

سیستم CDMA-GFDM چندکاربره در ارتباط فراسو و فروسو

سید محمد جواد عسگری طباطبائی^۱ فرید صمصامی خداداد^۲

۱- دانشیار- گروه آموزشی مهندسی برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه تربت حیدریه- تربت حیدریه- ایران

s.m.j.asgaritabatabaee@torbath.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین- دانشگاه تخصصی فناوری‌های نوین آمل- آمل- ایران

samsami@ausmt.ac.ir

چکیده: یک راهکار موثر برای مقابله با فرکانس‌گزینی کانال‌های مخابراتی در دهه گذشته استفاده از سیستم‌های چندحاملی است. یکی از سیستم‌های چندحاملی که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است، مالتی‌پلکس تقسیم فرکانسی تعمیم‌یافته (GFDM) است. GFDM به دلیل استفاده از فیلتر الگو به خوبی محلی‌سازی شده و همچنین طول پیشوند چرخشی (CP) کوتاه، در کانال‌های مخابراتی با فرکانس‌گزینی و تغییرات زمانی شدید کارایی بسیار مناسبی را با نرخ قابل قبول بدست می‌آورد. از طرف دیگر یک راه برای دستیابی به چندگانگی فرکانسی و جلوگیری از تداخل در سیستم‌های چندکاربره استفاده از تکنیک دسترسی چندگانه تقسیم کد (CDMA) است. در این مقاله سیستم انتقال داده‌ای نوین بر مبنای ترکیب GFDM و CDMA در یک شبکه چندکاربره پیشنهاد شده است. ساختاری جدید برای فرستنده و گیرنده سیستم پیشنهادی CDMA-GFDM چندکاربره در ارتباط فراسو و فروسو ارائه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی از نظر احتمال خطای بیت (BER) سیستم GFDM معمول در ارتباط فراسو و فروسو غلبه می‌کند و کارایی بسیار بهتری را بدست می‌آورد. در شبیه‌سازی‌ها خواهیم دید که در کانال مخابراتی با نمایه تاخیر توان Pedestrian A (PDP)، برای SNRهای ۱۰ و ۲۰ dB، به ترتیب حدود ۱٫۶ و ۸۰ برابر بهبود BER در مقایسه با GFDM متداول حاصل می‌شود. همچنین برای کانال Pedestrian B در همین SNRها به ترتیب حداقل ۱٫۶ و ۱۳۰ برابر کاهش BER خواهیم داشت.

واژه‌های کلیدی: مالتی‌پلکس تقسیم فرکانسی تعمیم‌یافته، دسترسی چندگانه تقسیم کد، فراسو، فروسو، سیستم‌های چندکاربره.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.21.3.27

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۲۵

نام نویسنده‌ی مسئول: سید محمد جواد عسگری طباطبائی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - خراسان رضوی - تربت حیدریه - ۷ جاده تربت حیدریه، مشهد - دانشگاه تربت حیدریه -

دانشکده‌ی مهندسی - گروه آموزشی مهندسی برق

۱- مقدمه

در طول دهه گذشته یک راهکار موثر برای مقابله با فرکانس‌گزینی کانال‌های مخابراتی در شبکه‌های بیسیم استفاده از سیستم‌های چندحامل است [۴-۱]. مشهورترین سیستم چندحامل که در دهه گذشته از آن استفاده شده است، مالتی‌پلکس تقسیم فرکانسی متعامد (OFDM) است. OFDM به دلیل پیاده‌سازی با پیچیدگی بسیار پایین و همچنین بدست آوردن کارایی بالا بسیار مورد توجه بوده است [۴]. با وجود ویژگی‌های ممتاز OFDM، این سیستم در شبکه‌های مخابراتی نسل بعد با کاهش شدید کارایی مواجه است. دلیل این امر این است که به دلیل بالا رفتن نرخ، کانال‌های مخابراتی نسل بعد فرکانس‌گزین شدید بوده و تغییرات زمانی آن‌ها بسیار زیاد است. از آنجایی که در OFDM از پالس مستطیلی شکل برای ارسال سمبل‌ها استفاده می‌شود که در حوزه فرکانس لوب‌های فرعی بسیار بزرگی دارد، تغییرات زمانی و فرکانسی کانال مخابراتی شکل پالس مستطیلی را به راحتی تغییر داده و موجب ایجاد تداخل بسیار زیادی می‌شود [۵]. از طرف دیگر در کانال فرکانس‌گزین شدید، طول پیشوند چرخشی (CP)، که بایستی حداقل برابر طول پاسخ ضربه کانال باشد، برای OFDM بسیار زیاد بوده و موجب افت شدید نرخ می‌شود.

یکی دیگر از سیستم‌های چندحامل، سیستم چندحاملی مبتنی بر بانک فیلتر (FBMC) است که به عنوان جایگزینی برای OFDM مطرح شده و بر مشکلات آن غلبه کرده است [۸-۴]. در FBMC از یک فیلتر الگو به خوبی محلی‌سازی شده در حوزه زمان و فرکانس به جای پالس مستطیلی استفاده شده که در کانال‌های فرکانس‌گزین و متغیر با زمان شکل آن به سختی تغییر می‌کند. در نتیجه تأثیر فرکانس‌گزینی و تغییرات زمانی کانال مخابراتی بر روی شکل فیلتر الگو ناچیز بوده و منجر به تولید تداخل نمی‌شود [۵]. همچنین در این سیستم‌ها از CP استفاده نشده و نرخ کامل بدست می‌آید.

بنابراین FBMC دو چالش اساسی OFDM را ندارد. اما چالش بسیار مهم دیگری در FBMC مطرح است. در این سیستم به منظور حفظ نرخ کامل، سمبل‌ها بایستی به صورت حقیقی ارسال شوند. این موضوع باعث می‌شود که این سیستم با روش‌های دستیابی به چندگانگی فضایی نتواند به خوبی ترکیب شود و در نتیجه چندگانگی فضایی از دست برود [۵]. در مقالات زیادی از جمله [۱۳-۹] سعی شده است بر این مشکل غلبه شود و بتوان سمبل‌ها را به صورت مختلط ارسال کرد. اما این کار به صورت سراسر انجام نمی‌شود و هنوز این مسئله به عنوان یک چالش برای FBMC مطرح است.

سیستم چندحاملی دیگری که در سال‌های اخیر به عنوان جایگزین OFDM مطرح شده است، سیستم مالتی‌پلکس تقسیم فرکانسی تعمیم‌یافته (GFDM) است [۱۶-۱۴]. در این سیستم نیز از فیلتر الگو به خوبی محلی‌سازی شده در زیرحامل‌ها و زیرسمبل‌های مختلف برای حمل سمبل‌های داده استفاده می‌شود. اما با از دست دادن مزیت عمود بودن زیرحامل‌ها و زیرسمبل‌های مختلف، سمبل‌ها

می‌توانند به صورت مختلط ارسال شده و در نتیجه این سیستم امکان ترکیب با روش‌های دستیابی به چندگانگی فضایی را با حفظ کارایی دارد [۱۷]. همچنین در این سیستم به منظور جلوگیری از روی هم افتادن بلاک‌های داده مانند OFDM یک CP در ابتدای هر بلاک اضافه می‌شود. البته بر خلاف OFDM طول CP در GFDM نسبت به طول بلاک داده بسیار کوچک بوده و نرخ کاهش جزئی دارد.

با توجه به آنچه گفته شد، به دلیل عمود نبودن زیرحامل‌ها و زیرسمبل‌ها در GFDM یک تداخل ذاتی در این سیستم وجود دارد که کارایی آن را کاهش می‌دهد [۱۸]. در [۱۹] ساختار جدیدی برای GFDM با نام GFDM کدشده ارائه شده است که در آن بر مشکل تداخل ذاتی غلبه شده است. این مقاله در [۲۰] به حالت چند ورودی چند خروجی (MIMO) گسترش پیدا کرده است و در [۲۱] نیز برای یک شبکه چندکاربره به کاربرده شده است. در [۲۲] نیز GFDM با رله به منظور دستیابی به چندگانگی فضایی ترکیب شده است. همچنین در [۲۳] از GFDM به همراه سطوح بازتابنده هوشمند (IRS) استفاده شده است و نشان داده شده است ترکیب این دو تکنولوژی می‌تواند کارایی بسیار بالایی را بدست آورد.

