

طراحی و ارزیابی کارآیی روش‌های کاهش PAPR در لینک فروسوی سیستم‌های OFDM-NOMA بر پایه ارسال جزئی دنباله

رضا سیاری^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ جعفر پورروستم^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - rezasayyari98@ms.tabrizu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - j.pourrostam@tabrizu.ac.ir

چکیده: ظهور تکنولوژی‌های جدید مانند اینترنت اشیا و سیستم‌های جدید مخابرات و پخش بی‌سیم نیاز به نرخ داده بالاتر، اتصال گسترده، پوشش بهتر و بقیه بهبودها را دو چندان کرده است. سیستم ادغام تقسیم فرکانسی متعامد (OFDM) بر اساس دسترسی چندگانه غیرمتعامد (NOMA) یکی از روش‌های نویدبخش برای استفاده در لایه فیزیکی سیستم‌های مخابراتی جدید است. با استفاده از روش مدولا سیون تقسیم فرکانسی متعامد، تداخل بین سمبلی بوجود آمده به دلیل گستره تأخیر کانال بی‌سیم حذف و نرخ ارسال داده بالا قابل دسترسی می‌شود. از طرف دیگر، در روش دسترسی چندگانه غیرمتعامد با اشتراک گذاری منابع فرکانسی بین چندین کاربر، بهره‌وری طیفی سیستم افزایش می‌یابد. به همین دلیل، سیستم‌های ادغام تقسیم فرکانسی متعامد بر اساس دسترسی چندگانه غیرمتعامد می‌توانند نرخ داده را در سیستم‌های نوین مخابراتی به شکل قابل توجهی افزایش دهند. نسبت بیشینه توان به میانگین توان (PAPR) بالا یکی از مشکلات اصلی سیستم‌های ادغام تقسیم فرکانسی متعامد است که باعث می‌شود تقویت کننده توان در ناحیه غیرخطی کار کند و کارآیی سیستم کاهش یابد. بدلیل خواص خاص سیستم‌های OFDM-NOMA، بیشتر روش‌های کاهش PAPR مناسب این سیستم‌ها نیستند. در این مقاله، عملکرد سه روش مختلف کاهش PAPR بر اساس روش ارسال جزئی دنباله (PTS) را برای استفاده در لینک فروسو سیستم OFDM-NOMA مورد مطالعه و بررسی قرار می‌دهیم. هر کدام از روش‌های پیشنهاد شده را به کمک بلوک دیاگرام‌های مربوطه توصیف می‌کنیم. در نهایت، مناسب‌ترین روش را از لحاظ پیچیدگی محاسباتی، کاهش PAPR و نرخ خطای بیت برای استفاده در لینک فروسو سیستم‌های OFDM-NOMA پیشنهاد می‌کنیم.

واژه‌های کلیدی: ادغام تقسیم فرکانسی متعامد، دسترسی چندگانه غیرمتعامد، نسبت بیشینه توان به میانگین توان، ارسال جزئی دنباله.

Design and Performance Evaluation of PTS-Based PAPR Reduction Methods for the Downlink of OFDM-NOMA Systems

Reza Sayyari¹, MSc Student; Jafar Pourrostam², Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: rezasayyari98@ms.tabrizu.ac.ir

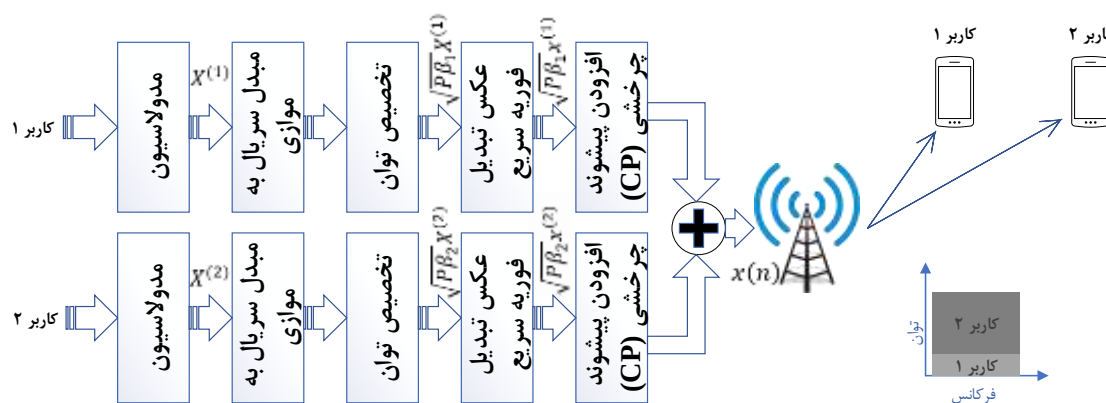
2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: j.pourrostam@tabrizu.ac.ir

Abstract: Advent of new systems, such as the Internet of Things (IoT) and novel communication and broadcasting systems, calls for higher data rates, massive connectivity, better cell coverage, and other improvements. Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) and non-orthogonal multiple access (NOMA) are amongst the promising modulation and multiple access schemes which are candidates to be implemented in the physical layer of the new systems. High data rates are achievable via OFDM which mitigates Inter-Symbol Interference (ISI) caused by the delay spread of the wireless channels. On the other hand, NOMA improves the spectral efficiency of the system by allowing users to share frequency band resources. Therefore, OFDM based NOMA (OFDM-NOMA) techniques have the potential to considerably increase the attainable data rate in novel communication systems. High peak-to-average power ratio (PAPR) is one of the issues in OFDM systems which makes high-power amplifier (HPA) to work in the non-linear region and degrades system performance. Due to the special properties of OFDM-NOMA systems, most of the PAPR reduction methods are not suitable for them. In this paper, we analyze the performance of three PTS-based PAPR reduction methods in OFDM-NOMA systems. Functional block diagram of these schemes is presented. Finally, we will compare their computational complexity, PAPR reduction, and system bit error rate (BER) performance to select the most proper PAPR reduction scheme for OFDM-NOMA systems.

Keywords: New Generation of Wireless Systems, Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA), Peak-to-Average Power Ratio (PAPR), Partial Transmit Sequence (PTS).

نام نویسنده مسئول: جعفر پورروستم

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بهمن ۲۹ - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر



شکل ۱: بلوک دیاگرام لینک فروسو سیستم OFDM-NOMA

۱- مقدمه

چالش‌های سیستم‌های ادغام تقسیم فرکانسی متعامد، PAPR یا نسبت توان بیشینه به میانگین توان بالا است که باعث می‌شود تقویت کننده توان در ناحیه غیرخطی خود کار کند. اشباع تقویت کننده توان، بهره‌وری و طول عمر باتری‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین باعث اعوجاج سیگنال و پخش‌شدگی فرکانسی می‌شود [۳]. به همین دلایل مطلوب است که قبل از تقویت کننده توان در فرستنده، میزان PAPR کاهش داده شود. سه دسته از روش‌ها برای کاهش PAPR وجود دارد. اولین و ساده‌ترین روش، روش برش و فیلتر کردن تکراری [۴] است. در این روش، ابتدا سیگنال در حوزه زمان برش داده می‌شود تا میزان PAPR آن کاهش یابد. [۵] ترکیبی از روش برش و فیلتر کردن تکراری و روش بهبودیافته فشرده سازی غیرخطی^۵ را برای کاهش PAPR ارائه می‌دهد. مرجع [۶] مسئله کاهش PAPR با استفاده از روش برش و فیلتر کردن تکراری را به چندین مسئله کوچک‌تر بهینه‌سازی با قید PAPR تقسیم می‌کند تا با حداقل اعوجاج، میزان PAPR را کاهش دهد. این برش در حوزه زمان باعث اعوجاج سیگنال و پخش‌شدگی فرکانسی می‌شود و در نتیجه نرخ خطای بیت سیستم افزایش می‌یابد. پخش‌شدگی فرکانسی را می‌توان با فیلتر کردن برطرف کرد، اما فیلتر کردن باعث افزایش دوباره PAPR می‌شود. با تکرار این روش می‌توان PAPR را تا میزان قابل توجهی کاهش داد و از پخش‌شدگی فرکانسی جلوگیری کرد اما اعوجاج را نمی‌توان حذف کرد. به دلیل اعوجاج، روش‌های فوق مناسب سیستم‌های OFDM-NOMA نمی‌باشند چراکه در روش حذف تداخل پی‌درپی، خطا در آشکارسازی دیتای یک کاربر باعث خطا در آشکارسازی دیتای مابقی کاربران با سطوح توان کمتر می‌شود.

