستند که به‌عنوان PAPR[۵] شناخته می‌شود. PAPR به معنی نسبت توان حداکثر به توان متوسط است. بالا بودن مقدار PAPR، کارایی سیستم‌های MIMO-OFDM را کاهش می‌دهد. دلیل بروز PAPR این است که سیگنال‌های ارسالی در حین عبور از تقویت‌کننده‌ها برش یافته و دچار اعوجاج می‌گردند. برای ممانعت از بروز چنین مشکلی، نیاز به تقویت‌کننده‌هایی با ناحیه خطی وسیع است که این نوع تقویت‌کننده‌ها هزینه‌های زیادی را به سیستم تحمیل می‌کنند، لذا باید PAPR سیگنال‌ها کاهش یابد. تاکنون روش‌های مختلفی برای کاهش PAPR پیشنهاد شده‌اند [4]، [5]، [6]، [7]. در بین روش‌های مختلف کاهش PAPR، روش ارسال دنباله جزئی[۶] (PTS) به دلیل کارایی مطلوب آن در کاهش PAPR، بسیار موردتوجه قرار گرفته است [8]، [9]. در این روش، یک فریم از اطلاعات ورودی به چندین زیر فریم مجزا و ناهمپوشا تقسیم می‌شود. عملگر تبدیل فوریه سریع معکوس[۷] (IFFT) به هرکدام از زیر فریم‌های مستقل اعمال شده و خروجی‌های IFFT با فاکتورهای فاز متناظر وزن دهی می‌شوند. فاکتورهای فاز طوری انتخاب می‌شوند که سیگنال حاصل از جمع وزن‌دار خروجی‌های IFFT حداقل مقدار PAPR را داشته باشد [10]، [11]. چالش اساسی در روش PTS به دست آوردن فاکتورهای فاز بهینه با جستجوی جامع بین تمام ترکیبات ممکن از فاکتورهای فاز است که به این حالت OPTS[۸] گفته می‌شود. بدیهی است که با افزایش تعداد فاکتورهای فاز و تعداد زیرفریم‌ها پیچیدگی محاسباتی روش OPTS به‌طور نمایی افزایش می‌یابد.

اخیراً، الگوریتم‌های تکاملی و هوش محاسباتی مختلفی برای یافتن فاکتورهای فاز بهینه و غلبه بر پیچیدگی محاسباتی روش OPTS ارائه شده‌اند. برخی از مهم‌ترین این الگوریتم‌ها عبارت‌اند از الگوریتم ژنتیک (GA) [12]، بهینه‌سازی کلونی ذرات (PSO) [13]، الگوریتم کلونی زنبورعسل (ABC) [14]، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO) [15]، الگوریتم جستجوی ممنوعه (TS) [16]، الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) [17] و الگوریتم جهش قورباغه [18]. همچنین پژوهش‌های جدید از شبکه‌های عصبی [19]، یادگیری ماشین [20]، و یادگیری عمیق [21]، نیز برای کاهش PAPR استفاده کرده‌اند.

در این پژوهش، برای کاهش PAPR سیگنال‌های MIMO-OFDM، الگوریتم IFF-PTS پیشنهاد شده است که مبتنی بر روش PTS و الگوریتم کرم شب‌تاب

[2] Orthogonal frequency division multiplexing

[3] Multi input-multi output

[4] Space Time Block Code

[5] Peak-to-Average Power Ratio

[6] Partial transmit sequence

[7] Inverse fast fourier transform

[8] Optimal PTS

UNCORRECTED PROOF

بهبودیافته (IFF) است. الگوریتم IFF نسخه بهبودیافته‌ای از الگوریتم کرم شب تاب[9] (FF) [22] است. الگوریتم IFF، روش جدیدی برای محاسبه جذابیت و عملگر حرکت الگوریتم FF ارائه داده است که موجب بهبود توانایی کاوش[10] و اکتشاف[11] الگوریتم می‌شود. به‌طور خلاصه، نوآوری‌های این پژوهش عبارت‌اند از:

- ارائه الگوریتم بهبودیافته کرم شب‌تاب: در این پژوهش، عملگر حرکت الگوریتم FF به‌گونه‌ای بهبود داده شده است که الگوریتم بتواند تمام نقاط فضای جستجو را کاوش کرده و به نقطه بهینه سراسری دست یابد. به همین منظور، برای تولید اعداد تصادفی از تابع آشوب لاجستیک استفاده شده است. به دلیل ماهیت غیرتکراری تابع آشوب، الگوریتم IFF توانایی جستجو تمامی نقاط فضای جستجو را دارد که به این طریق نرخ همگرایی الگوریتم افزایش می‌یابد.
- ارائه الگوریتم ترکیبی IFF-PTS: الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم IFF و الگوریتم PTS است. این الگوریتم بر پیچیدگی محاسباتی الگوریتم PTS غلبه کرده و با حداقل تعداد جستجوی ترکیبات فاکتورهای فاز، مقدار PAPR را به میزان مطلوبی کاهش می‌دهد. الگوریتم پیشنهادی بر روی چندین سناریو ارزیابی شده و با روش‌های مطرح مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها برتری الگوریتم پیشنهادی را در مقایسه با سایر الگوریتم‌های مطرح نشان می‌دهد.

پس از این مقدمه کوتاه، در بخش دوم، سیستم MIMO-OFDM با استفاده از کدینگ بلوکی فضا-زمان الموتی[12] شرح داده شده است. در بخش سوم، روش PTS متعارف بحث شده است. در بخش چهارم، به بررسی اجمالی الگوریتم فرا ابتکاری FF پرداخته شده است. در بخش ۵، روش پیشنهادی IFF-PTS ارائه شده است. کارایی روش پیشنهادی در بخش ۶ ارزیابی شده و با روش‌های دیگر مقایسه شده است. در بخش ۷، نتیجه‌گیری و کارهای آتی ارائه شده است.

۲-سیستم MIMO-OFDM

در فناوری OFDM، یک دنباله از اطلاعات باینری توسط مدولاسیون مناسب به دنباله سمبل‌های $\boldsymbol{X}=[X_1, X_2, \ldots, X_N]^T$ تبدیل می‌شوند. عملگر IFFT به هر بلوک از سمبل‌ها اعمال شده و سمبل‌های حوزه زمان $\boldsymbol{x}=[x_1, x_2, \ldots, x_{NL}]^T$ به دست می‌آیند. هر نمونه از x، مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$x_n=\frac{1}{\sqrt{N}}\sum_{k=1}^{N}X_k e^{j\frac{2\pi}{NL}kn} \qquad n=1,2,\ldots,NL \qquad (۱)$$

N تعداد زیرحامل‌ها و L فاکتور بیش‌نمونه‌برداری است. در سیستم OFDM، برای نمایش دقیق PAPR عمل بیش‌نمونه‌برداری انجام می‌گیرد. برای بیش‌نمونه‌برداری با فاکتور L تعداد $N(L\text{-}1)$ صفر به هر فریم اضافه شده و IFFT در حالت NL نقطه‌ای انجام می‌شود. سیگنال حوزه زمان به دلیل جمع شدن چندین زیرحامل متعامد، دارای PAPR بالا است. میزان PAPR سیگنال OFDM گسسته-زمان عبارت است از نسبت توان بیشینه به متوسط توان و به‌صورت رابطه زیر نوشته می‌شود:

$$PAPR\,(\mathrm{x})=\frac{\max\{|x_n|^2\}}{E\{|x_n|^2\}} \qquad 1\le n\le NL \qquad (۲)$$

x_n از رابطه (۱) به دست می‌آید و $E\{.\}$ عملگر امید ریاضی است. تکنیک‌های مختلف کاهش PAPR با منحنی‌های مکمل تابع توزیع تجمعی[13] (CCDF) ارزیابی می‌شوند. منحنی CCDF احتمال PAPR یک فریم از اطلاعات را در حالتی که از مقدار آستانه $PAPR_0$ بیشتر باشد، ترسیم می‌کند.