در [۲۴] روشی نوین به منظور طراحی فیلتر الگو برای GFDM پیشنهاد شده است. در فیلتر طراحی شده توان خارج از باند کاهش داده شده و در نتیجه آن تداخل ذاتی کاهش یافته است. در [۲۵] با توجه به کارایی GFDM از این تکنیک برای انتقال همزمان داده و توان در یک سیستم مخابرات همکارانه استفاده شده است. در [۲۶] از GFDM برای انتقال داده در سیستم مخابراتی نوری قابل مشاهده استفاده شده است. انتقال فوری اطلاعات غیر سنکرون یکی از الزامات اینترنت اشیا است. با توجه به فیلتر الگو محلی‌سازی شده در GFDM، در [۲۷] از این تکنیک برای مخابره غیر سنکرون بهره برده شده است. در [۲۸] و [۲۹] نیز گیرنده‌های جدیدی برای GFDM به منظور کاهش تداخل برای استفاده در سیستم‌های مخابراتی همراه نسل بعد پیشنهاد شده است.

تکنولوژی دیگری که می‌تواند به منظور دستیابی به چندگانگی فرکانسی استفاده شود و همچنین به منظور مقابله با تداخل به کار برده می‌شود، دسترسی چندگانه تقسیم کد (CDMA) نام دارد [۳۰]. در CDMA در حوزه فرکانس هر سمبل توسط یک بردار گسترده‌ساز بر روی بخشی یا تمامی زیرحامل‌ها کد می‌شود و از این طریق این تکنیک می‌تواند از چندگانگی زیرحامل‌های مختلف بهره ببرد. بردارهای گسترده‌ساز بر هم عمود می‌باشند و از این موضوع برای جلوگیری تداخل بین سمبل‌های مختلف استفاده می‌شود. یکی از کاربردهای CDMA در شبکه‌های مخابراتی چندکاربره بوده به نحوی که سمبل‌های داده کاربران مختلف توسط بردارهای گسترده‌ساز بر روی فرکانس‌های مختلف کد می‌شوند و با توجه به عمود بودن این بردارها، سمبل‌های داده هر کاربر در گیرنده قابل بازیابی هستند [۳۱].

۲- مدل سیستم مخابراتی GFDM

یک سیستم GFDM را در نظر بگیرید که در آن هر بسته داده شامل L زیرحامل و M زیرسمبل است. برای انتقال سمبل‌ها از یک فیلتر الگو استفاده شده که نمونه n ام آن را با $g[n]$ نمایش می‌دهیم. در این صورت نمونه n ام سیگنال ارسالی از فرستنده این سیستم به صورت زیر قابل نمایش است [۱۴]

$$x[n] = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} a_{l,m} g_{l,m}[n], \quad n=0, \dots, N-1, \quad (1)$$

که در آن $a_{l,m}$ سیگنال ارسالی بر روی زیرحامل l ام و زیر سمبل m ام است و $N = LM$. همچنین، $g_{l,m}[n] = g[(n - mL)_N] e^{j2\pi n l / N}$ ، همچنین، فیلتر الگوی تاخیر یافته چرخشی در حوزه زمان و فرکانس است. میزان تاخیر چرخشی در حوزه زمان و فرکانس به ترتیب برابر mL و l/L است. می‌توان نمونه‌های سیگنال ارسالی از فرستنده را در قالب برداری به صورت زیر نمایش داد [۱۴]

$$\bar{x} = \bar{G}\bar{a}, \quad (2)$$

که، $\bar{x} = [x[0] \dots x[N-1]]^T$ برداری با طول N بوده و شامل تمامی نمونه‌های سیگنال ارسالی از فرستنده در یک بسته GFDM است. همچنین، $\bar{G} = [G_0 \dots G_{M-1}] \in \mathbb{C}^{N \times N}$ ماتریس GFDM بوده که در آن، $G_m = [g_{0,m} \dots g_{L-1,m}] \in \mathbb{C}^{N \times L}$ ماتریسی شامل نمونه‌های فیلتر الگو استفاده شده در زیرسمبل m ام است. $g_{l,m}$ نیز برداری با طول N بوده که شامل $g_{l,m}[n]$ برای $n=0, \dots, N-1$ است. در نهایت، $\bar{a} = [a_0^T \dots a_{M-1}^T]^T$ برداری با طول N ، شامل همه سمبل‌های داده برای ارسال در یک بسته GFDM بوده، که در آن $a_m = [a_{0,m} \dots a_{L-1,m}]^T$ بردار سمبل‌های ارسالی بر روی تمامی زیرحامل‌ها در زیر سمبل m ام است.

در فرستنده GFDM، قبل از ارسال، یک CP به سیگنال مدوله شده GFDM اضافه می‌شود. سیگنال دریافتی در گیرنده پس از عبور از کانال مخابراتی و حذف CP به صورت زیر قابل بیان است.

$$\bar{y} = \bar{H}\bar{x} + \bar{v} = \bar{H}\bar{G}\bar{a} + \bar{v}, \quad (3)$$

که، $\bar{H} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ ، ماتریسی چرخشی بوده و هر سطر آن شامل پاسخ ضربه کانال مخابراتی است که در سطر بعد یک واحد به سمت راست چرخیده است. همچنین، $\bar{v} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ بردار نویز گوسی سفید جمع شونده (AWGN) است. در گیرنده از ماتریس $\bar{E} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ برای آشکارسازی سمبل‌های داده ارسالی استفاده می‌شود. در این صورت بردار سمبل‌های آشکارسازی شده برابر است با

$$\hat{\bar{a}} = \bar{E}\bar{y} = \bar{E}\bar{H}\bar{G}\bar{a} + \bar{E}\bar{v}. \quad (4)$$

دو نوع متداول گیرنده در GFDM، گیرنده‌های اعمال صفر (ZF) و کمینه متوسط مجذور خطا (MMSE) می‌باشند که در آن‌ها ماتریس گیرنده به ترتیب $\bar{E} = (\bar{H}\bar{G})^{-1}$ و

و [۳۲]. در گیرنده نیز از بردارهای فشرده‌ساز برای بازیابی سمبل‌های داده هر کاربر استفاده می‌شود.

با توجه به مزایای GFDM برای کاربرد در نسل‌های بعدی سیستم‌های مخابراتی برای سرعت‌های انتقال بالا و همچنین کارایی CDMA برای دستیابی به چندگانگی فرکانسی در کانال‌های با فرکانس‌گزینی شدید، در این مقاله یک سیستم مخابراتی چندکاربره بر مبنای ترکیب GFDM و CDMA در ارتباط فراسو و فروسو پیشنهاد می‌شود. در سیستم چندکاربره CDMA-GFDM پیشنهادی ساختار جدیدی برای فرستنده و گیرنده در ارتباط فراسو و فروسو ارائه می‌شود.

در ارتباط فراسو ابتدا سمبل‌های هر کاربر توسط بردارهای گسترده‌ساز بر روی زیرحامل‌های مختلف گسترش یافته و سپس وارد مدولاتور GFDM می‌شوند. سیگنال هر کاربر بر روی کانال مخابراتی ارسال شده و سیگنال‌های تمامی کاربران در ایستگاه پایه (BS) پس از جمع شدن با نویز دریافت می‌شوند. در BS پس از حذف CP برای حذف تاثیر کانال مخابراتی، ابتدا بر روی سیگنال دریافتی یک ترازرگر مشترک برای تمامی کاربران به کار برده می‌شود و سپس با استفاده از بردارهای فشرده‌ساز، سمبل‌های تمامی کاربران از روی سیگنال ترازش شده بازیابی می‌شوند.

در ارتباط فروسو، در ابتدا در BS سمبل‌های داده تمامی کاربران توسط بردارهای گسترده‌ساز بر روی زیرحامل‌های مختلف گسترش یافته و سپس جمع آن‌ها وارد مدولاتور GFDM می‌شود. سیگنال نتیجه وارد کانال مخابراتی می‌شود. در هر کاربر، سیگنال خروجی BS پس از عبور از کانال مخابراتی و جمع شدن با نویز دریافت می‌شود و سپس CP حذف می‌گردد. پس از حذف CP یک ترازرگر بر روی یک بلاک سیگنال اعمال شده و سپس توسط بردارهای فشرده‌ساز سمبل‌های مربوطه بازیابی می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که سیستم CDMA-GFDM پیشنهادی احتمال خطای بیت (BER^1) بسیار کمتری نسبت به GFDM متداول در یک شبکه مخابراتی با چند کاربر برای ارتباط فراسو و فروسو بدست می‌آورد.