نرخ ارسال داده و ظرفیت مخابراتی بالا یکی از نیازهای اساسی شبکه‌های جدید مخابراتی است. روش ادغام تقسیم فرکانسی متعامد بر اساس دسترسی چندگانه غیرمتعامد بهره‌وری طیفی سیستم را با حذف تداخل بین سمبلی^۱ در کانال‌های فرکانس‌گزين و اشتراک‌گذاری منابع طیفی مشترک به چندین کاربر افزایش می‌دهد. در ادغام تقسیم فرکانسی متعامد، کل پهنای‌بند به زیرکانال‌های مختلفی تقسیم می‌شود که در هرکدام از زیرکانال‌ها محوشدگی از نوع تخت می‌باشد و در نتیجه، نرخ داده بالا بدون نیاز به گیرنده‌های پیچیده قابل دسترسی می‌شود. از طرف دیگر، دسترسی چندگانه غیرمتعامد به کاربران این امکان را می‌دهد که زیرکانال‌های مختلف با فرکانس یکسان را به طور همزمان استفاده کنند. برای ارسال همزمان اطلاعات چندین کاربر در یک باند فرکانسی، دیتای هرکدام از کاربران را با سطوح مختلف توان ارسال می‌کنیم که به این روش NOMA حوزه توان گویند [۱]. همچنین در این روش برای بهبود عدالت بین کاربران، کاربرانی که شرایط کانال بهتری دارند نسبت کمتری از توان را در مقایسه با کاربرانی که شرایط کانال بدتری دارند دریافت می‌کنند. در این روش، اطلاعات کاربران در فرستنده بوسیله کدگذاری برهم نهی^۲ به طور همزمان ارسال می‌شود. در گیرنده هرکدام از کاربران اطلاعات مربوط به خود را بوسیله روش حذف تداخل پی‌درپی^۳ کدگشایی می‌کنند. مراجع [۱] و [۲] به بررسی کلی روش‌های دسترسی چندگانه غیر متعامد و ادغام تقسیم فرکانسی متعامد پرداخته‌اند.

دسته دوم، شامل روش‌های پیش کدگذاری^۶ مانند تبدیل گسسته کسینوسی [۷] و تبدیل گسسته سینوسی [۸] می‌شود. این روش‌ها با کاهش میزان خودهمبستگی بین دیتای مدوله شده کاربران، PAPR را کاهش می‌دهند. به دلیل ضرب ماتریسی، با افزایش تعداد زیرحامل‌ها، پیچیدگی محاسباتی این روش‌ها نیز به شدت افزایش می‌یابد. [۹] با ترکیب روش پیش کدگذاری تبدیل فوری گسسته و شکل دهی پالس حداقل کلید زنی گاوسی^۷، میزان کاهش PAPR سیستم را افزایش و در عین حال نرخ خطای سمبل سیستم را کاهش می‌دهد. مرجع [۱۰] یک

بکارگیری همزمان روش‌های ادغام تقسیم فرکانسی متعامد با دسترسی چندگانه غیرمتعامد این امکان را در سیستم‌های مخابراتی نوین ایجاد می‌کند که بهره‌وری طیفی را بهبود بدهند و به نرخ داده بالایی دست‌یابند. شکل ۱ ساختار یک سیستم OFDM-NOMA را در لینک فروسو^۴ نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ایستگاه پایه با تکنیک NOMA حوزه توان دیتای کاربران مختلف را همزمان در یک باند فرکانسی اما با سطوح مختلف توان ارسال می‌کند. یکی از

۲- مدل سیستم

در این مقاله، فرض می‌کنیم یک شبکه تک سلولی با ۲ کاربر داریم که به صورت همزمان و در باند فرکانسی یکسان سیگنال ارسالی از ایستگاه پایه را دریافت می‌کنند. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، کاربر ۱ شرایط کانال بهتری در مقایسه با کاربر ۲ دارد. می‌توانیم سیگنال حوزه زمان ارسال شده از سمت ایستگاه پایه را به صورت زیر نشان دهیم:

$$x(n) = \sqrt{P\beta_1}x^{(1)}(n) + \sqrt{P\beta_2}x^{(2)}(n), \quad (1)$$

که در آن P بیانگر توان کل تخصیص داده‌شده و β_i ضریب توان تخصیص داده‌شده به کاربر i می‌باشد به طوریکه $\beta_1 + \beta_2 = 1$ و $\beta_2 > \beta_1$. $x^{(i)}(n)$ را سیگنال مختلط با مدولاسیون OFDM مربوط به کاربر i تعریف می‌کنیم و به صورت زیر نشان می‌دهیم:

$$x^{(i)}(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k^{(i)} e^{j2\pi kn/N}, \quad 0 \leq n \leq N-1, \quad (2)$$

که در آن N تعداد زیرحامل‌ها و $[X_1^{(i)}, X_2^{(i)}, \dots, X_N^{(i)}]$ سمبل‌های دیتای کاربر i است که از فضای سیگنال یکی از روش‌های مدولاسیون دیجیتال، مانند کلید زنی انتقال فاز (PSK) یا مدوله سازی دامنه تربیعی (QAM)، انتخاب شده است.

نسبت توان بیشینه به میانگین توان یک سیگنال زمان گسسته، مانند آنچه در رابطه (۱) بیان شده است، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{PAPR} = \frac{\max \{ |x(n)|^2 \}}{E \{ |x(n)|^2 \}}. \quad (3)$$

برای محاسبه دقیق‌تر PAPR یک سیگنال زمان گسسته لازم است که بیش نمونه‌برداری^{۱۷} انجام دهیم. همانطور که در مرجع [۲۳] نشان داده شده است، بیش نمونه‌برداری با ضریب ۴ برای بدست آوردن PAPR دقیق کافی است. به همین دلیل، در این تحقیق از نمونه برداری ۴ برابری استفاده می‌کنیم. بیش نمونه‌برداری با اضافه کردن صفر به دنباله سمبل‌ها و محاسبه عکس تبدیل فوریه سریع^{۱۸} $4N$ نقطه ای بدست می‌آید.

۳- ارسال جزئی دنباله

در این بخش، ابتدا سه روش معمول تجزیه به چندین زیربلوک را معرفی می‌کنیم. سپس به معرفی روش‌های کاهش PAPR بر پایه ارسال جزئی دنباله می‌پردازیم. روش اول به عنوان روش پایه، روش دوم بخاطر پیچیدگی محاسبات کمتر و روش سوم به عنوان کارآمدترین روش معرفی می‌شود.

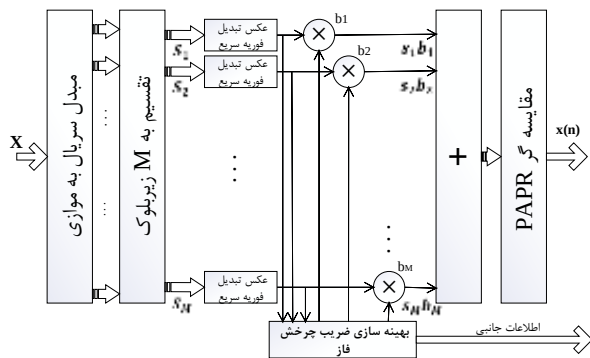
۳-۱- تجزیه به چند زیربلوک در روش ارسال جزئی دنباله

سه روش برای تجزیه ورودی به چندین زیربلوک در روش ارسال جزئی دنباله وجود دارد. روش اول، تجزیه شبه تصادفی (pseudo-random) است که در آن ورودی‌ها به صورت تصادفی در زیربلوک‌های مختلف قرار

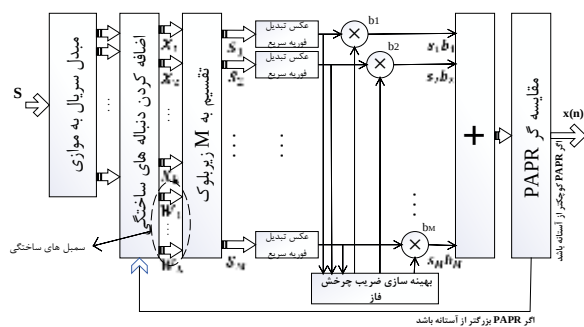
بررسی جامع در مورد استفاده از روش‌های پیش کدگذاری در سیستم‌های OFDM-NOMA را ارائه می‌دهد.