سیستم MIMO-OFDM که ترکیبی از سیستم‌های OFDM و MIMO است از مزایای هر دو سیستم به‌طور توأم بهره می‌برد. این تکنیک با قابلیت اطمینان بالا، امکان ارسال اطلاعات با نرخ بالا را در کانال‌های مخابراتی بی‌سیم فراهم می‌سازد. از کدینگ الموتی برای پیاده‌سازی MIMO-OFDM می‌توان استفاده کرد. در این پژوهش،

[9] Firefly algorithm

[10] Exploration

[11] Exploitation

[12] Alamouti

[13] Complementary cumulative distribution function

UNCORRECTED PROOF

یک سیستم MIMO-OFDM با دو ورودی و یک خروجی (2×1) در نظر گرفته شده است. رهیافت الموتی پایه با استفاده از کدبندی بلوکی فضا-زمان برای یک سیستم MIMO-OFDM نوع ۲×۱ به‌صورت زیر است:

$$S = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \qquad (۳)$$

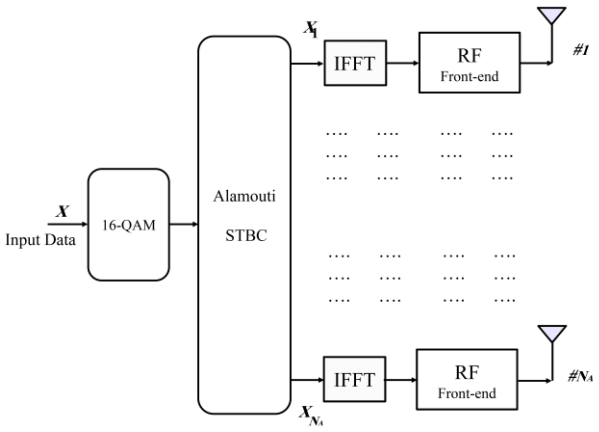
در زمان t سیگنال s_1 از طریق آنتن ۱ و سیگنال s_2 توسط آنتن ۲ ارسال می‌شود. به‌طور مشابه در زمان $t+T$ سیگنال $-s_2^*$ از طریق آنتن ۱ و s_1^* توسط آنتن ۲ ارسال می‌شود. با فرض یک بلوک از اطلاعات به طول N به فرم $X=[X_1, X_2, \ldots, X_N]^T$ با اعمال کدینگ الموتی به سیگنال ورودی X، دو بردار X_1 و X_2 به‌صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{X}_1 &= [X_1, -X_2^*, X_3, \ldots, -X_N^*]^T \\ \boldsymbol{X}_2 &= [X_2, X_1^*, X_4, \ldots, X_{N-1}^*]^T \end{aligned} \qquad (۴)$$

بلوک اطلاعات ورودی X، سمبل‌های مدوله شده 16-QAM هستند. بعد از اعمال کدینگ بلوکی فضا-زمان الموتی به اطلاعات ورودی، عملگر IFFT به هر دو بلوک اطلاعات X_1 و X_2 اعمال شده و سیگنال‌های حوزه زمان MIMO-OFDM، x_1 و x_2 مطابق رابطه (۱) به دست می‌آیند. PAPR هر کدام از آنتن‌ها محاسبه شده و PAPR کل سیستم عبارت است از:

$$PAPR = \max\{PAPR_i\}; \quad i = 1,2 \qquad (۵)$$

شکل ۱ بلوک دیاگرام سیستم MIMO-OFDM را برای N_A آنتن فرستنده نشان می‌دهد.



شکل (۱): نمای کلی از فرستنده سیستم MIMO-OFDM

۳-سیستم MIMO-OFDM با روش PTS

در روش PTS، هر بلوک از اطلاعات X به طول N به V تعداد زیربلوک مجزا و ناهمپوشا X^v (v=1,2, …, V) به‌گونه‌ای تقسیم می‌شود که طول هر زیربلوک یکسان با طول X و در هر زیربلوک، زیرحامل‌های مرتبط با سایر بلوک‌ها صفر قرار داده می‌شوند، به‌طوری‌که:

$$\boldsymbol{X} = \sum_{v=1}^{V} X^v \qquad (۶)$$

زیر بلوک‌های حوزه فرکانس با استفاده از V تعداد عملگرهای IFFT به زیربلوک‌های حوزه زمان $x^1, x^2, \ldots, x^V$ تبدیل می‌شوند که به آن‌ها دنباله‌های جزئی گفته می‌شود.

$$\boldsymbol{x} = \sum_{v=1}^{V} x^v = \sum_{v=1}^{V} IFFT\{X^v\} \qquad (۷)$$

روش PTS تولید دنباله‌های جزئی از دنباله اصلی x است و سپس انتخاب دنباله‌ای که حداقل PAPR را دارد. در روش PTS، دنباله‌های جزئی با فاکتورهای فاز $b_v=exp(j\phi_v)$ وزن‌دهی شده و با همدیگر جمع می‌گردند تا یک مجموعه از دنباله‌های را تولید کنند (ϕ_v در بازه 0 تا 2π است).

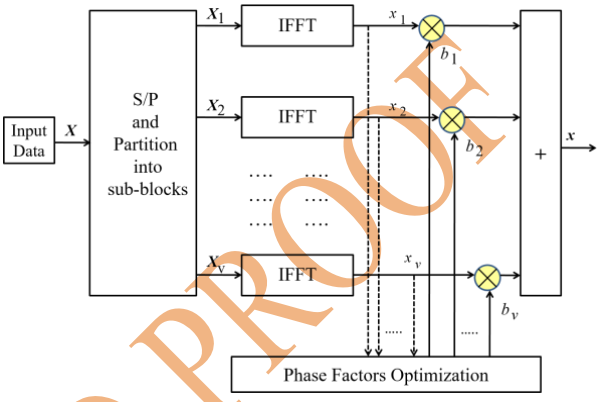
$$\boldsymbol{x} = \sum_{v=1}^{V} b_v x^v \qquad (۸)$$

فاکتورهای فاز b_v معمولاً به تعداد w محدود می‌گردند و عمدتاً از مجموعه{±1} یا {±1, ±j} انتخاب می‌شوند. بدون از دست دادن عمومیت مسئله، فاکتور فاز اولین دنباله جزئی برابر ۱ قرار داده می‌شود و بنابراین w^{V-1} دنباله می‌تواند تولید شود. برای انتخاب سیگنال با کمترین PAPR یک جستجوی جامع بین تمام دنباله‌ها نیاز است که این کار موجب افزایش پیچیدگی محاسباتی می‌شود. علاوه بر این، فاکتورهای فاز بهینه به دست آمده به‌عنوان اطلاعات جانبی برای گیرنده ارسال می‌شود تا اطلاعات اصلی سیگنال OFDM بازسازی شود، لذا نیاز است $(V-1)\log_2^w$ بیت اطلاعات ارسال گردد. شکل ۲ بلوک دیاگرام یک سیستم PTS را نشان می‌دهد.