ساختار ادامه مقاله به صورت زیر است. در بخش ۲ مدل سیستم GFDM توضیح داده می‌شود. در بخش ۳ ابتدا سیستم CDMA-GFDM پیشنهادی در ارتباط فراسو ارائه شده و سپس برای ارتباط فروسو بیان می‌شود. در بخش ۴ سیستم چندکاربره CDMA-GFDM پیشنهادی با سیستم چندکاربره GFDM متداول در ارتباط فراسو و فروسو در شبیه‌سازی‌ها مقایسه می‌شود. در بخش ۵ نیز این مقاله جمع‌بندی می‌شود.

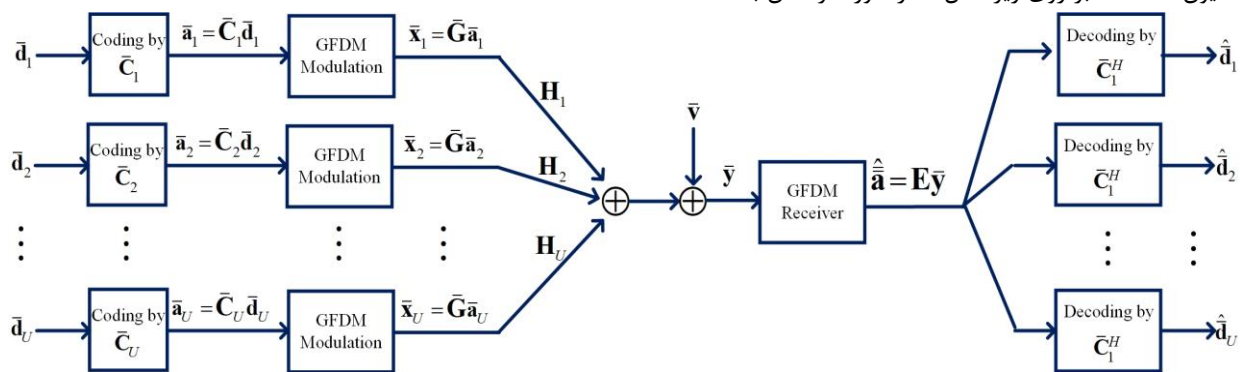
در این مقاله متغیرهای یک بعدی با حروف کوچک لاتین نشانه‌گذاری شده و بردارها با حروف کوچک پررنگ (bold) نمایش داده می‌شوند. همچنین ماتریس‌ها با حروف بزرگ پررنگ نشان داده می‌شوند. A^H و A^T به ترتیب ترانهاده و مزدوج ماتریس A را نشان می‌دهند.

سمبل m ام با بردار $\mathbf{d}_{u,m} = [d_{u,m,0} \ \dots \ d_{u,m,K_u-1}]^T \in \mathbb{C}^{K_u \times 1}$ مشخص می‌شوند، که در آن، K_u تعداد سمبل‌های کاربر u ام است. در این مقاله فرض می‌شود که مجموع سمبل‌های تمامی کاربران برابر تعداد زیرحامل‌ها است $\sum_{u=0}^{U-1} K_u = L$. به منظور گسترش سمبل‌ها بر روی زیرحامل‌ها، برای سمبل k ام کاربر u ام از بردار کدکننده گسترده ساز $\mathbf{c}_{u,k} \in \mathbb{R}^{L \times 1}$ استفاده می‌شود. در این‌جا از کدهای گسترده‌ساز عمود بر هم استفاده می‌شود، به نحوی که

$$\mathbf{c}_{u,k}^T \mathbf{c}_{u_0,k_0} = \begin{cases} 1 & u = u_0 \ \& \ k = k_0 \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

بردار سمبل‌های گسترده شده کاربر u ام در حوزه فرکانس بر روی تمامی زیرحامل‌ها در زیرسمبل m ام را می‌توان به صورت نمایش داد، که در آن، $\mathbf{a}_{u,m} = \mathbf{C}_u \mathbf{d}_{u,m}$ ماتریس کدکننده گسترده‌ساز کاربر u ام است. با توجه به (5) می‌توان نوشت.

$$\mathbf{C}_u^T \mathbf{C}_{u_0} = \begin{cases} \mathbf{I}_{K_u} & u = u_0 \\ \mathbf{0}_{K_u \times K_{u_0}} & u \neq u_0 \end{cases} \quad (6)$$



شکل (۱): سیستم مخابراتی GFDM-CDMA چندکاربره پیشنهادی در ارتباط فراسو

$$\bar{\mathbf{C}}_u = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_u & \mathbf{0}_{L \times K_u} & \dots & \mathbf{0}_{L \times K_u} \\ \mathbf{0}_{L \times K_u} & \mathbf{C}_u & \dots & \mathbf{0}_{L \times K_u} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0}_{L \times K_u} & \dots & \mathbf{0}_{L \times K_u} & \mathbf{C}_u \end{bmatrix} \quad (8)$$

با توجه به (6) برای این ماتریس نیز می‌توان نوشت.

$$\bar{\mathbf{C}}_u^T \bar{\mathbf{C}}_{u_0} = \begin{cases} \mathbf{I}_{K_u M} & u = u_0 \\ \mathbf{0}_{K_u M \times K_{u_0} M} & u \neq u_0 \end{cases} \quad (9)$$

سمبل‌ها پس از کد شدن و گسترش در حوزه فرکانس وارد مدلاسیون GFDM می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است. بردار خروجی مدلاسیون GFDM برای کاربر u ام برابر است با $\bar{\mathbf{x}}_u = \bar{\mathbf{G}} \bar{\mathbf{a}}_u = \bar{\mathbf{G}} \bar{\mathbf{C}}_u \bar{\mathbf{d}}_u$. سیگنال تمامی کاربران پس از اضافه کردن CP بر روی کانال مخابراتی ارسال می‌گردند. در BS جمع سیگنال‌های

$\mathbf{E} = (\bar{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{G}} + \sigma_v^2 \mathbf{I}_N)^{-1}$ هستند [۱۴]، که σ_v^2 توان نویز است. در این مقاله به دلیل کارایی بیشتر گیرنده MMSE، از این نوع گیرنده برای آشکارسازی سمبل‌های ارسالی استفاده می‌شود. مدل سیستم مخابراتی GFDM به طور کامل بیان شد. در ادامه این مدل را به یک سیستم چندکاربره در ارتباط فراسو و فروسو، که از تکنیک CDMA بهره‌مند است، گسترش می‌دهیم.

۳- مدل سیستم چندکاربره CDMA-GFDM

در این بخش در ابتدا یک مدل جدید برای سیستم CDMA-GFDM چندکاربره در ارتباط فراسو پیشنهاد شده و سپس یک مدل برای این سیستم در ارتباط فروسو پیشنهاد می‌گردد.

۳-۱- سیستم مخابراتی CDMA-GFDM در ارتباط

فراسو

یک شبکه چندکاربره CDMA-GFDM در ارتباط فراسو را که دارای U کاربر است، مطابق شکل (۱) در نظر بگیرید. داده‌های هر کاربر قبل از مدلاسیون GFDM بر روی زیرحامل‌ها در حوزه فرکانس با استفاده

از کد گسترده کننده، پخش می‌شوند. سمبل‌های کاربر u ام در زیر

در این حالت، بردار سمبل‌های گسترده شده کاربر u ام در یک بسته داده، که شامل تمامی زیرحامل‌ها و M زیر سمبل است، به صورت زیر قابل نمایش است.

$$\bar{\mathbf{a}}_u = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{u,0} \\ \vdots \\ \mathbf{a}_{u,M-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_u \mathbf{d}_{u,0} \\ \vdots \\ \mathbf{C}_u \mathbf{d}_{u,M-1} \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{C}}_u \bar{\mathbf{d}}_u, \quad (7)$$

که، $\bar{\mathbf{d}}_u = [\mathbf{d}_{u,0}^T \ \dots \ \mathbf{d}_{u,M-1}^T]^T$ بردار سمبل‌های کاربر u ام برای تمامی زیر سمبل‌ها در یک بسته با طول $K_u M$ است. همچنین، $\bar{\mathbf{C}}_u \in \mathbb{C}^{N \times K_u M}$ ماتریسی بلاکی مطابق رابطه زیر است.