سومین دسته از روش‌های کاهش نسبت توان بیشینه به میانگین توان، روش‌های درهم سازی سیگنال^۸ مانند نگاشت انتخابی^۹ [۱۱] و ارسال جزئی دنباله^{۱۰} [۱۲] است. پیچیدگی محاسباتی این روش‌ها زیاد است. علاوه بر آن، در این روش‌ها نیاز است که اطلاعات اضافی را برای کدگذاری دیتا در سمت گیرنده ارسال شود. [۱۳] یک روش درهم سازی سیگنال، بر پایه روش تکامل هوشمند چند شیئی کوانتومی^{۱۱} ارائه داده است تا پیچیدگی محاسباتی را کاهش دهد. در روش ارسال جزئی دنباله، ابتدا سمبل‌های ورودی به تعدادی زیربلوک تقسیم می‌شود. سپس هر کدام از زیربلوک‌ها در یکی از ضرایب چرخش فاز^{۱۲} ضرب می‌شود و زیربلوک‌های حاصل باهم جمع می‌شوند. بعد از ضرب تمام حالات ممکن چرخش فاز و ساخت تمام سیگنال‌های ممکن، سیگنالی که کمترین PAPR را داشته باشد انتخاب و ارسال می‌شود. مراجع [۱۴]-[۱۷] با بهینه‌سازی انتخاب ضرایب چرخش فاز، پیچیدگی محاسباتی روش ارسال جزئی دنباله را کاهش می‌دهند. روش‌های مختلف ارسال جزئی دنباله در [۱۸] مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

بیشتر روش‌های کاهش PAPR دارای اعوجاج زیادی هستند و نرخ خطای بیت سیستم را افزایش می‌دهند. از طرف دیگر، بدلیل خاصیت روش حذف تداخل پی‌درپی، سیستم‌های OFDM-NOMA دارای انتشار خطای^{۱۳} زیادی هستند. در این مقاله، عملکرد سه روش مختلف کاهش PAPR بر پایه روش ارسال جزئی دنباله را در سیستم‌های OFDM-NOMA مورد بررسی و مطالعه قرار می‌دهیم. روش اول، روش معمول ارسال جزئی دنباله با ضرایب چرخش فاز محدود شده [۱۹] است که به عنوان روش پایه معرفی شده است. روش دوم، روش ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌ی ساختگی^{۱۴} [۲۰] است که حاصل ترکیب دو روش ارسال جزئی دنباله و افزودن دنباله‌ی ساختگی [۲۱] می‌باشد و بخاطر پیچیدگی محاسباتی کمتر پیشنهاد شده است. سومین روش پیشنهاد شده، روش دنباله انتقال یافته دورانی^{۱۵} [۲۲] می‌باشد که تکامل یافته روش ارسال جزئی دنباله است و مؤثرترین روش از لحاظ کاهش PAPR می‌باشد و نیازی به ارسال اطلاعات اضافی به گیرنده برای کدگذاری سیگنال ارسالی ندارد. هر کدام از روش‌های پیشنهاد شده با استفاده از دیگرام بلوکی توضیح داده می‌شود و با استفاده از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری و نمودار خودهمبستگی متناوب^{۱۶} مقایسه می‌شوند. در نهایت، با توجه به نتایج بدست آمده و مقایسه عملکرد هر کدام از روش‌های کاهش PAPR، مناسب‌ترین روش را برای استفاده در سیستم‌های OFDM-NOMA پیشنهاد می‌کنیم. ساختار مابقی مقاله بدین شرح است: در بخش ۲ مدل سیستم OFDM-NOMA توصیف می‌شود. سه روش پیشنهاد شده در بخش ۳ توضیح داده می‌شود. ارزیابی پیچیدگی و کارایی روش‌های پیشنهاد شده و نتیجه‌گیری به ترتیب در بخش‌های ۴ و ۵ گنجانده شده است.



شکل ۳: بلوک دیاگرام روش معمول ارسال جزئی دنباله



شکل ۴: بلوک دیاگرام روش معمول ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌ی ساختگی

علیرغم کاهش PAPR قابل قبول در این روش، محاسبات زیادی برای پیدا کردن ضرایب چرخش فاز مناسب لازم است. علاوه بر این، ضرایب چرخش فاز انتخاب شده نیز باید به گیرنده ارسال شود تا بتواند سیگنال را به درستی کدگذاری بکند که این عمل باعث کاهش بهره‌وری طیفی و افزایش نرخ خطای بیت سیستم می‌شود.

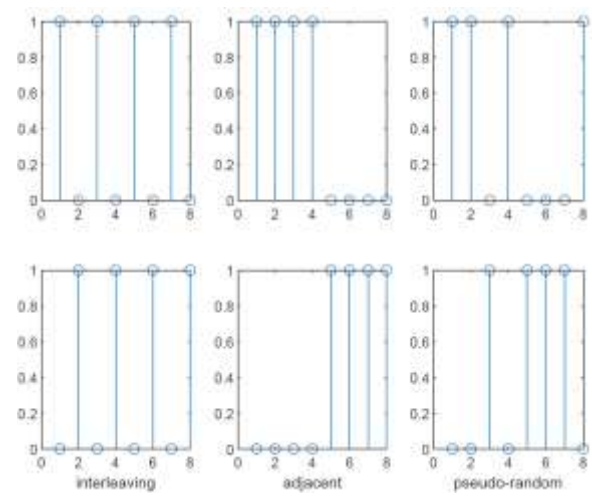
۳-۳- روش ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌ی ساختگی

بلوک دیاگرام روش ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌ی ساختگی در شکل ۴ نشان داده شده است. با مقایسه شکل‌های ۳ و ۴ می‌توان مشاهده کرد که در روش ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌های ساختگی قبل از تجزیه به M زیر بلوک، تعدادی سمبل ساختگی به دنباله ورودی در حوزه فرکانس اضافه شده است. بردار ورودی حوزه فرکانس مربوط به کاربر i بعد از اضافه کردن دنباله ساختگی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$S^{(i)} = [X_1^{(i)}, X_2^{(i)}, \dots, X_K^{(i)}, W_1^{(i)}, W_2^{(i)}, \dots, W_L^{(i)}], \quad (5)$$

که در آن K تعداد سمبل‌های اطلاعات، L تعداد سمبل‌های ساختگی، و $L + K = N$ است.

با تولید اولین سیگنال، میزان PAPR اندازه‌گیری می‌شود. اگر از یک حد آستانه‌ای کمتر باشد، سیگنال ارسال می‌شود. در غیر اینصورت سیگنال جدیدی با دنباله ساختگی دیگر تولید می‌شود و میزان PAPR دوباره اندازه‌گیری می‌شود. این عمل تا پیدا کردن سیگنالی که PAPR



شکل ۲: روش‌های تجزیه به زیر بلوک

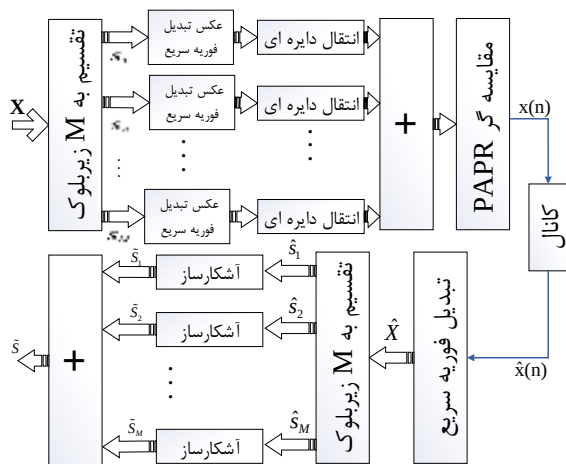
می‌گیرد. روش بعدی، تجزیه مجاورتی (adjacent) است که در آن $\frac{N}{M}$ ورودی مجاور در یک زیر بلوک قرار می‌گیرد. M برابر تعداد زیر بلوک‌های تجزیه شده است. روش سوم، روش تجزیه جاگذاری (interleaving) می‌باشد که در آن ورودی‌ها با فواصل یکسان در M زیر بلوک قرار می‌گیرند. از سه روش بالا، روش تجزیه شبه تصادفی بیشترین میزان کاهش PAPR را نتیجه می‌دهد. در رده بعدی، روش تجزیه مجاورتی قرار می‌گیرد و کمترین کاهش هم مربوط به روش تجزیه interleaving می‌باشد اما کمترین پیچیدگی محاسباتی را هم در مقایسه با دو روش قبلی داراست [۱۸]. شکل ۲ سه روش تجزیه مذکور را نشان می‌دهد.