در یک سیستم MIMO-OFDM هر مسیر به‌طور مجزا از روش PTS استفاده می‌کند. با فرض تعداد N_A آنتن، به تعداد $N_A \times V$ عملگرهای IFFT نیاز است تا دنباله‌های جزئی را برای آنتن‌های فرستنده تولید کند.

UNCORRECTED PROOF

تعداد زیربلوک‌ها (V) و تعداد فاکتورهای فاز (w) برای همه آنتن‌های فرستنده یکسان فرض می‌شود. برای تعیین دنباله‌های با کمترین مقدار PAPR در هر آنتن ارسالی، w^{V-1} دنباله مجزا جستجو می‌شود. روش PTS کارایی بهتری در کاهش PAPR دارد، اما پیچیدگی محاسباتی بالایی دارد.



شکل (۲): بلوک دیاگرام تکنیک PTS

۴-الگوریتم بهینه سازی کرم شب تاب

الگوریتم کرم شب‌تاب (FF) یک روش بهینه‌سازی است که از ارتباط نوری میان کرم‌های شب‌تاب در طبیعت الهام گرفته شده است [22]. این الگوریتم عملکرد بسیار مطلوبی در جستجوی جواب‌های بهینه مرتبط با مسائل و توابع چندمُدی دارد. این الگوریتم بر اساس قواعد زیر بنا شده است:

- تمامی کرم‌های شب‌تاب، تک جنسی هستند، به‌گونه‌ای که فارغ از جنسیت، مجذوب دیگر کرم‌های شب‌تاب خواهند شد.
- جذابیت یک کرم شب‌تاب متناسب با روشنایی آن است. کرم شب‌تابی که نور کمتری از خود ساطع می‌کند به سمت کرمی که نور بیشتری دارد جذب می‌شود.
- با افزایش فاصله بین کرم‌های شب‌تاب مقدار جذابیت آن‌ها کاهش پیدا می‌کند.
- روشنایی یک کرم شب‌تاب به‌واسطه تابع هدف مشخص می‌شود.

بر طبق این فرضیه‌ها، شکل ۳ روندنما الگوریتم FF را نشان می‌دهد.

الگوریتم FF فرآیند بهینه‌سازی را با یک جمعیت اولیه تصادفی شروع می‌کند. در این الگوریتم هر عضو از جمعیت یک کرم شب‌تاب نامیده می‌شود. کرم‌های شب‌تاب از طریق نورپردازی و جذب یکدیگر فضای جستجو را برای پیدا کردن نقطه بهینه سراسری مسئله جستجو می‌کنند. دو مرحله اصلی الگوریتم عبارت‌اند از به‌روزرسانی شدت روشنایی و حرکت در هر تکرار الگوریتم، کرم‌های شب‌تاب به سمت کرم‌های شب‌تاب با شدت روشنایی بیشتر که در مجاورت آن‌ها می‌باشند، حرکت می‌کنند و شدت روشنایی خود را به‌روزرسانی می‌کنند .به این ترتیب طی تکرارهای متوالی، کرم‌ها به سمت جواب بهتر سوق پیدا می‌کنند. الگوریتم زمانی خاتمه می‌یابد که تعداد تکرار الگوریتم برابر یک میزان از پیش تعریف شده برسد. در ادامه مؤلفه‌های الگوریتم به‌طور مفصل تشریح شده است.

- **تشکیل جمعیت اولیه**

برای یک مسئله بهینه‌سازی g با متغیرهای $v_1, v_2, \dots, v_D$، هر کرم شب‌تاب X_i آرایه‌ای از مقادیر ممکن برای متغیرهای مسئله است که به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$X_i = [x_1, x_2, \dots, x_D] \qquad (۹)$$

در این رابطه، متغیر D بیانگر ابعاد/ تعداد متغیرهای مسئله است. جمعیت اولیه مجموعه‌ای از N کرم شب‌تاب است که به‌صورت تصادفی در نقاط مختلف فضای جستجو پراکنده شده‌اند. در ابتدای کار، همه کرم‌ها مقدار شدت روشنایی یکسانی دارند.

- **محاسبه برازندگی**

برازندگی هر کرم شب‌تاب با ارزیابی تابع f بر روی مقادیر متغیرها، متناسب با تابع هدف مسئله محاسبه می‌شود:

$$f(X_i) = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \qquad (۱۰)$$

- به‌روزرسانی شدت روشنایی

جذابیت هر کرم شب‌تاب بر اساس میزان روشنایی آن مشخص می‌شود که بر اساس تابع هدف محاسبه می‌شود. میزان جذابیت هر کرم شب‌تاب بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

UNCORRECTED PROOF

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r_{i,j}^m} \approx \frac{\beta_0}{1+\gamma r_{i,j}^m} \qquad (۱۱)$$

در رابطه بالا، β_0 مقدار ماکزیمم جذابیت و γ ضریب جذب نور است. کرم‌های شب‌تاب به سمت کرم‌های روشن‌تر حرکت می‌کنند. پارامتر m یک عدد نامنفی بوده که درجه اهمیت فاصله را کنترل می‌کند. اگر $m=0$ باشد به این معنی است که جذابیت در هر فاصله‌ای به یک اندازه است. هر چه مقدار m افزایش یابد از میزان جذابیت کرم شب‌تاب به مقدار بیشتری کاسته می‌شود. $r_{i,j}$ فاصله بین کرم شب‌تاب i و j است که به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$r_{i,j} = \sqrt{(X_i - X_j)^2} \qquad (۱۲)$$

- **حرکت کرم شب‌تاب**

با فرض اینکه X_i^t و X_j^t به ترتیب نشان‌دهنده موقعیت کرم شب‌تاب i و j در تکرار t باشد، در این صورت حرکت کرم شب‌تاب i به سمت کرم شب‌تاب جذاب‌تر j بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$X_i^{t+1} = X_i^t + A + B \qquad (۱۳)$$