است.

در مرحله اول می‌خواهیم از روی بردار $\bar{\mathbf{y}}$ بردار $\bar{\mathbf{a}}$ را تخمین بزنیم. در این‌جا از ماتریس تخمین‌گر $\mathbf{E} \in \mathbb{C}^{NU \times N}$ با هدف کمینه کردن امید مجذور خطا استفاده می‌شود. امید مجذور خطا ($\text{MSE}^{(1)}$) پس از مرحله تخمین به صورت زیر است.

$$\begin{aligned} e &= E \left[\text{trace} \left\{ (\mathbf{E}\bar{\mathbf{y}} - \bar{\mathbf{a}})^2 \right\} \right] \\ &= \text{trace} \left\{ \mathbf{E}\bar{\mathbf{H}}\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{E}} \left[\bar{\mathbf{a}}\bar{\mathbf{a}}^H \right] \bar{\mathbf{G}}^H \bar{\mathbf{H}}^H \mathbf{E}^H \right\} \\ &\quad - \text{trace} \left\{ \mathbf{E}\bar{\mathbf{H}}\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{E}} \left[\bar{\mathbf{a}}\bar{\mathbf{a}}^H \right] + E \left[\bar{\mathbf{a}}\bar{\mathbf{a}}^H \right] \bar{\mathbf{G}}^H \bar{\mathbf{H}}^H \mathbf{E}^H \right\} \\ &\quad + \text{trace} \left\{ \sigma_v^2 \mathbf{E}\mathbf{E}^H \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

فرض می‌شود هر سمبل دارای متوسط صفر و توان واحد بوده و از دیگر سمبل‌ها مستقل باشد. در این صورت با توجه به (۹) می‌توان نتیجه گرفت که $E \left[\bar{\mathbf{a}}\bar{\mathbf{a}}^H \right] = \mathbf{I}_{NU}$. بنابراین پس از انجام محاسبات لازم، ماتریس $\mathbf{E}$ که (۱۲) را کمینه کند برابر است با

$$\mathbf{E} = \left(\bar{\mathbf{G}}^H \bar{\mathbf{H}}^H \bar{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{G}} + \sigma_v^2 \mathbf{I}_{NU} \right)^{-1} \bar{\mathbf{G}}^H \bar{\mathbf{H}}^H. \quad (13)$$

در نتیجه، بردار تخمین زده شده سمبل‌های کد شده تمامی کاربران برابر است با

$$\hat{\bar{\mathbf{a}}} = \mathbf{E}\bar{\mathbf{y}}, \quad (14)$$

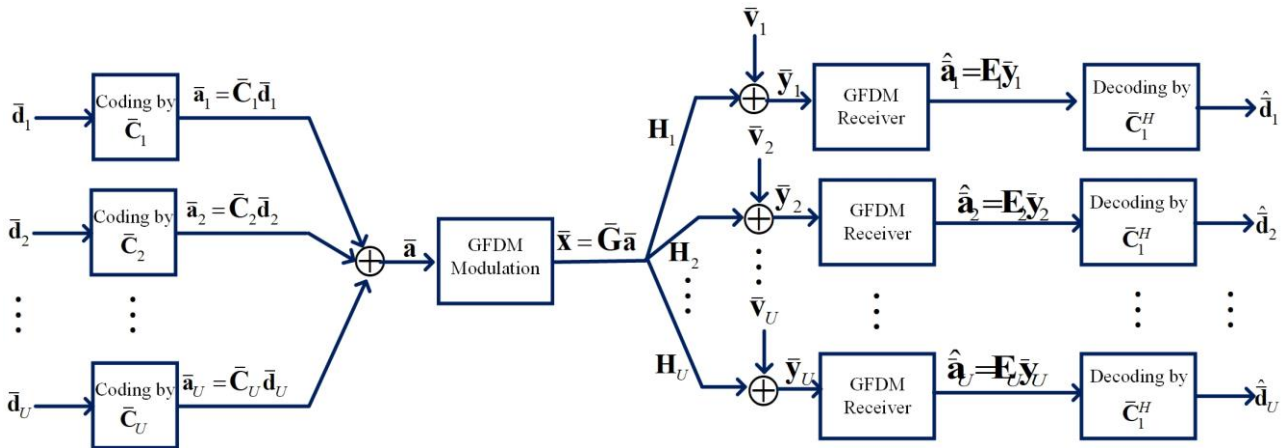
تمامی کاربران پس از عبور از کانال مخابراتی و جمع شدن با نویز دریافت می‌شود. بردار سیگنال دریافتی پس از حذف CP در BS برابر است با

$$\bar{\mathbf{y}} = \sum_{u=0}^{U-1} \bar{\mathbf{H}}_u \bar{\mathbf{x}}_u + \bar{\mathbf{v}} = \sum_{u=0}^{U-1} \bar{\mathbf{H}}_u \bar{\mathbf{G}} \bar{\mathbf{C}}_u^H \bar{\mathbf{d}}_u + \bar{\mathbf{v}}, \quad (10)$$

که در آن، $\bar{\mathbf{H}}_u \in \mathbb{C}^{N \times NU}$ ماتریس چرخشی کانال مخابراتی کاربر u ام است. همان‌طور که پیش از این بیان شد، هر سطر این ماتریس شامل پاسخ ضربه کانال مخابراتی بوده که در سطر بعد به میزان یک واحد چرخیده است. در BS، یک گیرنده دو مرحله‌ای به منظور آشکارسازی سمبل‌های کاربران پیشنهاد می‌شود. در مرحله اول یک تخمین‌گر بر روی $\bar{\mathbf{y}}$ به طور مشترک برای تمامی کاربران به کار برده شده و در مرحله دوم کدبرداری سمبل‌های هر کاربر به طور جداگانه انجام می‌شود. به منظور بدست آوردن تخمین‌گر پیشنهادی، (۱۰) را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم.

$$\bar{\mathbf{y}} = \bar{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{G}} \bar{\mathbf{a}} + \bar{\mathbf{v}}, \quad (11)$$

که $\bar{\mathbf{a}} = [\bar{\mathbf{a}}_0^T \ \dots \ \bar{\mathbf{a}}_{U-1}^T]^T$ برداری شامل سمبل‌های گسترده شده تمامی کاربران بوده و $\bar{\mathbf{H}} = [\bar{\mathbf{H}}_0 \ \dots \ \bar{\mathbf{H}}_{U-1}] \in \mathbb{C}^{N \times NU}$ ماتریس کانال بین تمامی کاربران و BS در ارتباط فراسو است. همچنین، $\bar{\mathbf{G}} \in \mathbb{C}^{NU \times NU}$ ماتریسی قطری-بلاکی^{۱۳} است که تمامی بلاک‌های قطر اصلی آن $\bar{\mathbf{G}}$



شکل (۲): سیستم مخابراتی GFDM-CDMA چندکاربره پیشنهادی در ارتباط فراسو

مدل پیشنهادی سیستم CDMA-GFAM برای سیستم چندکاربره در ارتباط فراسو و نحوه تخمین زدن سمبل‌ها به طور کامل بیان شد. در ادامه مدل پیشنهادی و تخمین سمبل‌ها را در ارتباط فراسو خواهیم دید.