۳-۲- روش معمول ارسال جزئی دنباله

در روش معمول ارسال جزئی دنباله، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، ابتدا بلوک ورودی به M زیر بلوک تجزیه می‌شود. سپس هر کدام از زیر بلوک‌ها از عملگر عکس تبدیل فوری سریع عبور می‌کند تا از حوزه فرکانس به حوزه زمان تبدیل شود. سپس هر کدام از سیگنال‌های حوزه زمان در ضریب چرخش فاز خاصی مانند b_m ضرب می‌شود. ضرایب چرخش فاز از رابطه ذیل بدست می‌آید:

$$b_m \in \left\{ e^{\frac{j2\pi v}{V}} \mid v=0, 1, \dots, V-1 \right\}, \quad (4)$$

که در آن V برابر تعداد کل ضرایب چرخش ممکن است. روشن است که می‌توانیم V^M سیگنال مختلف با ضرب V ضریب چرخش فاز متفاوت در هر کدام از M زیر بلوک و جمع آن‌ها بدست آوریم. بنابراین نتایج بدست آمده در مرجع [۱۹] ضرایب چرخش فاز از مجموعه‌های $\{1, -1, j, -j\}$ یا $\{1, -1\}$ انتخاب می‌شود تا پیچیدگی محاسباتی کاهش یابد. با توجه به خاصیت خطی عملگر عکس تبدیل فوری سریع، ضرایب چرخش فاز را می‌توان در سیگنال حوزه زمان یا در سیگنال حوزه فرکانس ضرب کرد. بعد از بدست آوردن تمام سیگنال‌های ممکن، سیگنال با کمترین مقدار PAPR انتخاب و ارسال می‌شود.



شکل ۵: بلوک دیاگرام روش دنباله انتقال یافته دورانی

فاز، سیگنال‌های جدید با استفاده از انتقال دورانی هرکدام از زیربلوک‌های حوزه زمان و ترکیب آن‌ها ساخته می‌شود. در نهایت سیگنالی که کم‌ترین PAPR را دارد برای ارسال انتخاب می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، روش‌های معمول ارسال جزئی دنباله و ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌ی ساختگی نیاز به عملیات جمع و ضرب زیادی دارند درحالی‌که در روش دنباله انتقال یافته دورانی نیازی به ضرب نیست و در نتیجه پیچیدگی محاسباتی کمتری دارد. همچنین، در این روش می‌توان تعداد سیگنال‌های بیشتری برای محاسبه میزان PAPR تولید کرد. برخلاف روش‌های معمول ارسال جزئی دنباله و ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌ی ساختگی، روش دنباله انتقال یافته دورانی نیازی به ارسال اطلاعات اضافه به گیرنده برای کدگذاری سیگنال ارسالی ندارد و به همین دلیل بهره‌وری طیفی بهتری دارد که یکی از اصلی‌ترین دلایل استفاده از سیستم‌های OFDM-NOMA می‌باشد. علاوه، کاهش PAPR بهتری در مقایسه با روش‌های قبلی دارد. همه‌ی این خصوصیات، روش دنباله انتقال یافته دورانی را به یکی از بهترین روش‌های کاهش PAPR در سیستم‌های OFDM-NOMA تبدیل می‌کند.

برای بازیابی اطلاعات در سمت گیرنده، بدون ارسال اطلاعات اضافه، باید ابتدا بتوانیم تشخیص دهیم روی کدام زیر بلوک‌ها عمل انتقال دورانی صورت گرفته است. سپس تعیین کنیم هر کدام از این زیر بلوک‌ها چه میزان انتقال دورانی یافته‌اند یعنی کدام عضو از زیرمجموعه انتقال-های دورانی ممکن برای زیر بلوک m -ام انتخاب شده‌است.

فرض کنید زیر بلوک m -ام را به اندازه k انتقال دورانی داده‌ایم. با استفاده از خاصیت خطی عکس تبدیل فوری، داریم:

$$\tilde{s}_m(k) = \text{circular}(s_m, k) = \text{IFFT}(P_m(k) \odot S_m), \quad (\lambda)$$

که در آن $\odot$ نشانگر عمگنر ضرب المان به المان، δ_m سیگنال حوزه زمان زیربلوک m -ام و $\tilde{\delta}_m$ سیگنال حوزه زمان زیربلوک m -ام بعد از k انتقال دورانی است. $P_m(k)$ بردار ضرایب چرخش فاز برای زیربلوک m به صورت زیر تعریف می‌شود:

کمتر از حد آستانه داشته باشد، ادامه می‌یابد. اگر چنین سیگنالی موجود نبود، سیگنال با کمترین میزان PAPR انتخاب و ارسال می‌شود.

در این روش به دلیل اضافه کردن دنباله‌ی ساختگی، فقط به نصف عملگرهای عکس تبدیل فوریه سریع مورد نیاز در روش معمول ارسال جزئی دنباله نیاز داریم [۲۰]. بنابراین پیچیدگی محاسباتی این روش خیلی کمتر از روش معمول می‌باشد.

روش‌های مختلفی را برای تولید دنباله ساختگی وجود دارد. در روش اول، ابتدا یک دنباله تماماً ۱ تولید می‌شود. اگر میزان PAPR کمتر از حد آستانه نبود، برای ساخت دنباله‌های ساختگی جدید به ترتیب هر کدام از بیت‌ها را به صفر تغییر می‌دهیم. روش دوم نیز مشابه روش فوق می‌باشد، با این تفاوت که دنباله اولیه ساخته شده، تماماً صفر می‌باشد و برای ساختن دنباله‌های جدید، صفرها را به ترتیب به ۱ تبدیل می‌کنیم. در روش سوم، از دنباله همبستگی که به طور معکوس متناظر با بیت‌های اول هر زیربلوک می‌باشد، استفاده می‌کنیم. برای ساخت دنباله ساختگی جدید، بیت‌های انتخاب شده در هر زیربلوک را به ترتیب عوض می‌کنیم. روش آخر و مؤثرترین روش، استفاده از دنباله‌های مکمل به عنوان دنباله ساختگی است. این روش بیشترین میزان کاهش PAPR را در مقایسه با ۳ روش قبلی دارد. در این مقاله، برای محاسبه دنباله‌های ساختگی از این روش استفاده خواهیم کرد که به صورت زیر تعریف می‌شود.

تعریف ۱: اگر $\mathbf{u} = [u_0, u_1, \dots, u_{N-1}]$ یک دنباله مختلط به طول N باشد، در آن صورت تابع خودهمبستگی متناوب دنباله $\mathbf{u}$ به صورت زیر خواهد بود:

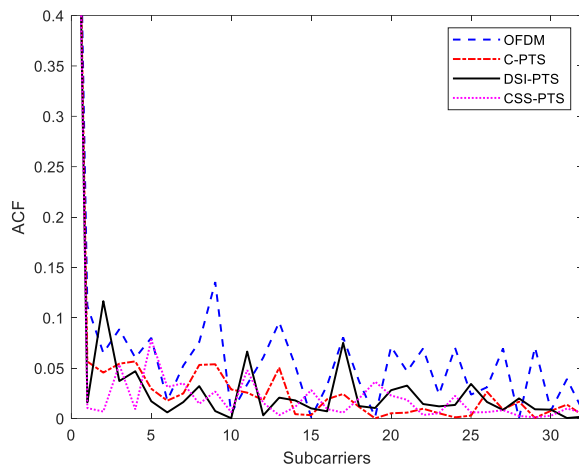
$$C_{\mathbf{u}, \mathbf{u}}(\tau) = \begin{cases} \sum_{k=0}^{N-1-\tau} u_k u_{k+\tau}^* & , 0 \leq \tau \leq N-1 \\ \sum_{k=0}^{N-1+\tau} u_{k-\tau} u_k^* & , 1-N \leq \tau < 0 \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

تعریف ۲: فرض کنید $\mathbf{q}$ و $\mathbf{p}$ دو دنباله مختلط با طول N باشند. این دو دنباله را دنباله مکمل گلاي^{۱۹} می‌گوییم اگر [۲۴]:

$$C_{\mathbf{p},\mathbf{p}}(\tau) + C_{\mathbf{q},\mathbf{q}}(\tau) = \begin{cases} 0, & \tau \neq 0 \\ 2N, & \tau = 0 \end{cases}. \quad (\text{V})$$