$$A = \beta . r_1 . (x_j^t - x_i^t) \qquad (۱۴)$$

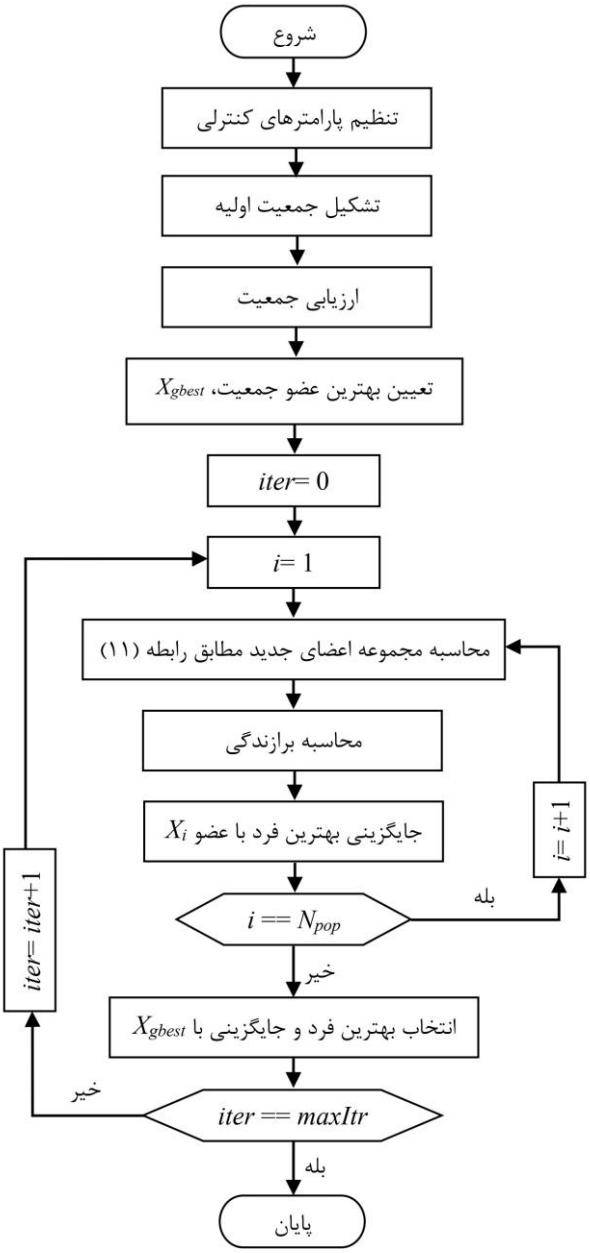
$$B = \alpha \varepsilon_i^t \qquad (۱۵)$$

عبارت A، میزان جذب کرم شب‌تاب X_j را کنترل می‌کند و عبارت B حرکت تصادفی کرم شب‌تاب X_i را شبیه‌سازی می‌کند. α ضریب جهش است و ε_i یک عدد تصادفی است که به‌وسیله توزیع گوسی یا توزیع یکنواخت محاسبه شده است. اگر $\beta = 0$، کرم شب‌تاب X_i به سمت کرم شب‌تاب j با یک گام تصادفی حرکت می‌کند.

الگوریتم، جذابیت مکان جدید کرم‌های شب‌تاب را با مکان‌های قبلی مقایسه می‌کند. اگر کرم شب‌تاب در مکان جدید جذابیت بیشتری داشته باشد، کرم شب‌تاب به مکان جدید منتقل می‌شود، در غیر این صورت کرم شب‌تاب در مکان قبلی بدون حرکت باقی می‌ماند. درخشنده‌ترین کرم شب‌تاب به‌صورت تصادفی بر اساس رابطه زیر حرکت می‌کند:

$$X_k^{t+1} = X_k^t + B \qquad (۱۶)$$

در رابطه بالا، X_k درخشنده‌ترین کرم شب‌تاب است. الگوریتم FF زمانی خاتمه می‌یابد که تعداد تکرار الگوریتم به یک تعداد از پیش تعریف شده برسد. پس از پایان الگوریتم، درخشنده‌ترین کرم به‌عنوان جواب بهینه مسئله در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۳): روندنما الگوریتم FF

CTED PROOF

الگوریتم GA و الگوریتم FF، هر دو در دسته بهینه‌سازهای فرااکتشافی مبتنی بر طبیعت قرار دارند، با این وجود، اصول کاری آن‌ها اساساً متمایز است. الگوریتم GA تکامل طبیعی داروین و اصول وراثت ژنتیکی را مدل‌سازی می‌کند و بر ترکیب و جهش استوار است. در مقابل، الگوریتم FF بر تقلید تعاملات اجتماعی و جذب نور کرم‌های شب‌تاب بنا شده و جستجو را از طریق حرکت پویای عامل‌ها به سمت نمونه‌های درخشان‌تر در فضای جستجو سازماندهی می‌کند. این تفاوت اساسی، رفتار جستجوی متفاوتی را در این الگوریتم‌ها ایجاد می‌کند. برای مسئله کاهشی PAPR با استفاده از PTS که یک چالش بهینه‌سازی ترکیبی است، مکانیسم جذب و حرکت در FF توازن بهینه میان استراتژی‌های کاوش (exploration) و اکتشاف (exploitation) در فضای بزرگ ترکیبات فاز ایجاد می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نیز این موضوع را تایید می‌کند که الگوریتم FF همگرایی سریع‌تر و کاهش موثر PAPR را دارد. بنابراین، الگوریتم FF صرفاً تقلیدی از GA نیست، بلکه یک استراتژی مستقل و مؤثر برای حل مسئله کاهش PAPR است.

۵-الگوریتم IFF-PTS

الگوریتم FF استاندارد تنها برای حل مسائل پیوسته ارائه شده است و نمی‌تواند مستقیماً بر روی مسائل گسسته همانند مسئله کاهش PAPR سیگنال‌های MIMO-OFDM اعمال شود. به همین منظور، ابتدا نسخه گسسته و بهبودیافته‌ای از الگوریتم کرم شب‌تاب (IFF[۱۴]) ارائه شده و سپس با روش PTS ترکیب شده است. روش پیشنهادی به اختصار IFF-PTS نامیده می‌شود. شکل ۳ ساختار روش IFF-PTS را نشان می‌دهد.

- **تشکیل جمعیت اولیه**

در الگوریتم IFF-PTS، هر کرم شب‌تاب شامل جایگشتی از شماره زیربلوک‌ها در محدوده $[1,\ V]$ است که V نشان دهنده تعداد زیربلوک‌ها در بردار فاکتورهای فاز است:

$$X_i = [x_{i1},\ x_{i2},\ \ldots,\ x_{iM}],\quad \forall x_{ij} \in [1,\ V] \qquad (۷)$$

هر عنصر $x_{ij} \in X_i$ نشان دهنده مکان یک عنصر در بردار فاز است. x_{ij} به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$x_{ij} = l_j + \phi_j (u_j - l_j) \qquad (۱۸)$$

l_j و u_j به ترتیب نشان دهنده حد پایین و حد بالای مقدار متغیر x_{ij} است. مقدار l_j برابر ۱ و مقدار u_j برابر V است. شکل زیر فردی را در جمعیت برای مقدار V=8 نشان می‌دهد.

$$X_i = [5\ 7\ 1\ 8\ 2\ 4\ 3\ 6]$$

هر زیربلوک در بردار فاز، شامل مقدار $\{\pm 1\}$ برای W=2، و مقدار $\{\pm 1,\ \pm j\}$ برای W=4 است. با فرض W=2، و با فرض اینکه بردار فاز به‌صورت زیر تعریف شده باشد:

$$S = [-1\ 1\ -1\ -1\ -1\ 1\ 1\ -1]$$

در این صورت، X_i معادل بردار زیر خواهد بود:

$$X = [-1\ 1\ -1\ -1\ 1\ -1\ -1\ 1]$$

- **محاسبه برازندگی**

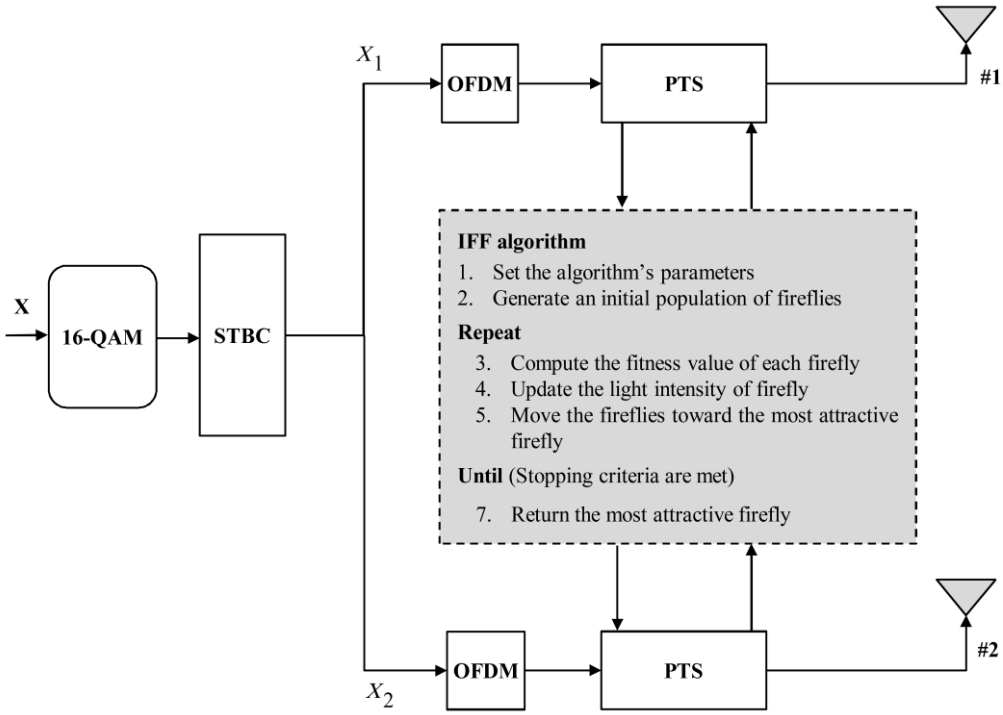
چالش اصلی در الگوریتم IFF-PTS، پیدا کردن مکان بهینه V فاکتور فاز است به‌نحوی‌که حداقل مقدار PAPR حاصل شود. برای محاسبه شایستگی هر عضو از جمعیت رابطه زیر تعریف شده است:

$$f(X_i) = \frac{1}{PAPR(X_i)} \qquad (۱۹)$$

در رابطه بالا، $PAPR(P_i)$ بر اساس رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

[14] Improved firefly algorithm

UNCORRECTED PROOF



شکل (۴): ساختار روش پیشنهادی IFF-PTS

- **به‌روزرسانی شدت روشنایی**

در الگوریتم FF، در هنگام محاسبه جذابیت عضو X_i فاصله اقلیدسی بین X_i و هر کدام از اعضای جذاب‌تر دیگر محاسبه می‌شود. در الگوریتم IFF-PTS، به‌جای کرم‌های شب‌تاب، تفاضل بین روشن‌ترین کرم شب‌تاب X_{gbest} با کرم شب‌تاب X_i محاسبه می‌شود.

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r_{i\,gbest}^{m}} \quad (۲۰)$$

$$r_{i\,gbest} = X_{gbest} - X_i \quad (۲۱)$$

استفاده از بهترین عضو در محاسبه فاکتور جذابیت β ، توانایی الگوریتم را در جستجوی نقاط مختلف و نیل به نقطه بهینه سراسری افزایش می‌دهد.

- **حرکت**

رابطه زیر برای محاسبه حرکت کرم شب‌تاب X_i تعریف شده است:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + A' + B' \quad (۲۲)$$

$$A' = \beta' . r_s . (X_{gbest}^t - X_i^t) \quad (۲۳)$$

$$B' = a - t\frac{a}{T} \quad (۲۴)$$

X_i^t و X_{gbest}^t به ترتیب نشان دهنده موقعیت کرم شب‌تاب i و جذاب‌ترین کرم شب‌تاب در تکرار t است. r_s عدد تصادفی آشوبی[15] است که با تابع نگاشت لاجستیک تولید شده است. تابع نگاشت لاجستیک به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$r_{s+1} = a.r_s(1-r_s) \quad (۲۵)$$

$r_s \in (0,1)$ عدد تصادفی s در دنباله آشوب را نشان می‌دهد، s اندیس دنباله آشوب را نشان می‌دهد. در تابع نگاشت لاجستیک، مقدار اولیه متغیر r_s می‌تواند هر مقداری بین ۰ و ۱ باشد، ولی نباید یکی از مقادیر ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ باشد. در آزمایش‌های صورت گرفته، a برابر ۴ در نظر گرفته شده است. تابع لاجستیک ویژگی‌های آشوبی مناسبی دارد، قابلیت تصادفی مناسبی فراهم می‌کند و الگوریتم را به نقاط مختلفی که در سرتاسر فضای جستجو پراکنده شده‌اند، هدایت می‌کند. به دلیل ماهیت غیرتکراری آشوب، استفاده از آن، جستجوی

[15] Chaotic random number

UNCORRECTED

جامع‌تر با سرعت بیشتری در مقایسه با جستجوی مبتنی بر احتمالات فراهم می‌کند.

در رابطه (۲۴)، t بیانگر تکرار فعلی، T تعداد بیشینه تکرار تا خاتمه الگوریتم و a یک ثابت عددی با مقدار اولیه ۲ است. B' به‌صورت خطی از ۲ تا صفر کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن متغیر B' در محاسبه مکان جدید X_i، در تکرارهای اولیه الگوریتم X_i با تغییرات تصادفی بیشتری در فضای راه‌حل حرکت می‌کند؛ به عبارت دیگر اطراف نقطه هدف بیشتر کاوش می‌شود. با کاهش مقدار پارامتر B' و نزدیک شدن به نقطه هدف، تغییرات مکانی X_i کاهش می‌یابد و به عبارتی قدرت اکتشاف در اطراف نقطه هدف بهبود می‌یابد. پس از محاسبه مکان جدید برای X_i، اگر در مکان جدید جذابیت بیشتری داشته باشد، به مکان جدید منتقل می‌شود، در غیر این صورت در مکان قبلی بدون حرکت باقی می‌ماند. پس از پایان الگوریتم، درخشنده‌ترین کرم به‌عنوان جواب بهینه مسئله در نظر گرفته می‌شود.

۶-ارزیابی روش پیشنهادی

بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی IFF-PTS در کاهش PAPR سیستم‌های MIMO-OFDM توسط نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته است. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم، منحنی‌های CCDF برای ۱۰،۰۰۰ فریم تصادفی از سمبل‌های مدوله شده 16-QAM به دست آمده‌اند. هر فریم شامل N=128 زیرحامل (سمبل) است و برای تولید سیگنال OFDM، عملگر IFFT با فاکتور L=4 بیش‌نمونه‌برداری می‌شود. فاکتورهای فاز از مجموعه‌های {±1, ±j} و {±1} انتخاب می‌شوند (w=2, 4).

تعداد آنتن‌ها برابر N_A=2 و در هر مسیر تعداد زیربلوک‌های PTS (V) برابر۴، ۸، و ۱۶ انتخاب می‌شوند. روش پیشنهادی با روش‌های GA-PTS، PSO-PTS، BSA-PTS، GWO-PTS، FF-PTS، و OPTS مقایسه شده است. اندازه جمعیت (N_P) و تعداد تکرار الگوریتم‌ها (I) برای تمامی الگوریتم‌ها یکسان و برابر ۲۰ منظور شده است. در جدول ۱، سایر پارامترهای کنترلی الگوریتم‌های مورد مقایسه آورده شده است.