که در آن $\hat{\bar{\mathbf{a}}} = [\hat{\bar{\mathbf{a}}}_0^T \ \dots \ \hat{\bar{\mathbf{a}}}_{U-1}^T]^T$ و $\hat{\bar{\mathbf{a}}}_u$ تخمین بردار کد شده کاربر u ام است. پس از این مرحله، هر کاربر سمبل‌های داده ارسال خود را با استفاده از ماتریس فشرده‌ساز خود، بازبازی می‌کند. در این صورت بردار داده تخمین زده شده کاربر u ام به صورت زیر می‌شود.

$$\hat{\bar{\mathbf{d}}}_u = \bar{\mathbf{C}}_u^H \hat{\bar{\mathbf{a}}}_u. \quad (15)$$

محاسبات لازم به سادگی می‌توان نشان داد که ماتریس تخمین‌گر کاربر u به صورت زیر می‌شود.

$$\mathbf{E}_u = (\bar{\mathbf{G}}^H \bar{\mathbf{H}}_u^H \bar{\mathbf{H}}_u \bar{\mathbf{G}} + \sigma_v^2 \mathbf{I}_N)^{-1} \bar{\mathbf{G}}^H \bar{\mathbf{H}}_u^H. \quad (20)$$

پس از تخمین در گیرنده هر کاربر، ماتریس فشرده ساز هر کاربر در بردار تخمین زده شده ضرب می‌شود و سمبل‌های ارسالی بازبازی می‌شوند. در این صورت، بردار بازبازی شده کاربر u به صورت زیر می‌شود.

$$\hat{\mathbf{d}}_u = \bar{\mathbf{C}}_u^T \hat{\mathbf{a}}_u. \quad (21)$$

ساختار فرستنده و گیرنده پیشنهادی CDMA-GFDM در ارتباط فروسو نیز به طور کامل بیان شد. در ادامه سیستم‌های پیشنهادی در ارتباط فراسو و فروسو با سیستم GFDM معمول در شبیه‌سازی‌ها مقایسه می‌شوند و کارایی آن‌ها ارزیابی می‌شود.

۴- شبیه‌سازی‌ها

به منظور ارزیابی و بررسی عملکرد سیستم‌های پیشنهادی، در این بخش یک سلول مخابراتی در ارتباط فراسو و فروسو شبیه‌سازی می‌شود که در آن BS و کاربران از سیستم CDMA-GFDM پیشنهادی در این مقاله استفاده می‌کنند. مشخصات و پارامترهای شبیه‌سازی در جدول (۱) داده شده است.

جدول (۱): پارامترهای سیستم پیشنهادی در شبیه‌سازی

پارامتر	نوع/مقدار
مدلاسیون	4-QAM
فیلتر الگوی استفاده شده در GFDM	کسینوس برآمده از ریشه (Root-raised cosine) با ضریب roll-off برابر $\alpha = 0.25$
تعداد زیرحامل‌ها	$L = 64$
تعداد زیرسمبل‌ها	$M = 15$
طول یک بلاک GFDM	$N = ML = 960$
نمایه تاخیر توان کانال	Pedestrian A و Pedestrian B
طول CP	برای Pedestrian A برابر $L_C = 5$ و برای Pedestrian B برابر $L_C = 38$
تعداد کاربران در سلول	$U = 2, 4$
تعداد سمبل‌های کاربر u	$K_u = L/U$
نوع کدینگ استفاده شده در CDMA	Walsh-Hadamard
طول بردارهای فشرده ساز و گسترده ساز	64
ساز CDMA	

در شکل (۳) نمودار BER برحسب نسبت سیگنال به نویز (SNR^{15}) در ارتباط فراسو سیستم مخابراتی CDMA-GFDM پیشنهادی، زمانی که تعداد کاربران دو و چهار باشد و نمایه تاخیر توان (PDP^{16}) کانال مخابراتی Pedestrian A باشد، نشان داده شده است. همچنین در این شکل، نمودار BER برای GFDM متداول که از CDMA استفاده نمی‌کند آورده شده است. برای این سیستم به کاربران تعداد زیرحامل‌های مساوی تخصیص داده شده است. در

۳-۲- سیستم مخابراتی CDMA-GFDM در ارتباط

فروسو

در شکل (۲) مدل پیشنهادی سیستم مخابراتی CDMA-GFDM در ارتباط فروسو نشان داده شده است. مشابه ارتباط فراسو U کاربر در این حالت در نظر گرفته می‌شود و تعداد سمبل‌های کاربر u در یک زیرسمبل برابر K_u بوده به نحوی که $\sum_{u=0}^{U-1} K_u = L$. همچنین ماتریس کدکننده گسترده‌ساز کاربر u در هر زیرسمبل $\mathbf{C}_u \in \mathbb{R}^{L \times K_u}$ است. بنابراین همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، بردار سمبل‌های گسترده شده کاربر u بر روی تمامی زیر سمبل‌ها مطابق (۷) برابر است با $\bar{\mathbf{a}}_u = \bar{\mathbf{C}}_u \bar{\mathbf{d}}_u$ که در آن $\bar{\mathbf{d}}_u = [\mathbf{d}_{u,0}^T \cdots \mathbf{d}_{u,M-1}^T]^T$ از (۸) بدست می‌آید. همچنین، $\mathbf{d}_{u,m} = [d_{u,m,0} \cdots d_{u,m,K_u-1}]^T$ بردار سمبل‌های داده کاربر u در زیرسمبل m است. بنابراین سمبل‌های تمامی کاربران در یک بلاک داده در BS به صورت زیر است.

$$\bar{\mathbf{a}} = \sum_{u=1}^U \bar{\mathbf{a}}_u = \sum_{u=1}^U \bar{\mathbf{C}}_u \bar{\mathbf{d}}_u. \quad (16)$$

در نهایت در BS سمبل‌های داده گسترده شده وارد مدولاتور GFDM می‌شوند که خروجی آن برابر است با

$$\bar{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{G}} \bar{\mathbf{a}} = \bar{\mathbf{G}} \sum_{u=1}^U \bar{\mathbf{C}}_u \bar{\mathbf{d}}_u. \quad (17)$$

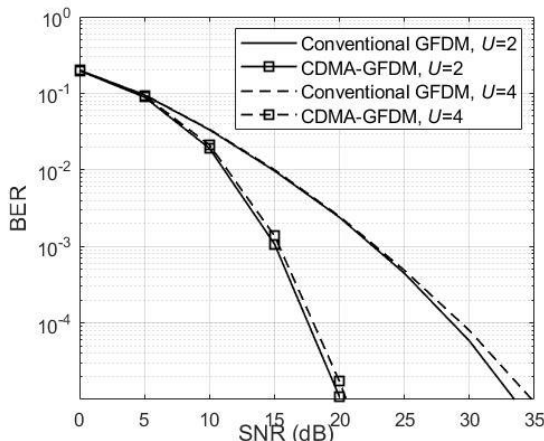
یک CP قبل از هر بلاک GFDM اضافه شده و سیگنال حاصل از BS ارسال می‌شود. برای هر کاربر سیگنال ارسالی از BS از کانال مخابراتی مربوط به آن کاربر عبور کرده و با نویز سفید گوسی جمع می‌شود. در گیرنده هر کاربر در ابتدا CP از ابتدای سیگنال دریافتی جدا می‌شود. سیگنال دریافتی در کاربر u پس از حذف CP در قالب برداری به صورت زیر قابل نمایش است.

$$\bar{\mathbf{y}}_u = \bar{\mathbf{H}}_u \bar{\mathbf{x}} + \bar{\mathbf{v}}_u = \bar{\mathbf{H}}_u \bar{\mathbf{G}} \bar{\mathbf{a}} + \bar{\mathbf{v}}_u, \quad (18)$$

که در آن، بردار دریافتی از کاربر u پس از حذف CP بوده و $\bar{\mathbf{H}}_u \in \mathbb{C}^{N \times N}$ ماتریس چرخشی کانال مخابراتی کاربر u است. همچنین، بردار نویز سفید گوسی جمع شونده در گیرنده کاربر u است. در گیرنده هر کاربر پس از حذف CP، یک تخمین‌گر قرار داده شده است. هدف از این مرحله، تخمین بردار $\bar{\mathbf{a}}$ است. به این منظور در گیرنده کاربر u از ماتریس تخمین‌گر $\mathbf{E}_u \in \mathbb{C}^{U \times N}$ استفاده می‌شود. بردار تخمین زده شده پس از به کارگیری ماتریس تخمین‌گر در کاربر u به صورت زیر می‌شود.

$$\hat{\mathbf{a}}_u = \mathbf{E}_u \bar{\mathbf{y}}_u. \quad (19)$$

در ارتباط فروسو نیز ماتریس تخمین‌گر برای هر کاربر با هدف کمینه کردن MSE طراحی می‌شود. در این صورت پس از انجام

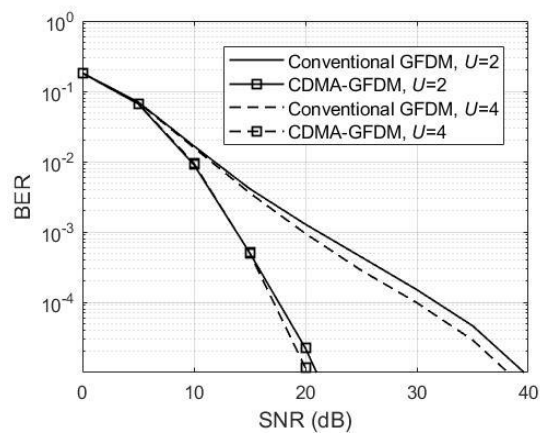


شکل (۴): نمودار BER بر حسب SNR در ارتباط فراسو برای دو و چهار کاربر و کانال مخابراتی با PDP برابر Pedestrian B.