۳-۴- روش دنباله انتقال یافته دورانی

روش دنباله انتقال یافته دورانی یکی از مؤثرترین روش‌های کاهش PAPR می‌باشد. همانطور که در شکل ۵ ملاحظه می‌کنید، در این روش، همانند روش معمول ارسال جزئی دنباله، دسته ورودی به M زیربلوک تقسیم می‌شود. اما بجای ضرب هر کدام از زیربلوک‌ها با ضرایب چرخش



شکل ۶: تابع خودهمبستگی متناوب برای روش‌های مختلف کاهش PAPR

۴-۱- اثرات روش‌های پیشنهاد شده روی سیگنال

تأثیر هر کدام از روش‌های فوق را می‌توان با استفاده از تابع خود همبستگی متناوب مقایسه کرد. طبق رابطه (۲) سیگنال مختلط هر کاربر در مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد حاصل جمع N سیگنال مختلط حوزه زمان است. همبستگی کمتر بین زیرحامل‌های مختلف باعث کاهش احتمال رخداد همزمان پیک سیگنال‌های حوزه زمان مختلف می‌شود و در نتیجه میزان PAPR کمتر می‌شود. شکل ۶ نمودار تابع خود همبستگی متناوب برای سه روش کاهش PAPR را بر اساس روش ارسال جزئی دنباله و سیگنال OFDM بدون هیچ روش کاهش PAPR نشان می‌دهد. لبه‌های کناری^{۲۱} کوچک‌تر به معنی میزان خودهمبستگی کمتر است. همانطور که مشاهده می‌شود، سیگنال OFDM بدون هیچ روش کاهش PAPR بزرگ‌ترین لبه‌های کناری را دارد. بعد از آن، به ترتیب سیگنال مربوط به روش معمول ارسال جزئی دنباله و روش ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌ی ساختگی بزرگ‌ترین لبه‌های کناری را دارد. کمترین میزان لبه‌های کناری مربوط به روش دنباله انتقال یافته دورانی می‌باشد.

۴-۲- پیچیدگی محاسباتی

از عوامل تأثیرگذار در طراحی سیستم‌های مخابراتی، پیچیدگی محاسباتی است. یکی از اصلی‌ترین معایب روش ارسال جزئی دنباله، میزان پیچیدگی محاسباتی بالای آن است. در این بخش، هر کدام از روش‌های پیشنهاد شده را از لحاظ میزان پیچیدگی محاسباتی باهم مقایسه می‌کنیم.

روش انتخاب شده برای تجزیه سیگنال به M زیربلوک تأثیر بسازی در میزان پیچیدگی محاسباتی دارد اما چون روش مشابهی را برای هر سه روش ارسال جزئی دنباله در نظر می‌گیریم، در مقایسه میزان پیچیدگی محاسباتی تفاوتی ایجاد نخواهد کرد.

$$P_m(k) = [e^{j2\pi*0/N}, e^{j2\pi*1/N}, \dots, e^{j2\pi*(N-1)/N}]. \quad (9)$$

حال می‌توان سیگنال ارسالی را به صورت زیر بیان کرد:

$$x(n) = \sum_{m=1}^M \text{IFFT}(P_m(k) \odot S_m). \quad (10)$$

در گیرنده اگر تفاوتی بین $P_m(k)$ و $P_m(0)$ وجود داشته باشد، گیرنده می‌تواند متوجه اعمال انتقال دورانی در زیربلوک m شود. با در نظر گرفتن اثر نویز، با افزایش فاصله همینگ^{۲۰} بین $P_m(k)$ و $P_m(0)$ قابلیت اطمینان آشکارسازی گیرنده افزایش می‌یابد.

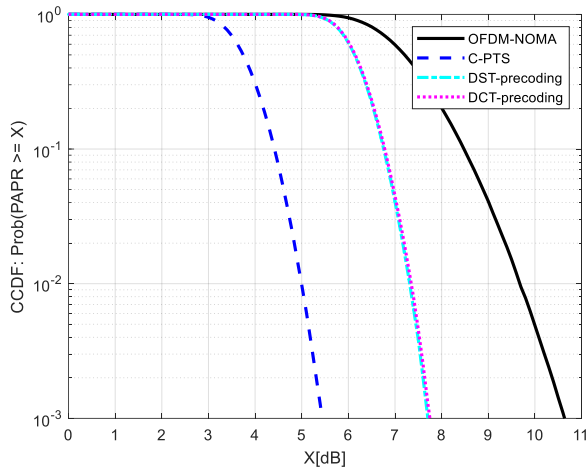
فرض کنید $\hat{X}$ سیگنال دریافتی حوزه فرکانس بعد از تبدیل فوریه سریع در گیرنده باشد. ابتدا با استفاده از روشی مشابه آنچه در گیرنده برای تجزیه به M زیربلوک استفاده شده است، سیگنال دریافتی را به M زیربلوک تجزیه می‌کنیم. می‌دانیم ضرب بردار چرخش فاز $P_m(k)$ در زیربلوک m تأثیری بر بقیه زیربلوک‌ها نخواهد داشت. لذا در گیرنده تخمین ضریب چرخش فاز هر زیربلوک به صورت جداگانه صورت می‌گیرد. اگر مجموعه مقادیر انتقال دورانی ممکن را برای زیربلوک m $\gamma(m, k)$ باشد، آشکارسازی در گیرنده صورت زیر انجام می‌گیرد:

$$\tilde{x}(n) = \min_{k \in \gamma(m, k)} \sum_{n=N_m(1)}^{n=N_m(N/M)} \min_{\tilde{X}(n) \in \xi} |s(n)e^{-j2\pi kn/N} / \tilde{h}(n) - \tilde{X}(n)|^2, \quad (11)$$

که در آن $N_m(N/M)$ مجموعه زیرحامل‌های زیربلوک S_m و $\tilde{h}(n)$ تخمین کانال برای زیرحامل n -ام است. ξ مجموعه نقاط منظومه سیگنال است که از نوع مولاسیون دیجیتال مورد استفاده در فرستنده بدست می‌آید. همانطور که از رابطه ۱۰ معلوم است، برای زیرحامل n -ام متعلق به زیربلوک m -ام، k ای را انتخاب می‌کنیم که نقاط منظومه سیگنال $\tilde{X}(n) \in \xi$ کمترین فاصله اقلیدسی را از $s(n)e^{-j2\pi kn/N} / \tilde{h}(n)$ داشته باشد. این روند برای تمام زیرحامل‌های زیربلوک m -ام تکرار می‌شود. با استفاده از نتایج بدست آمده، میزان انتقال اعمال شده روی زیربلوک m -ام تخمین زده می‌شود. بدین صورت، می‌توان بدون نیاز به اطلاعات اضافه، میزان شیفت اعمال شده روی هر زیربلوک را محاسبه کرد.

۴-۳- ارزیابی پیچیدگی و کارایی روش‌های پیشنهاد شده

در این بخش، ابتدا با استفاده از تابع خودهمبستگی متناوب، اثر روش‌های پیشنهاد شده را روی سیگنال OFDM بررسی می‌کنیم. سپس پیچیدگی محاسباتی هر روش را از لحاظ تعداد عملگرهای ضرب و جمع باهم مقایسه می‌کنیم. در نهایت، نتایج بررسی کارایی بدست آمده با شبیه سازی‌های کامپیوتری را ارائه می‌دهیم.



شکل ۷: مقایسه کاهش PAPR در روش پیش‌کدگذاری و روش معمول ارسال جزئی دنباله

$$CCRR = \left(1 - \frac{\text{Complexity of the method}}{\text{Complexity of the C-PTS}}\right) * 100\% \quad (12)$$

۴-۳- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، با استفاده از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری ابتدا میزان کاهش PAPR روش ارسال جزئی دنباله و روش پیش‌کدگذاری را باهم مقایسه می‌کنیم. سپس میزان کاهش PAPR در روش‌های پیشنهاد شده بر اساس ارسال جزئی دنباله را باهم مقایسه می‌کنیم. همچنین نرخ خطای بیت روش‌های پیشنهاد شده را در نسبت‌های مختلف توان سیگنال به توان نویز باهم مقایسه می‌کنیم. شبیه‌سازی‌ها بر اساس سیستم مدل شده در بخش ۲ می‌باشد، که در آن سیگنال هر دو کاربر به صورت همزمان و در طیف فرکانسی یکسان ارسال می‌شوند.