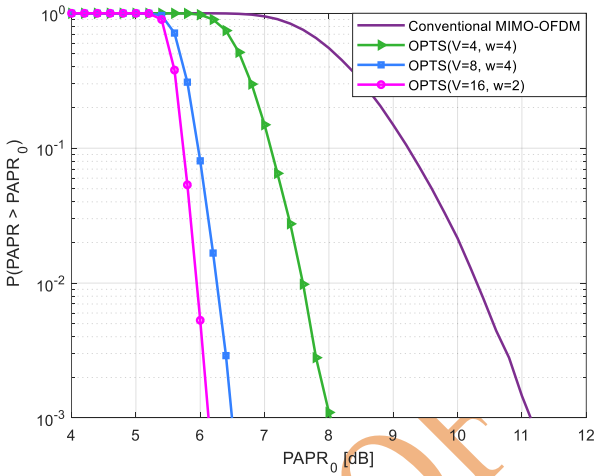
برتری الگوریتم FF به‌ویژه نسخه توسعه‌یافته آن، IFF نسبت به سایر الگوریتم‌های همتا همانند GA، PSO، ACO، GWO و ABC در توانایی آن برای ایجاد توازن مطلوب بین دو استراتژی کاوش و اکتشاف در فضای جستجوی گسسته است. این توازن، الگوریتم را قادر می‌سازد تا فاکتورهای فاز بهینه برای کمینه کردن PAPR را به‌صورت کارآمد پیدا کند. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در سناریوهای متعدد، کارایی برجسته الگوریتم IFF-PTS را در کاهش مقدار PAPR نسبت به سایر الگوریتم‌های مقایسه‌شده تأیید می‌کند.

جدول (۱): پارامترهای کنترلی الگوریتم‌های مورد مقایسه

الگوریتم	پارامترهای کنترلی
GA-PTS	$p_c = 0.7, p_m = 0.2$
PSO-PTS	$c_1 = 2, c_2 = 2$
BSA-PTS	mixrate= 1.0
GWO-PTS	$r_1 = r_2 = rand[0,1], a = rand[0,2], C = 2r_2, A = 2r_1 - a$
FF-PTS	γ=1, β=0.2, α=0.2, m=2
IFF-PTS	γ=1, β=0.2, α=0.2, m=2

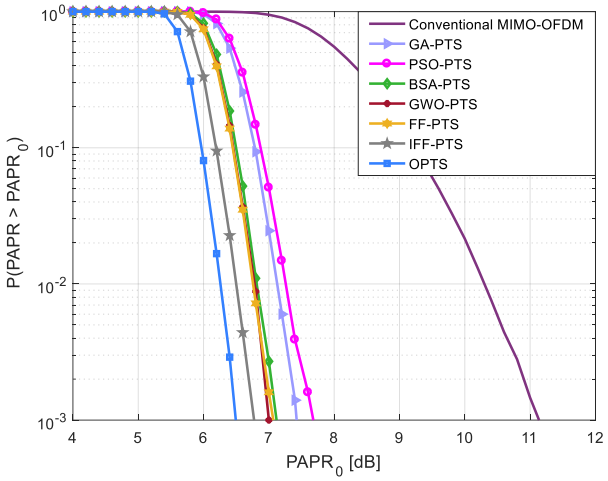
شکل ۵ عملکرد روش OPTS با جستجوی جامع را برای یک سیستم MIMO-OFDM نشان می‌دهد. در سیستم MIMO شبیه‌سازی‌ها با دو آنتن (N_A=2) انجام شده است و لذا پیچیدگی محاسباتی OPTS در آن دو برابر حالت OFDM یک ورودی- یک خروجی (SISO) است. مطابق شکل ۵، در سیستم MIMO-OFDM معمولی بدون تکنیک کاهش PAPR میزان PAPR در CCDF=10^{-3} تقریباً برابر با 11.2dB است که با روش OPTS و تعداد ۴، ۸، و ۱۶ زیربلوک به ترتیب به 8dB، 6.5dB، و 6.2dB کاهش می‌یابد.

UNCORRECTED PROOF



شکل (۵): مقایسه PAPR برای سیستم MIMO-OFDM با روش OPTS

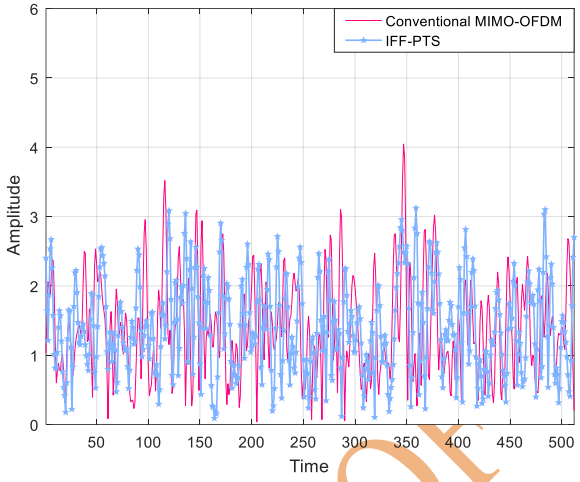
در شکل ۶ عملکرد روش IFF-PTS با روش‌های GA-PTS، PSO-PTS، BSA-PTS، GWO-PTS، FF-PTS، و OPTS در کاهش مقدار PAPR مقایسه شده است. در این شبیه‌سازی، تعداد زیربلوک‌ها برابر ۸ و فاکتورهای فاز $\{\pm 1, \pm j\}$ در نظر گرفته شده است. همان‌طوری‌که مشاهده می‌شود با پیچیدگی محاسباتی یکسان برای تمامی الگوریتم‌ها، IFF-PTS نسبت به سایر روش‌ها در کاهش PAPR عملکرد بهتری دارد. هر سه الگوریتم BSA-PTS، GWO-PTS، و FF-PTS تقریباً عملکرد یکسانی در کاهش PAPR دارند به‌طوری‌که با توجه به شکل ۵، در $CCDF=10^{-3}$، مقدار PAPR سیستم MIMO-OFDM با این سه روش تقریباً به 7dB کاهش یافته است. با روش OPTS مقدار PAPR تقریباً به مقدار 6.5dB کاهش یافته و روش پیشنهادی IFF-PTS میزان PAPR را به 6.8dB کاهش داده است. استفاده از OPTS با پیچیدگی محاسباتی بسیار بالا در مقایسه با IFF-PTS تنها حدود 0.3dB بهبود در مقدار PAPR دارد. در روش OPTS، پیچیدگی محاسباتی از مرتبه $N_A \times w^{V-1}=2\times 4^7=32{,}768$ و روش IFF-PTS شامل پیچیدگی محاسباتی $N_A \times N_P \times I=2\times 20\times 20=800$ است. روش پیشنهادی تنها $800/32{,}768=2.4\%$ پیچیدگی OPTS را دارد، اما مقدار PAPR را به میزان قابل‌توجهی کاهش داده است. نهایتاً با توجه به CCDF، به غیر از روش OPTS روش IFF-PTS بهترین عملکرد را از نظر کاهش PAPR دارد.