علت این موضوع را در ادامه بررسی می‌کنیم. می‌توان گفت در BER هر کاربر با ۳ گونه تاثیر ناشی از کانال مخابراتی مواجه هستیم. یکی از این تاثیرات، تداخل بین سمبل‌های هر کاربر با خودش، دیگری تداخل بین سمبل‌های یک کاربر با کاربر دیگر و در نهایت چندگانگی فرکانسی می‌باشند. همان گونه که تداخل بین سمبل‌ها BER را افزایش می‌دهد، با بهره‌گیری از چندگانگی فرکانسی می‌توان BER را کاهش داد. برای هر کاربر یک کانال مخابراتی متفاوت از دیگر کاربران وجود دارد. در نتیجه با زیاد شدن تعداد کاربران، تعداد کانال‌های مخابراتی نیز افزایش می‌یابد. در شکل (۳) همان طور که دیدیم، با زیاد شدن تعداد کاربران احتمال خطا به میزان اندکی کاهش یافت. در اینجا با زیاد شدن تعداد کاربران (زیاد شدن کانال‌های مخابراتی) تاثیر ناشی از چندگانگی فرکانسی بر تاثیر ناشی از تداخل غلبه کرده و منجر به بهبود BER شده است. اما در شکل (۴) که فرکانس‌گزینی کانال مخابراتی خیلی بیشتر از شکل (۳) است، تداخل بسیار زیادی ایجاد شده و با زیاد شدن تعداد کاربران این تداخل بر چندگانگی فضایی غلبه کرده و BER را به میزان بسیار کمی افزایش داده است. در نهایت بایستی توجه شود که نمودارهای BER برای تعداد کاربران مختلف بسیار نزدیک به هم بوده و با استفاده از ترازرگر و کدگذاری مناسب می‌توان برای تعداد کاربران مختلف به احتمال خطای مشابه یا نزدیک به هم دست یافت.

در شکل (۵) و شکل (۶) نمودار BER بر حسب SNR در ارتباط فرسو سیستم پیشنهادی CDMA-GFDM و GFDM متداول به ترتیب برای کانال مخابراتی با PDP برابر Pedestrian A و Pedestrian B رسم شده است. تعداد کاربران دو و چهار می‌باشد. همان طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، در ارتباط فرسو نیز سیستم پیشنهادی عملکرد BER بسیار بهتری را از GFDM متداول بدست می‌آورد. مطابق شکل (۵) در کانال Pedestrian A SNRهای ۱۰ و ۲۰ dB، BER سیستم پیشنهادی نسبت به GFDM متداول به ترتیب ۱،۶ و ۸۲ برابر کاهش داشته است. همچنین با توجه

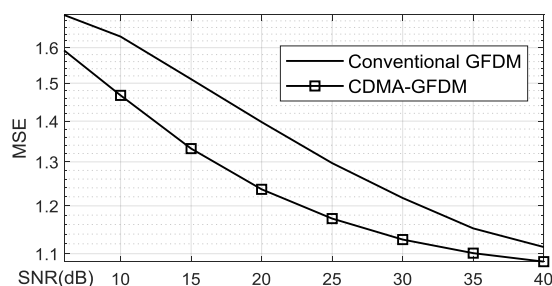
به GFDM و CDMA-GFDM متداول، تعداد سمبل‌های کاربران برابر است. تعداد سمبل‌های هر کاربر مساوی تعداد زیرحامل‌ها تقسیم بر تعداد کاربران در نظر گرفته شده است. همان طور که دیده می‌شود، سیستم پیشنهادی CDMA-GFDM احتمال خطای بسیار کمتری را نسبت به GFDM متداول بدست می‌آورد. در SNRهای برابر ۱۰ و ۲۰ dB احتمال خطای روش CDMA-GFDM نسبت به GFDM متداول به ترتیب حدود ۱،۷ و ۸۰ برابر کاهش داشته است. این موضوع نشان می‌دهد استفاده از CDMA منجر به بهره‌برداری از چندگانگی فرکانسی می‌شود و در نتیجه احتمال خطای مخابره را کاهش می‌دهد. نتیجه دیگری که در شکل (۳) دیده می‌شود، این است که احتمال خطای دو کاربر و چهار کاربر تقریباً مشابه هم هستند. اما زمانی که تعداد کاربران چهار است به مقدار جزئی کارایی بهتری بدست می‌آید.



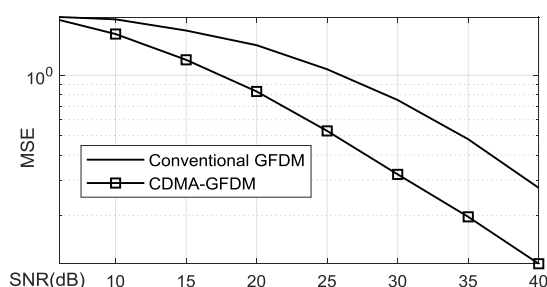
شکل (۳): نمودار BER بر حسب SNR در ارتباط فراسو برای دو و چهار کاربر و کانال مخابراتی با PDP برابر Pedestrian A.

در شکل (۴) نمودار BER بر حسب SNR در ارتباط فراسو برای کانال مخابراتی با PDP برابر Pedestrian B، که فرکانس‌گزینی بسیار بالاتری نسبت به Pedestrian A دارد، رسم شده است. همان طور که دیده می‌شود، در اینجا نیز عملکرد CDMA-GFDM پیشنهادی به طور قابل ملاحظه‌ای بهتر از GFDM متداول است. برای SNRهای برابر ۱۰ و ۲۰ dB احتمال خطای روش CDMA-GFDM نسبت به GFDM متداول به ترتیب حدود ۱،۶ و ۱۳۰ برابر کاهش داشته است. این موضوع نشان می‌دهد در کانال‌های با فرکانس‌گزینی شدید که در نسل بعد سیستم‌های مخابراتی با آن مواجه هستیم، می‌توان از سیستم پیشنهادی با کارایی مناسب بهره برد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که برای دو و چهار کاربر، BER تقریباً مشابهی بدست می‌آید. اما در کانال Pedestrian B عملکرد دو کاربر کمی بهتر از عملکرد چهار کاربر است. این در حالی است که در شکل (۳) برای کانال Pedestrian A عملکرد چهار کاربر کمی بهتر بود. با مقایسه این دو شکل می‌توان نتیجه گرفت که با زیاد شدن فرکانس‌گزینی کانال مخابراتی برای حفظ عملکرد BER بایستی تعداد کاربران را کاهش داد.

برای دو سیستم در ارتباط فراسو و فروسو برای کانال Pedestrian B وقتی تعداد کاربران ۴ باشد، مقایسه شده است. در شکل (۷-الف) نتایج برای ارتباط فراسو نشان داده شده است و در شکل (۷-ب) ارتباط فروسو مورد توجه است. با توجه به مشابهت نتایج، نمودار برای کانل Pedestrian A رسم نشده است. همان طور که دیده می‌شود چه در ارتباط فراسو و چه در ارتباط فروسو، MSE سیستم CDMA-GFDM پیشنهادی کمتر از GFDM متداول است. این نتیجه تاییدکننده نمودارهای احتمال خطا در شکل‌های پیشین است.