در شبیه‌سازی‌ها، لینک فروسو یک سیستم OFDM-NOMA مطابق شکل ۱ در نظر می‌گیریم. تعداد زیرحامل‌ها در تمام شبیه‌سازی‌ها بجز شکل‌های ۹ و ۱۰ برابر ۱۲۸ است. مدولاسیون دیجیتال مورد استفاده کلید زنی انتقال فاز چهارگانه (QPSK) می‌باشد. مدل کانال مورد استفاده در این شبیه‌سازی، کانال با نویز سفید گوسی جمع شونده (AWGN) است. برای اثر تقویت‌کننده توان، از مدل رپ^{۲۳} با ولتاژ اشباع ۰/۱ وlt استفاده شده است. برای مقایسه مقادیر PAPR هر کدام از روش‌ها، از مکمل تابع توزیع تجمعی^{۲۴} (CCDF) استفاده می‌شود. CCDF احتمال اینکه PAPR از یک مقدار مشخص بزرگ‌تر باشد را نشان می‌دهد. برای مقایسه میزان کاهش PAPR در روش‌های مختلف از این نمودار استفاده می‌کنیم. نشان می‌دهیم با احتمال یکسان، کدام روش PAPR کمتری دارد. ورودی در روش معمول ارسال جزئی دنباله و روش دنباله انتقال یافته دورانی به ۴ زیربلوک و در روش ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌ای ساختگی به ۳ زیربلوک تقسیم شده است. تعداد کل ضرایب چرخش فاز ممکن در روش معمول ارسال جزئی دنباله و روش ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌ای ساختگی برابر ۴ و در روش دنباله انتقال یافته دورانی K برابر ۲ در نظر گرفته شده است. تعداد کل زیرحامل‌ها نیز برابر ۱۲۸ و ضریب بیش نمونه برداری ۴ فرض شده است. نسبت کاهش پیچیدگی محاسباتی^{۲۲} را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

جدول ۱: مقایسه پیچیدگی محاسباتی

	عملگر ضرب	عملگر جمع	CCRR
روش معمول ارسال جزئی دنباله	۹۲۱۶	۵۱۲۰۰	%۰
روش ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌ای ساختگی	۶۹۱۲	۲۲۰۱۶	%۵۲
روش دنباله انتقال یافته دورانی	۱۷۹۲	۱۱۷۷۶	%۷۷

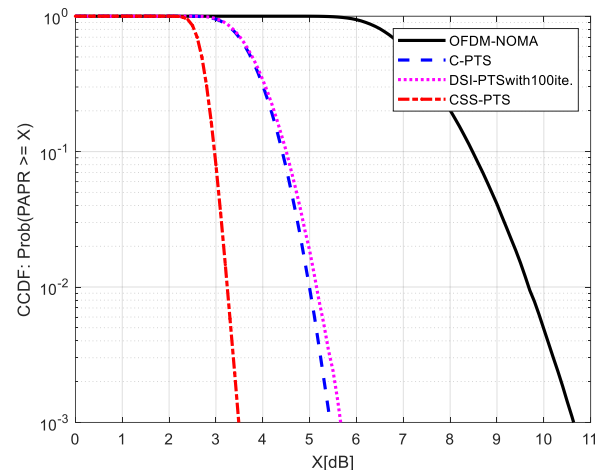
برای عکس تبدیل فوریه سریع با ضریب بیش نمونه‌برداری L به تعداد $\frac{LN}{2} \log_2(LN)$ عملیات مختلط ضرب و $LN \log_2(LN)$ عملیات مختلط جمع نیاز است. در روش معمول ارسال جزئی دنباله به M عکس تبدیل فوریه سریع نیاز خواهیم داشت. علاوه بر آن، برای جمع M زیربلوک و انتخاب سیگنال با کمترین میزان PAPR از میان $V^{(M-1)}$ سیگنال به تعداد $(M-1)LN$ عملیات ضرب مختلط نیاز داریم. در نتیجه، به ترتیب تعداد کل عملگرهای مختلط ضرب و جمع مورد نیاز $\frac{MLN}{2} \log_2(LN) + V^{(M-1)}LN$ و $LN \log_2(LN/M) + K^{(M-1)}2LN$ است. در روش ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌ای ساختگی با توجه به اندازه دنباله‌ای ساختگی اضافه شده، M کوچک‌تر می‌شود. برای روش دنباله انتقال یافته دورانی به ترتیب به $\frac{LN}{2} \log_2(LN/M)$ و $LN \log_2(LN/M) + K^{(M-1)}2LN$ عملگر ضرب و جمع نیاز داریم. K تعداد انتقال‌های ممکن برای هر زیربلوک را نشان می‌دهد. جدول ۱ تعداد عملگرهای مورد نیاز و نسبت کاهش پیچیدگی محاسباتی برای ۳ روش ارسال جزئی دنباله پیشنهاد شده را نشان می‌دهد. ورودی در روش معمول ارسال جزئی دنباله و روش دنباله انتقال یافته دورانی به ۴ زیربلوک و در روش ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌ای ساختگی به ۳ زیربلوک تقسیم شده است. تعداد کل ضرایب چرخش فاز ممکن در روش معمول ارسال جزئی دنباله و روش ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌ای ساختگی برابر ۴ و در روش دنباله انتقال یافته دورانی K برابر ۲ در نظر گرفته شده است. تعداد کل زیرحامل‌ها نیز برابر ۱۲۸ و ضریب بیش نمونه برداری ۴ فرض شده است. نسبت کاهش پیچیدگی محاسباتی^{۲۲} را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

ساختگی^{۱۷} می‌باشد. از دنباله‌های مکمل برای تولید دنباله ساختگی استفاده شده است. ضرایب چرخش فاز مورد استفاده در روش‌های معمول ارسال جزئی دنباله و ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌ی ساختگی از مجموعه $\{1, -1, j, -j\}$ انتخاب شده است.

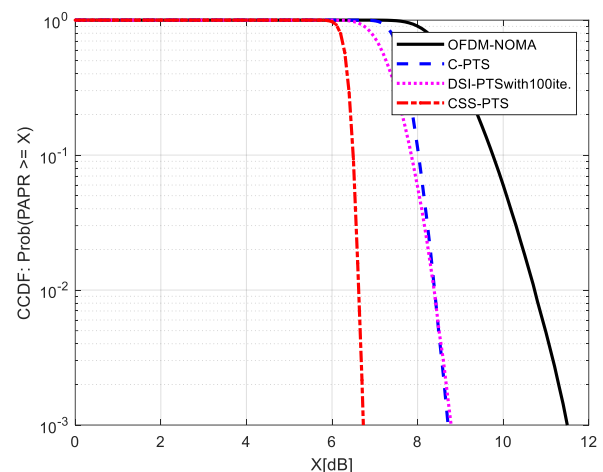
شکل ۷ منحنی CCDF سیگنال OFDM-NOMA بدون هیچ روش کاهش PAPR، دو روش پیش کدگذاری با استفاده از ماتریس انتقال سینوسی و کسینوسی گسسته و روش معمول ارسال جزئی دنباله را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، هر دو روش پیش کدگذاری میزان PAPR تقریباً یکسانی دارند. روش معمول ارسال جزئی دنباله بهترین عملکرد را در میان روش‌های نشان داده شده دارد. در روش‌های پیش کدگذاری نشان داده شده و روش معمول ارسال جزئی دنباله با احتمال 10^{-3} مقدار PAPR به ترتیب بزرگتر از ۷/۷ dB و ۵/۵ است. درحالی که سیگنال OFDM-NOMA بدون روش کاهش PAPR و با احتمال یکسان، مقدار PAPR بزرگتر از ۱۰/۷ dB دارد.