شکل (۶): مقایسه PAPR برای سیستم MIMO-OFDM با الگوریتم پیشنهادی و روش‌های مختلف (*V*=8, w=4)

شکل ۷ عملکرد روش IFF-PTS را در کاهش PAPR برای یک فریم تصادفی در حوزه زمان نشان می‌دهد. یک فریم از سمبل‌های مدوله شده حوزه فرکانس 16-QAM به طول ۱۲۸ حین عبور از عملگر IFFT به دلیل بیش‌نمونه‌برداری با فاکتور ۴، به فریمی به طول ۵۱۲ نمونه در حوزه زمان تبدیل شده‌اند. شکل ۷ اندازه این فریم را برای یک سیستم MIMO-OFDM متعارف و روش پیشنهادی نشان می‌دهد. در روش پیشنهادی، دنباله فاز بهینه به دست آمده از الگوریتم IFF-PTS در زیربلوک‌های متناظر ضرب شده و سیگنالی با حداقل PAPR تولید شده است. مقایسه منحنی‌ها نشان از حذف پیک‌های ناخواسته و کاهش مقدار PAPR است.

UNCORRECTED PROOF



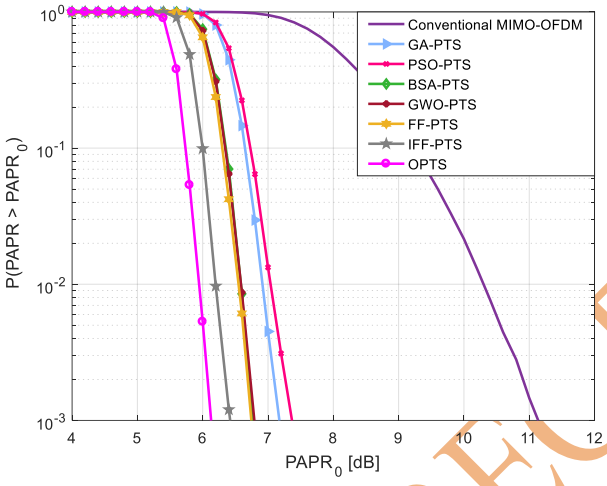
شکل (۷): مقایسه PAPR برای سیستم MIMO-OFDM و الگوریتم پیشنهادی IFF-PTS (V=8, w=4)

پیچیدگی محاسباتی الگوریتم‌های تکاملی که مبتنی بر جمعیت هستند اغلب بر اساس تعداد تکرار الگوریتم ضربدر اندازه جمعیت بیان می‌شود. به همین دلیل، پیچیدگی الگوریتم IFF برابر $O(I\times N_P)$ است که در آن I برابر حداکثر تعداد تکرار الگوریتم و N_P بیانگر اندازه جمعیت است. به همین صورت، پیچیدگی سایر الگوریتم‌ها برابر $O(I\times N_P)$ است. باید توجه کرد که در بیان پیچیدگی محاسباتی، تعداد عملگرهای هر کدام از الگوریتم‌ها و نیز زمان لازم برای انجام برخی محاسبات در نظر گرفته نشده است، زیرا زمان لازم برای این اعمال در مقابل محاسبه تابع ارزیابی برای هر عضو از جمعیت قابل چشم‌پوشی است.

شکل ۸ عملکرد روش IFF-PTS را در مقایسه با سایر روش‌ها نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی، تعداد زیربلوک‌ها برابر ۱۶ و فاکتورهای فاز {+1, -1} منظور شده است. مشابه نتایج به دست آمده در شکل ۶، با پیچیدگی محاسباتی یکسان برای تمامی الگوریتم‌ها، IFF-PTS عملکرد بهتری در کاهش PAPR دارد. با روش OPTS مقدار PAPR تقریباً به 6.2dB و با الگوریتم IFF-PTS میزان PAPR به 6.4dB کاهش یافته است. روش OPTS با پیچیدگی محاسباتی بسیار بالا در مقایسه با IFF-PTS تنها حدود 0.2dB بهبود برحسب معیار PAPR دارد. در روش OPTS، پیچیدگی محاسباتی از مرتبه 2×2^{15}=65,536 و IFF-PTS شامل پیچیدگی محاسباتی

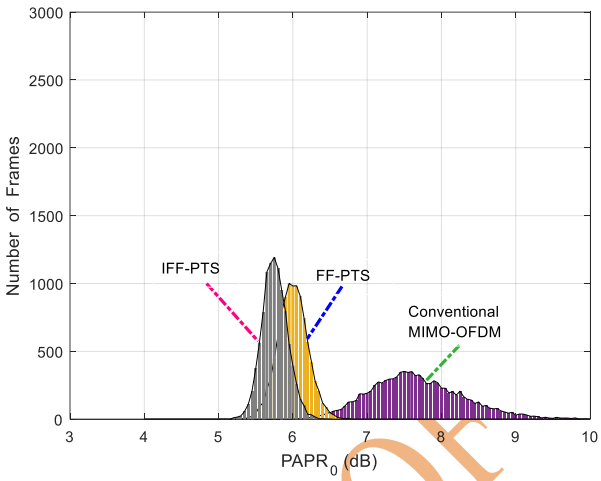
800 است. روش پیشنهادی تنها 1.2% پیچیدگی OPTS را دارد اما مقدار PAPR را به میزان مطلوبی کاهش داده است.

شکل ۹ هیستوگرام به دست آمده برای IFF-PTS را با FF-PTS در ۱۰،۰۰۰ فریم تصادفی مقایسه می‌کند. هیستوگرام به دست آمده نشان دهنده بالا بودن هر دو پارامتر میانگین و واریانس متغیر تصادفی PAPR برای روش متعارف MIMO-OFDM است. اگرچه مقدار واریانس PAPR برای هر دو الگوریتم FF-PTS و IFF-PTS تقریباً یکسان است اما میانگین متغیر برای IFF-PTS کمتر از روش FF-PTS است.



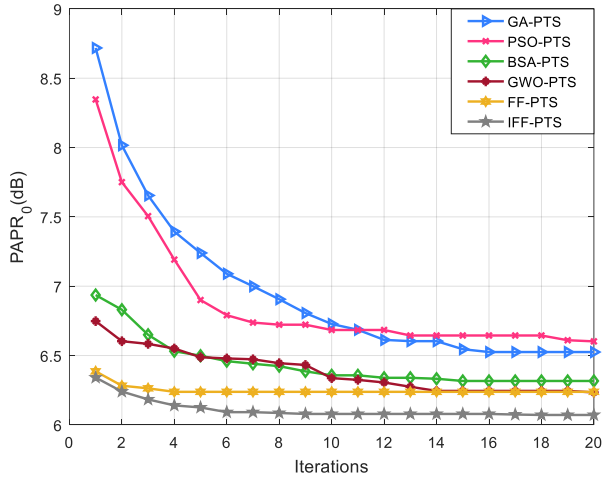
شکل (۸): مقایسه PAPR برای سیستم MIMO-OFDM با الگوریتم پیشنهادی و روش‌های مختلف (V=16, w=2)