(الف)

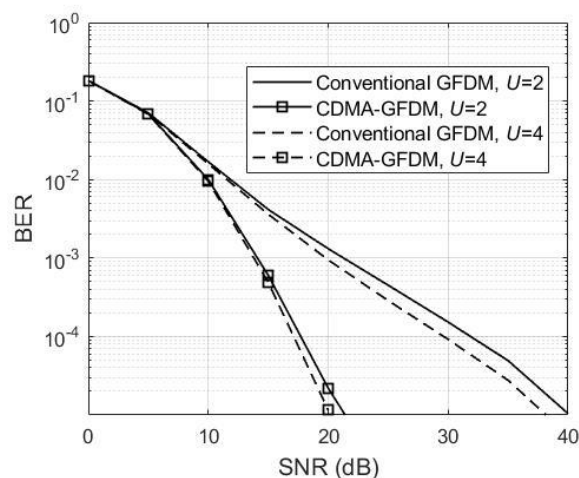


(ب)

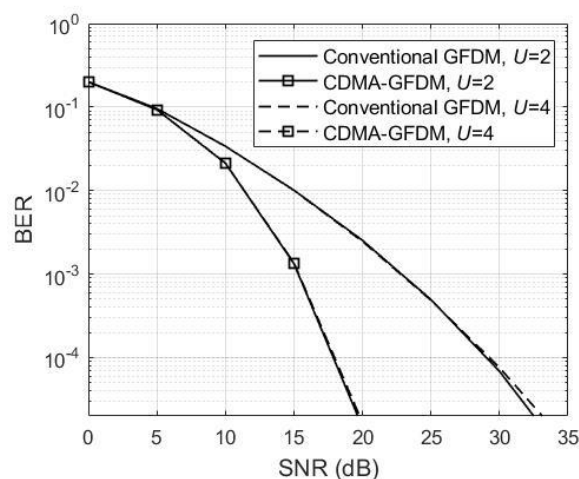
شکل (۷): نمودار MSE بر حسب SNR برای چهار کاربر و کانال مخابراتی با PDP برابر Pedestrian B در (الف): ارتباط فراسو و (ب): ارتباط فروسو.

در شکل (۸) نیز متوسط حداقل نسبت سیگنال به تداخل به اضافه نویز ($SINR^V$) سیستم CDMA-GFDM پیشنهادی با GFDM متداول در ارتباط فراسو و فروسو، وقتی تعداد کاربران ۴ باشد، برای کانال Pedestrian B مقایسه شده است. شکل (۸-الف) نتایج را برای ارتباط فراسو نشان می‌دهد و شکل (۸-ب) برای ارتباط فروسو. در اینجا نیز دیده می‌شود SINR روش پیشنهادی از GFDM متداول بیشتر است. این نمودار نیز نشان‌دهنده کارایی سیستم پیشنهادی است. نتایج در تمامی شکل‌ها در حالتی بدست آمده است که طول CP در هر دو سیستم یکسان بوده و در نتیجه کارایی پهنای باند دو سیستم یکسان است.

به شکل (۶) در کانال Pedestrian B در این دو SNR، عملکرد GFDM-CDMA نسبت به GFDM متداول به ترتیب ۱.۶ و ۱۴۸ برابر بهبود داشته است. این موضوع نشان می‌دهد روش پیشنهادی برای SNRهای پایین، SNRهای بالا، فرکانس‌گزینی کم و فرکانس-گزینی شدید بر GFDM متداول غلبه می‌کند و می‌تواند گزینه مناسبی برای سیستم‌های مخابراتی نسل بعد باشد. نکته دیگری که در شکل (۶) دیده می‌شود این است که در ارتباط فروسو برای دو و چهار کاربر BER بسیار مشابهی بدست می‌آید. نزدیک بودن BER برای دو و چهار کاربر در تمامی نتایج نشان می‌دهد شیوه پیشنهادی نسبت به تعداد کاربران حساسیت کمی دارد و برای تعداد کاربران مختلف تقریباً مشابهی بدست می‌آید.



شکل (۵): نمودار BER بر حسب SNR در ارتباط فروسو برای دو و چهار کاربر و کانال مخابراتی با PDP برابر Pedestrian A.

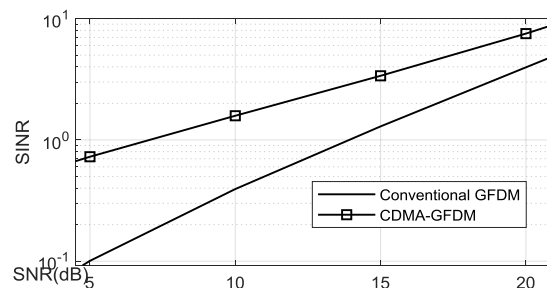


شکل (۶): نمودار BER بر حسب SNR در ارتباط فروسو برای دو و چهار کاربر و کانال مخابراتی با PDP برابر Pedestrian B.

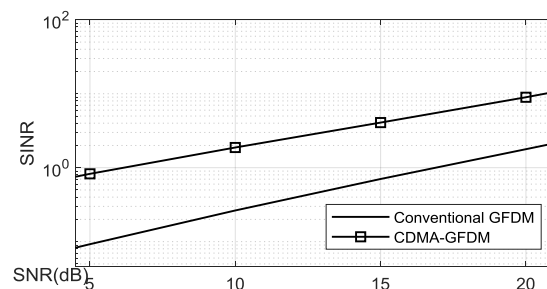
تا به اینجا روش CDMA-GFDM پیشنهادی با GFDM از نظر BER مقایسه شده است. در ادامه این دو سیستم را از نظر MSE بر حسب SNR مقایسه می‌کنیم. در شکل (۷) متوسط حداکثر MSE

۵- نتیجه گیری

در این مقاله از تکنیک CDMA برای دستیابی به چندگانگی فضایی GFDM استفاده شد. بر این مبنا، ساختاری نوین برای CDMA-GFDM در فرستنده و گیرنده برای ارتباط فراسو و فروسو پیشنهاد شد. در ارتباط فراسو، در فرستنده هرکاربر، بردار داده‌ها در ماتریس گسترده‌ساز ضرب شده و وارد مدولاتور GFDM می‌شود. در BS نیز در ابتدا یک ماتریس گیرنده بر روی سیگنال دریافتی عمل کرده و سپس ماتریس فشرده‌ساز برای هر کاربر به کار برده می‌شود. در ارتباط فروسو نیز بردار داده‌های کاربران در ماتریس گسترده‌ساز آن‌ها ضرب شده و سپس جمع آن‌ها وارد مدولاتور GFDM می‌شود. در گیرنده هرکاربر نیز ابتدا ماتریس گیرنده ضرب شده و پس از آن کدگذاری با استفاده از ماتریس فشرده‌ساز کاربر انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش CDMA-GFDM پیشنهادی BER بسیار پایین تری را نسبت به GFDM متداول در کانال‌های مخابراتی مختلف بدست می‌آورد.



(الف)



(ب)

شکل (۸): نمودار SINR بر حسب SNR برای چهار کاربر و کانال

مخابراتی با PDP برابر Pedestrian B در (الف): ارتباط فراسو و (ب): ارتباط فروسو.