شکل ۸ منحنی CCDF برای سه روش ارسال جزئی دنباله پیشنهاد شده با ۱۲۸ زیرحامل را نشان می‌دهد. همانطور که نشان می‌دهد، روش معمول ارسال جزئی دنباله و ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌ی ساختگی میزان کاهش PAPR یکسانی دارند اما میزان پیچیدگی محاسباتی در روش دوم به مراتب کمتر است. روش دنباله انتقال یافته دورانی بهترین میزان کاهش PAPR را دارد. این روش با احتمال 10^{-3} میزان PAPR بیشتر از ۳/۵ dB دارد که ۲ dB کمتر از روش معمول است. شکل ۸ و ۹ منحنی‌های CCDF سه روش کاهش PAPR پیشنهاد شده با ۵۱۲ و ۱۰۲۴ زیرحامل را نمایش می‌دهد. طول دنباله ساختگی اضافه شده برای سیستم اول با ۵۱۲ زیرحامل برابر ۱۲۸ و برای سیستم دوم با ۱۰۲۴ زیرحامل برابر ۲۵۶ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد زیرحامل میزان PAPR سیگنال نیز افزایش پیدا می‌کند. اما همچنان ترتیب میزان اثربخشی روش‌ها مشابه شکل ۸ است. روش دنباله انتقال یافته دورانی بهترین عملکرد را با ۱۲۸، ۵۱۲ و ۱۰۲۴ زیرحامل دارد. روش معمول ارسال جزئی دنباله و روش ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌ی ساختگی نیز میزان کاهش PAPR مشابهی دارند.

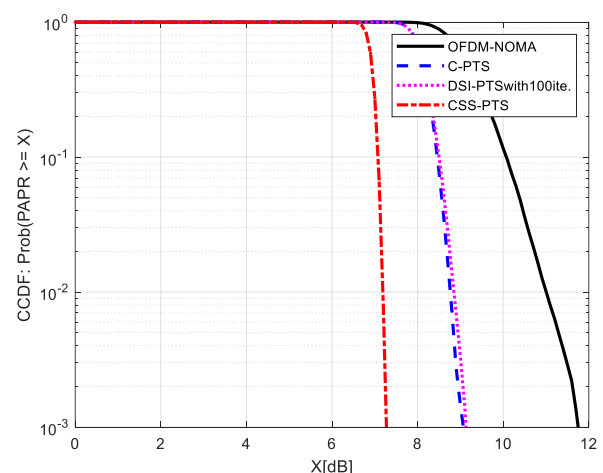
شکل‌های ۱۱ و ۱۲ منحنی نرخ خطای بیت را برای کاربران ۱ و ۲ در یک سیستم OFDM-NOMA نشان می‌دهد. کاربر ۲ شرایط کانال بهتری نسبت به کاربر ۱ دارد و در نتیجه سطح کمتری از توان را به خود اختصاص می‌دهد. ضریب توان تخصیص داده شده به کاربران ۱ و ۲ به ترتیب ۰/۸ و ۰/۲ است. همانطور که مشاهده می‌شود، روش معمول ارسال جزئی دنباله بدترین عملکرد را از لحاظ نرخ خطای داده دارد که بخاطر نیاز به ارسال ضرایب چرخش فاز به گیرنده می‌باشد. روش ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌ی ساختگی هم بدلیل میزان PAPR یکسان و نیاز به ارسال اطلاعات اضافه شرایط تقریباً یکسانی دارد. روش دنباله



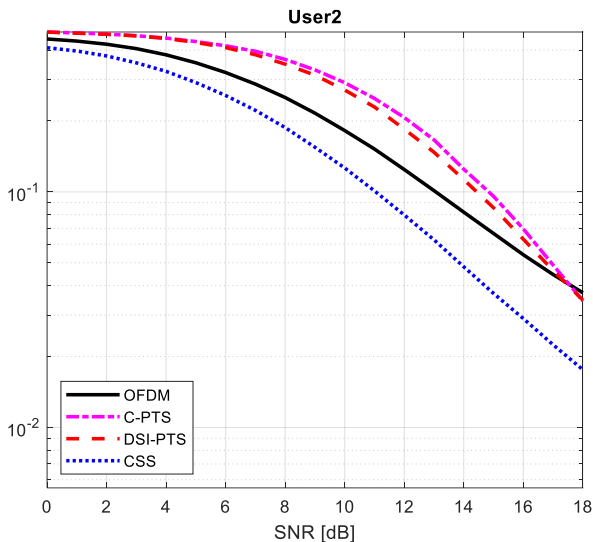
شکل ۸: مقایسه کاهش PAPR در سه روش ارسال جزئی دنباله پیشنهاد شده با ۱۲۸ زیرحامل



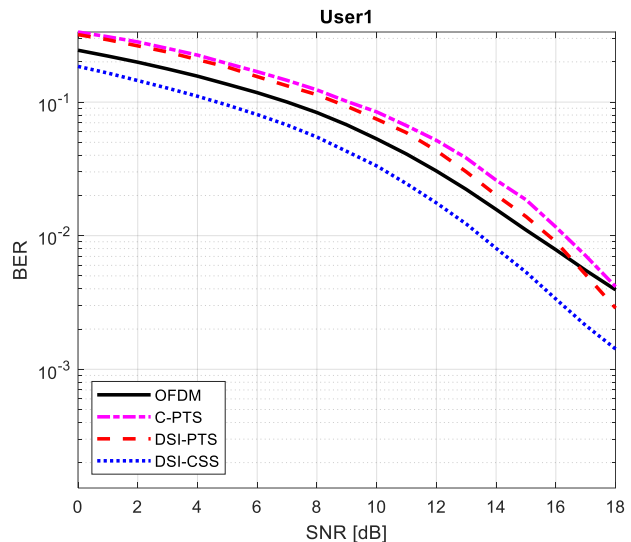
شکل ۹: مقایسه کاهش PAPR در سه روش ارسال جزئی دنباله پیشنهاد شده با ۵۱۲ زیرحامل



شکل ۱۰: مقایسه کاهش PAPR در سه روش ارسال جزئی دنباله پیشنهاد شده با ۱۰۲۴ زیرحامل



شکل ۱۲: منحنی نرخ خطای بیت کاربر ۲ سیستم OFDM-NOMA با روش‌های مختلف کاهش PAPR



شکل ۱۱: منحنی نرخ خطای بیت کاربر ۱ سیستم OFDM-NOMA با روش‌های مختلف کاهش PAPR

می‌کند. همچنین بدلیل ضرورت ارسال ضرایب چرخش فاز انتخاب شده به گیرنده و انتشار خطای بالای سیستم‌های OFDM-NOMA، نرخ خطای بیت سیستم، مخصوصاً برای کاربری که عمل حذف تداخلات پی‌درپی را انجام می‌دهند، بسیار بالا می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که روش‌های پیشنهاد شده بر پایه ارسال جزئی دنباله، کاهش PAPR بیشتری نسبت به روش‌های پیش کدگذاری دارند. از بین روش‌های پیشنهاد شده، روش دنباله انتقال یافته دورانی بهترین عملکرد را هم از لحاظ کاهش PAPR و هم از لحاظ نرخ خطای بیت و پیچیدگی محاسباتی دارد. علاوه بر این، نیازی به تخصیص طیف اضافه برای ارسال ضرایب چرخش فاز انتخاب شده به گیرنده را ندارد و در نتیجه بر خلاف روش‌های قبلی باعث بروز خطا و انتشار آن در بقیه کاربران نمی‌شود. همچنین بهره‌وری طیفی بهتری دارد. در نتیجه، بدلیل عدم نیاز به ارسال اطلاعات اضافه و داشتن بهترین عملکرد از لحاظ کاهش PAPR و میزان

انتقال یافته دورانی بهترین عملکرد را در بین تمام سیگنال‌های مقایسه شده دارد چون نیازی به ارسال اطلاعات اضافه ندارد و کمترین میزان PAPR را داراست. همچنین همانطور که از مقایسه دو شکل می‌توان دید، بدلیل تفاوت شرایط کانال در دو کاربر، برای رسیدن به نرخ خطای بیت مشابه، به نسبت‌های توان سیگنال به توان نویز متفاوتی نیاز دارند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، سه روش کاهش PAPR بر پایه روش ارسال جزئی دنباله برای استفاده در لینک فروسو سیستم‌های OFDM-NOMA مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. این گروه از روش‌ها، PAPR سیگنال OFDM را بدون ایجاد اعوجاج کاهش می‌دهند که یک مزیت مهم در سیستم‌های OFDM-NOMA می‌باشد. این مزیت به بهای محاسبات پیچیده بدست می‌آید، که بار محاسباتی سنگینی را به سیستم تحمیل