UNCORRECTED PROOF

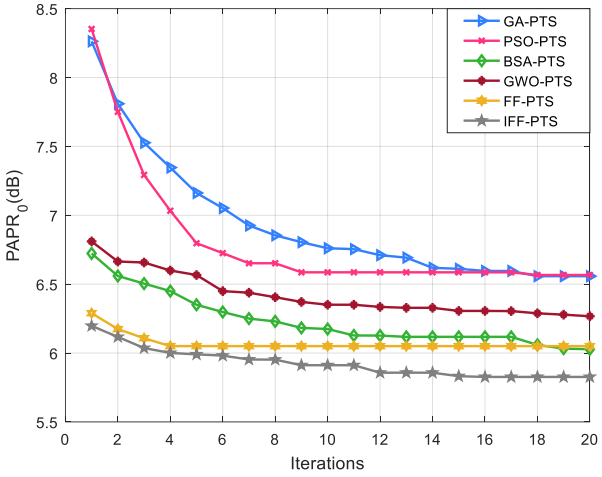


شکل (۹): مقایسه هیستوگرام‌های FF-PTS و IFF-PTS برای متغیر PAPR (*V*=16, w=2)

شکل ۱۰ نمودار همگرایی الگوریتم‌های مورد مقایسه را برای حالت *V*=8 و *w*=4 نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۱ نمودار همگرایی الگوریتم‌های مورد مقایسه را برای حالت *V*=16 و *w*=2 نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است، از نظر نرخ همگرایی الگوریتم IFF-PTS بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها دارد.



شکل (۱۰): مقایسه همگرایی الگوریتم‌ها در حالت *w*=4 و *V*=8



شکل (۱۱): مقایسه همگرایی الگوریتم‌ها در حالت *w*=2 و *V*=16

۷-نتیجه گیری

در این مقاله، الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب بهبود یافته (IFF) در تکنیک PTS برای کاهش PAPR در سیستم‌های MIMO-OFDM پیشنهاد شده است. الگوریتم پیشنهادی با روش اکتشافی، فاکتورهای فاز بهینه را برای کمینه‌سازی PAPR کاوش می‌کند. الگوریتم پیشنهادی IFF-PTS در عین داشتن پیچیدگی محاسباتی کمتر، عملکرد بهتری در کاهش PAPR دارد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که روش پیشنهادی یک تکنیک مؤثر در مسامحه بین کاهش PAPR و پیچیدگی محاسباتی است.

UNCORRECTED PROOF

مراجع

[1] R. Prasad, “OFDM for wireless communications systems”, Artech House, 2004.

[2] Cho, Y. S., Kim, J., Yang, W. Y., & Kang, C. G, “MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB”, John Wiley & Sons, 2010.

[3] Tan, M., Latinovic, Z., & Bar-Ness, Y, “STBC MIMO-OFDM peak-to-average power ratio reduction by cross-antenna rotation and inversion”, IEEE Communications Letters, vol. 9, no. 7, pp. 592-594, 2005.

[4] Y. Rahmatallah, S. Mohan, “Peak-to-average power ratio reduction in ofdm systems: A survey and taxonomy”, IEEE communications surveys & tutorials, vol. 15, no. 4, pp. 1567–1592, 2013.

[5] F. Sandoval, G. Poitau, F. Gagnon, “Hybrid peak-to-average power ratio reduction techniques: Review and performance comparison”, IEEE Access, vol. 5, pp. 27145–27161, 2017.

[6] H. . Saeedi, M. Sharif, and F. Marvasti. "Clipping noise cancellation in OFDM systems using oversampled signal reconstruction." IEEE Communications Letters, vol. 6, no. 2, pp. 73-75, 2002.

[7] M. F. Naeiny, and F. Marvasti. "Selected mapping algorithm for PAPR reduction of space-frequency coded OFDM systems without side information." IEEE transactions on Vehicular technology, vol. 60, no. 3, pp. 1211-1216, 2011.

[8] Y. A. Jawhar et al., "A Review of Partial Transmit Sequence for PAPR Reduction in the OFDM Systems," in IEEE Access, vol. 7, pp. 18021-18041, 2019.

[9] Y. -P. Tu and C. -W. Hsu, "A Low Complexity Dual-Phase Alternating Scheme is Used With the PTS Method to Reduce PAPR for B5G Systems," in IEEE Access, vol. 13, pp. 23971-23986, 2025.

[10] Y. A. Jawhar, L. Audah, M. A. Taher, K. N. Ramli, N. S. M. Shah, M. Musa, M. S. Ahmed, “A review of partial transmit sequence for papr reduction in the ofdm systems”, IEEE Access, vol. 7, pp. 18021–18041, 2019.

[11] M. H. Aghdam, A. A. Sharifi, “Papr reduction in ofdm systems: An efficient pts approach based on particle swarm optimization”, ICT Express, 2018.

[12] Lain, J. K., Wu, S. Y., & Yang, P. H, “PAPR reduction of OFDM signals using PTS: a real-valued genetic approach”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, no. 1, pp. 126, 2011.

[13] Wen, J. H., Lee, S. H., Huang, Y. F., & Hung, H. L, “A suboptimal PTS algorithm based on particle swarm optimization technique for PAPR reduction in OFDM systems”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, no. 14, *2008*.

[14] Y. Wang, W. Chen, C. Tellambura, “A papr reduction method based on artificial bee colony algorithm for ofdm signals”, IEEE transactions on wireless communications, vol. 9, no. 10, pp. 2994–2999, 2010.

[15] R. S. Rao, P. Malathi, “A novel pts: grey wolf optimizer-based papr reduction technique in ofdm scheme for high-speed wireless applications”, Soft Computing, vol. 23, no. 8, pp. 2701–2712, 2019.

[16] N. Taspinar, A. Kalinli, and M. Yildirim, “Partial transmit sequences for PAPR reduction using parallel Tabu search algorithm in OFDM systems”, *IEEE Communications Letters,* vol. *15, no.* 9, pp.974-976, 2011.

[17] M. Singh, S. K. Patra, “Partial transmit sequence optimization using improved harmony search algorithm for papr reduction in ofdm”, ETRI Journal, vol. 39, no. 6, pp. 782–793, 2017.

[18] J. Zhou, E. Dutkiewicz, R. P. Liu, X. Huang, G. Fang, Y. Liu, “A modified shuffled frog leaping algorithm for papr reduction in ofdm systems”, IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 61, no. 4, pp. 698–709, 2015.

UNCORRECTED PROOF

[19] B. S. de C. da Silva, P. H. C. de Souza and L. L. Mendes, "PAPR Reduction Technique for Mobile Communication Systems Using Neural Networks," in IEEE Latin America Transactions, vol. 23, no. 7, pp. 556-564, July 2025.

[20] K. Aleksei, B. Roman, I. Andrey, O. Alexander, and Y. Dmitry, “Machine Learning-Assisted PAPR Reduction in Massive MIMO,” IEEE Wireless Communications Letters, vol. 10, no. 3, pp. 537-541, 2021.

[21] Y. Huleihel and H. H. Permuter, “Low PAPR MIMO-OFDM Design Based on Convolutional Autoencoder,” in IEEE Transactions on Communications, vol. 72, no. 5, pp. 2779-2792, 2024.

[22] X. Yang. 2010. "Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimization", Int. J. Bio-Inspired Comput. vol. 2, no. 2, pp. 78–84, 2010.

UNCORRECTED PROOF