مراجع

- [2] D. Demmer, R. Zakaria, R. Gerzaguët, J. -B. Doré, D. Le Ruyet, "Study of OFDM Precoded Filter-Bank Waveforms", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 18, No. 6, pp. 2889-2902, 2019, doi: 10.1109/TWC.2018.2886886.
- [۳] غلامرضائی، علیرضا، فرخی، حمید، زراعتکارمقدم، جواد. "تخصیص عادلانه منابع در سیستم چندپخش می‌تبی MIMO-OFDM با استفاده از الگوریتم "A/PSO". نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۹؛ ۱۷ (۱): ۶۹-۷۷
- [4] B. Farhang-Boroujeny, "OFDM Versus Filter Bank Multicarrier", IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 28, No. 3, pp. 92-112, 2011, doi: 10.1109/MSP.2011.940267.
- [5] D. Chen, Y. Tian, D. Qu, T. Jiang, "OQAM-OFDM for Wireless Communications in Future Internet of Things: A Survey on Key Technologies and Challenges", IEEE Internet of Things Journal, Vol. 5, No. 5, pp. 3788-3809, 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.2869677.
- [6] R. T. Kobayashi, T. Abrão, "FBMC Prototype Filter Design via Convex Optimization", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 68, No. 1, pp. 393-404, 2019, doi: 10.1109/TVT.2018.2879856.
- [7] R. T. Kobayashi, T. Abrão, "Closed-Form Bit Error Probabilities for FBMC Systems", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 69, No. 2, pp. 1237-1244, 2020, doi: 10.1109/TVT.2019.2957697.
- [۸] مجاهد، مصطفی. قاسم‌زاده، سعید. بیرانوند، حمزه. "طراحی پیش‌کدر برای بهبود عملکرد مدولاسیون OQAM DCO-FBMC چندکاربره در سیستم مخابرات نور مرئی زیر آب"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۴۰۲؛ ۲۰ (۳): ۴۷-۵۸.
- [9] C. Lélé, P. Siohan, R. Legouable, "The alamouti scheme with CDMA-OFDM/OQAM", EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Vol. 2010, pp. 1-13, 2010.
- [10] C. Lélé, P. Siohan, R. Legouable, M. Bellanger, "CDMA transmission with complex OFDM/OQAM", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Vol 2007, pp. 1-2, 2008.
- [11] S. M. J. Asgari Tabatabaee, M. Towliat, F. Samsami Khodadad, "Joint equalization-despreading method for OQAM-CDMA systems", Signal Processing, Vol. 146, pp. 92-98, 2018.
- [12] S. M. J. Asgari Tabatabaee, M. Towliat, M. Rajabzadeh, "Equalisation, despreading, and beamforming scenarios of complex spread- OFDM/OQAM in single- input multi- output channels", IET Communications. Vol. 13, No. 8, pp. 1061-1069, 2019.
- [13] R. Zakaria, D. Le Ruyet, "A Novel Filter-Bank Multicarrier Scheme to Mitigate the Intrinsic Interference: Application to MIMO Systems", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 11, No. 3, pp. 1112-1123, 2012, doi: 10.1109/TWC.2012.012412.110607.
- [14] G. Fettweis, M. Krondorf, B. Bittner, "GFDM - Generalized Frequency Division Multiplexing", VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference, Barcelona, Spain, 2009, pp. 1-4, doi: 10.1109/VETECS.2009.5073571.
- [15] Z. Na, J. Lv, M. Zhang, B. Peng, M. Xiong, M. Guan, "GFDM Based Wireless Powered Communication for Cooperative Relay System", IEEE Access, Vol. 7, pp. 50971-50979, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2911176.
- [16] A. Farhang, N. Marchetti, L. E. Doyle, "Low-Complexity Modem Design for GFDM", IEEE Transactions on Signal

- [1] M. Alsabah, M. A. Naser, B. M. Mahmmod, S. H. Abdulhussain, M. R. Eissa, A. Al-Baidhani, ... F. Hashim, "6G wireless communications networks: A comprehensive survey", IEEE Access, Vol 9, pp. 148191-148243, 2021.

- [31] P. Pallavi, P. Dutta, "Multi-Carrier CDMA overview with BPSK modulation in Rayleigh channel", 2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology, Chengdu, China, 2010, pp. 464-469, doi: 10.1109/ICCSIT.2010.5563806.
- [۳۲] رضایی، مصطفی، فرخی، حمید. "بهینه‌سازی چند منظوره برای کنترل توان در سیستم‌های سلولار CDMA". نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۳؛ ۱۱ (۲): ۳۳-۴۲.
- Processing, Vol. 64, No. 6, pp. 1507-1518, 2016, doi: 10.1109/TSP.2015.2502546.
- [17] M. Matthé, L. L. Mendes, N. Michailow, D. Zhang, G. Fettweis, "Widely Linear Estimation for Space-Time-Coded GFDM in Low-Latency Applications", IEEE Transactions on Communications, Vol. 63, No. 11, pp. 4501-4509, 2015, doi: 10.1109/TCOMM.2015.2468228.
- [18] M. Towliat, M. Rajabzadeh, S. M. J. Asgari Tabatabaee, "On the Noise Enhancement of GFDM", IEEE Wireless Communications Letters, Vol. 9, No. 8, pp. 1160-1163, 2020, doi: 10.1109/LWC.2020.2983367.
- [19] M. Towliat, S. M. J. Asgari Tabatabaee, "GFDM Interference Mitigation Without Noise Enhancement", IEEE Communications Letters, Vol. 22, No. 5, pp. 1042-1045, 2018, doi: 10.1109/LCOMM.2018.2813393.
- [20] M. Towliat, S. M. J. Asgari Tabatabaee, M. Rajabzadeh, "A Simple ML Detection for Coded Generalized Frequency Division Multiplexing in MIMO Channels", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 67, No. 3, pp. 798-807, 2019, doi: 10.1109/TSP.2018.2885485.
- [21] M. Rajabzadeh, M. Towliat, S. M. J. Asgari Tabatabaee, H. Steendam, "Uplink transceiver design for coded GFDM systems", Signal Processing. Vol. 178, pp. 197757, 2021.
- [22] S. M. J. Asgari Tabatabaee, M. Rajabzadeh, M. Towliat, "A Novel Low-Complexity GFDM Relay Communication System: Relay Selection and Filter-and-Forward", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 69, pp. 5147-5158, 2021, doi: 10.1109/TSP.2021.3108679.
- [23] S. M. J. Asgari Tabatabaee, M. Towliat, M. Rajabzadeh, F. Samsami Khodadad, "Intelligent-Reflecting-Surface-Assisted GFDM Communication Systems", in IEEE Systems Journal, Vol. 17, no. 2, pp. 2858-2867, June 2023, doi: 10.1109/JSYST.2023.3237594.
- [24] M. Liu, W. Xue, J. Gao, Jia, P., Y. Xu, S. V. Volvenko, "Prototype Filter Design for Effectively Suppressing Out-of-Band Radiation in GFDM Systems", in IEEE Communications Letters, Vol. 27, no. 2, pp. 696-700, Feb. 2023, doi: 10.1109/LCOMM.2022.3220194.
- [25] Y. Guo, X. Liu, X. Liu, T. S. Durrani, "Energy-Efficient Resource Allocation for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer in GFDM Cooperative Communications", in IEEE Networking Letters, Vol. 4, no. 1, pp. 1-5, March 2022, doi: 10.1109/LNET.2022.3141489.
- [26] P. Saengudomlert, S. Buddhacharya, "Unipolar GFDM with Dimming Support for Visible Light Communications", in IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, doi: 10.1109/TWC.2023.3268121.
- [27] Y. Kim, H. Lee, M. Matthé, G. Fettweis, H. J. Yang, "GFDM-Based Asynchronous Grant-Free Multiple-Access", in IEEE Access, Vol. 10, pp. 31012-31030, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3160017.
- [28] B. Mozaffari Tazehkand, M. R. G. Aghdam, V. Vakilian, R. Abdolee, "Novel Successive Interference Cancellation (SIC) With Low-Complexity for GFDM Systems", in IEEE Access, Vol. 10, pp. 40063-40072, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3167051.
- [29] M. B. Mello, L. L. Mendes, "Low-Complexity Detection Algorithms Applied to FTN-GFDM Systems", in IEEE Access, Vol. 10, pp. 101683-101696, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3208878.
- [30] S. Hara, R. Prasad, "Overview of multicarrier CDM", IEEE Communications Magazine, Vol. 35, No. 12, pp. 126-133, 1997, doi: 10.1109/35.642841.

زیر نویس‌ها

¹ Orthogonal Frequency Division Multiplexing

² Cyclic Prefix

³ Filter Bank Multi-Carrier

⁴ Generalized Frequency Division Multiplexing

⁵ Multiple Input Multiple Output

⁶ Intelligent Reflecting Surface

⁷ Code Division Multiple Access

⁸ Base Station

⁹ Bit Error Rate

¹⁰ Additive White Gaussian Noise

¹¹ Zero Forcing

¹² Minimum Mean Square Error

¹³ Block-diagonal matrix

¹⁴ Mean square error

¹⁵ Signal to Noise Ratio

¹⁶ Power Delay Profile

¹⁷ Signal to interference plus noise ratio