جدول ۲: مقایسه روش‌های کاهش PAPR

		پیچیدگی محاسباتی در مقایسه با روش ارسال جزئی دنباله	نیاز به ارسال اطلاعات اضافه	کاهش PAPR در مقایسه با روش ارسال جزئی دنباله	بدون اعوجاج
پیش‌کدگذاری	تبدیل کسینوسی گسسته	بیشتر در تعداد زیاد زیرحامل (تعداد عملگرهای لازم برای عکس تبدیل فوریه + $O(N^2)$)	*	کمتر	✓
	تبدیل سینوسی گسسته	بیشتر در تعداد زیاد زیرحامل (تعداد عملگرهای لازم برای عکس تبدیل فوریه + $O(N^2)$)	*	کمتر	✓
ارسال جزئی دنباله	روش معمول ارسال جزئی دنباله	یکسان (در بخش ۴-۲ بررسی شده)	$\log_2^{V(M-1)}$ بیت اضافی	یکسان	✓
	روش ارسال جزئی دنباله با افزودن دنباله‌ی ساختگی	کمتر (در بخش ۴-۲ بررسی شده)	$\log_2^{V(M-1)}$ بیت اضافی	یکسان	✓
	روش دنباله انتقال یافته دورانی	کمتر (در بخش ۴-۲ بررسی شده)	*	بیشتر	✓

- Analysis in Uplink SCMA-OFDM Systems," in IEEE Access, vol. 7, pp. 162803-162817, 2019.
- [12] L. J. Cimini and N. R. Sollenberger, "Peak-to-average power ratio reduction of an OFDM signal using partial transmit sequences," in IEEE Communications Letters, vol. 4, no. 3, pp. 86-88, March 2000.
- [13] J. Hou, W. Wang, Y. Zhang, X. Liu and Y. Xie, "Multi-Objective Quantum Inspired Evolutionary SLM Scheme for PAPR Reduction in Multi-Carrier Modulation," in IEEE Access, vol. 8, pp. 26022-26029, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2971633.
- [14] Y. A. Al-Jawhar, K. N. Ramli, A. Mustapha, S. A. Mostafa, N. S. Mohd Shah and M. A. Taher, "Reducing PAPR With Low Complexity for 4G and 5G Waveform Designs," in IEEE Access, vol. 7, pp. 97673-97688, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2930121.
- [15] R. S. Suriavel Rao and P. Malathi, "A novel PTS: grey wolf optimizer-based PAPR reduction technique in OFDM scheme for high-speed wireless applications," Soft Comput., 2019, doi: 10.1007/s00500-018-3665-0..
- [16] M. Hosseinzadeh Aghdam and A. A. Sharifi, "PAPR reduction in OFDM systems: An efficient PTS approach based on particle swarm optimization," ICT Express, 2019, doi: 10.1016/j.icte.2018.10.003.
- [17] Z. Zhou, L. Wang and C. Hu, "Low-Complexity PTS Scheme for Improving PAPR Performance of OFDM Systems," in IEEE Access, vol. 7, pp. 131986-131994, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2941116.
- [18] 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.
- [19] T. Jiang, W. Xiang, P. C. Richardson, J. Guo and G. Zhu, "PAPR Reduction of OFDM Signals Using Partial Transmit Sequences With Low Computational Complexity," in IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 53, no. 3, pp. 719-724, Sept. 2007, doi: 10.1109/TBC.2007.899345.
- [20] P. Varahram, W. F. Al-Azzo and B. M. Ali, "A low complexity partial transmit sequence scheme by use of dummy signals for PAPR reduction in OFDM systems," in IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 56, no. 4, pp. 2416-2420, November 2010.
- [21] Heung-Gyoon Ryu, Jae-Eun Lee and Jin-Soo Park, "Dummy sequence insertion (DSI) for PAPR reduction in the OFDM communication system," in IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 50, no. 1, pp. 89-94, Feb. 2004, doi: 10.1109/TCE.2004.1277845.
- [22] L. Yang, K. K. Soo, S. Q. Li and Y. M. Siu, "PAPR Reduction Using Low Complexity PTS to Construct of OFDM Signals Without Side Information," in IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 57, no. 2, pp. 284-290, June 2011.
- [23] D. W. Lim, H. S. Noh, H. B. Jeon, J. S. No, and D. J. Shin, "Multistage TR scheme for PAPR reduction in OFDM signals," IEEE Trans. Broadcast., vol. 55, no. 2, pp. 300-304, Jun. 2009.
- [24] J. A. Davis and J. Jedwab, "Peak-to-mean power control in OFDM, Golay complementary sequences, and Reed-Muller codes," in IEEE Transactions on Information Theory, vol. 45, no. 7, pp. 2397-2417, Nov. 1999, doi: 10.1109/18.796380.
- پیچیدگی محاسباتی، روش دنباله انتقال یافته دورانی بهترین گزینه برای استفاده در سیستم‌های OFDM-NOMA می‌باشد. جدول ۲ روش‌های پیش‌کدگذاری و سه روش ارسال جزئی دنباله پیشنهاد شده را مقایسه می‌کند. می‌توان مشاهده کرد که روش دنباله انتقال یافته دورانی همچنان بهترین روش از لحاظ پیچیدگی محاسباتی، بهره‌وری طیفی، کاهش PAPR و عدم ایجاد اعوجاج اضافه در سیگنال است که می‌تواند در سیستم‌های OFDM-NOMA بکار برود.

مراجع

- [1] S. M. R. Islam, N. Avazov, O. A. Dobre and K. Kwak, "Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, no. 2, pp. 721-742, Secondquarter 2017.
- [2] T. Hwang, C. Yang, G. Wu, S. Li and G. Ye Li, "OFDM and Its Wireless Applications: A Survey," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 58, no. 4, pp. 1673-1694, May 2009.
- [3] E. Costa and S. Pupolin, "M-QAM-OFDM system performance in the presence of a nonlinear amplifier and phase noise," in IEEE Transactions on Communications, vol. 50, no. 3, pp. 462-472, March 2002, doi: 10.1109/26.990908.
- [4] J. Armstrong, "Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering," in Electronics Letters, vol. 38, no. 5, pp. 246-247, 28 Feb. 2002.
- [5] B. Tang, K. Qin and H. Mei, "A Hybrid Approach to Reduce the PAPR of OFDM Signals Using Clipping and Companding," in IEEE Access, vol. 8, pp. 18984-18994, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2968560.
- [6] X. Liu et al., "PAPR Reduction Using Iterative Clipping/Filtering and ADMM Approaches for OFDM-Based Mixed-Numerology Systems," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 4, pp. 2586-2600, April 2020, doi: 10.1109/TWC.2020.2966600.
- [7] I. Baig, "A Precoding-Based Multicarrier Non-Orthogonal Multiple Access Scheme for 5G Cellular Networks," in IEEE Access, vol. 5, pp. 19233-19238, 2017.
- [8] I. Baig, N. ul Hasan, M. Zghaibeh, I. U. Khan and A. S. Saand, "A DST precoding based uplink NOMA scheme for PAPR reduction in 5G wireless network," 2017 7th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO), Sharjah, 2017, pp. 1-4.
- [9] R. Ahmad and A. Srivastava, "PAPR Reduction of OFDM Signal Through DFT Precoding and GMSK Pulse Shaping in Indoor VLC," in IEEE Access, vol. 8, pp. 122092-122103, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3006247.
- [10] Trivedi, V., Ramadan, K., Kumar, P., Dessouky, M. and Abd El-Samie, F., 2019. Enhanced OFDM-NOMA for next generation wireless communication: A study of PAPR reduction and sensitivity to CFO and estimation errors. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 102, pp.9-24.
- [11] A. S. Rajasekaran, M. Vameghestahbanati, M. Farsi, H. Yanikomeroğlu and H. Saeedi, "Resource Allocation-Based PAPR

زیر نویس‌ها

- ¹³ Error Propagation
¹⁴ Dummy Sequence Insertion (DSI)
¹⁵ Cyclic Shift Sequence-PTS (CSS-PTS)
¹⁶ Aperiodic-Autocorrelation Function (ACF)
¹⁷ Oversampling
¹⁸ Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)
¹⁹ Golay Complementary Sequence
²⁰ Hamming Distance
²¹ Dummy Symbol
²² Computational Complexity Reduction Ratio (CCRR)
²³ Rapp Model
²⁴ Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF)

- ¹ Intersymbol Interference (ISI)
² Super-position Coding (SC)
³ Successive Interference Cancellation (SIC)
⁴ Downlink
⁵ Enhanced Nonlinear Companding (ENC)
⁶ Precoding
⁷ Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) Pulse Shaping
⁸ Signal Scrambling
⁹ Selected Mapping (SLM)
¹⁰ Partial Transmit Sequence (PTS)
¹¹ Multi-objective Quantum Inspired Evolutionary
¹² Phase Rotation Factor