

بهبود جبران انحراف فرکانس حامل در سیستم های چند کاربره مبتنی بر OFDM در ارسال فراسو

جواد محمدی سیاهبومی^۱، محمد جواد امید^۲ و حمید سعیدی^۳

^۱دانشگاه صنعتی اصفهان-دانشکده برق و کامپیوتر، j.mohammadisiahboomi@ec.iut.ac.ir

^۲دانشگاه صنعتی اصفهان-دانشکده برق و کامپیوتر، omidi@cc.iut.ac.ir

^۳دانشگاه یزد-دانشکده برق و کامپیوتر، saeedi@yazd.ac.ir

چکیده- از چالش های مهم سیستم های چندکاربره *OFDMA* و *SC-FDMA* حساسیت به انحراف فرکانس حامل است. انحراف فرکانس موجب تداخل بین حامل ها شده و عملکرد سیستم را تحت تاثیر قرار می دهد. روش های بسیاری برای جبران انحراف فرکانس حامل پیشنهاد شده است. عموماً این روش ها با حجم محاسباتی بالا همراه هستند. بعلاوه حساسیت بالا به مقادیر انحراف های فرکانسی و همچنین عملکرد ضعیف در سیستم هایی که از کنترل توان کامل بهره نمی برند از عمده مشکلات این روش ها محسوب می شود. الگوریتم *HLCC* یکی از روش های موفق برای جبران انحراف فرکانسی است. این تکنیک کارایی نسبتاً بالا داشته و در شرایط عدم کنترل توان نیز پایداری خوبی دارد. در کنار این مزیت ها کارایی این تکنیک با افزایش مقادیر انحراف های فرکانسی به شدت کاهش می یابد. در این مقاله یک روش ساده برای حل این مشکل پیشنهاد شده است. برای این منظور قبل از الگوریتم *HLCC*، میانگین انحراف های فرکانسی همه کاربران صفر می شود. لذا مقادیر انحراف های فرکانسی به حداقل میزان ممکن خواهد رسید. الگوریتم حاصل "*HLCC* اصلاح شده" نام گذاری شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد این ابتکار ساده علاوه بر رفع مشکل *HLCC* کارایی را به میزان شایسته ای افزایش داده و در کاهش پیچیدگی محاسباتی نیز موثر است. کلید واژه- انحراف فرکانس حامل، جبران انحراف فرکانسی، تداخل بین کاربری، حذف تداخل، مدولاسیون چند حاملی

انطباق اسیلاتورهای گیرنده و فرستنده و همچنین اثر داپلر ایجاد شده و امکان حذف کامل آن به علت خطاهای همزمان سازی در کانال های متغیر با زمان وجود ندارد [۳]. اثر CFO در سیگنال های چندحاملی به صورت تداخل بین زیرحامل ها ظاهر می شود. در سیستم های چندحاملی چندکاربره تداخل حاصل از انحراف های فرکانسی به دو بخش تداخل بین حاملی یا ICI^۵ و تداخل بین کاربری یا MAI^۶ تقسیم می شود. تداخل بین حاملی بین زیرحامل های اختصاص داده شده به یک کاربر رخ می دهد و تداخل بین کاربری تداخلی است که از زیرحامل های یک کاربر روی کاربر دیگر ایجاد می شود [۴]. در ارسال فراسو به علت تفاوت انحراف های فرکانسی کاربران هر دو نوع تداخل رخ می دهد و عملکرد سیستم را تحت تاثیر قرار می دهد. البته شایان ذکر است که میزان این دو نوع تداخل ارتباط تنگاتنگی با نحوه تخصیص کانال دارد [۴، ۵]. مهمترین انواع تخصیص، تخصیص درهمنهی شده^۷ و تخصیص دسته ای^۸ می باشند. در تخصیص درهمنهی شده زیرحامل های یک کاربر در تمام باند فرکانسی در دسترس به طور یکنواخت توزیع شده است، در حالی که در

۱- مقدمه

سیستم *OFDMA*^۱ از مشهورترین سیستم های چندحاملی چندکاربره است که با داشتن ویژگی هایی از جمله مقاومت در برابر پدیده چند مسیری کانال بیسیم، تامین نرخ ارسال بالا و همچنین انعطاف پذیری مناسب در تخصیص منابع زمانی و فرکانسی در دهه ی اخیر مورد توجه طراحان سیستم های بیسیم قرار گرفته است [۱]. از مهمترین کاربردهای *OFDMA* می توان به استاندارد WiMAX و ارسال فرسوی *LTE*^۲ اشاره کرد. همچنین سیستم *SC-FDMA*^۳ که با ایجاد تغییرات کوچک در *OFDMA* ایجاد شده و با نام *OFDMA* پیش کدگذاری شده نیز شناخته می شود به دلیل مشخصه های توانی بهتر نسبت به *OFDMA* در ارسال فراسوی *LTE* به کار گرفته شده است [۲]. به عبارتی می توان گفت این دو سیستم تشکیل دهنده لایه فیزیکی دو استاندارد مهم بیسیم هستند. از چالش های جدی سیستم های *OFDMA* و *SC-FDMA* حساسیت به انحراف فرکانس حامل یا CFO^۴ است [۳]. انحراف فرکانسی بر اثر عدم

^۵ -Inter-Carrier Interference

^۶ -Multiple Access Interference

^۷ -Interleaved Allocation

^۸ -Block Allocation

^۱ -Orthogonal Frequency Division Multiple Access

^۲ -Long Term Evolution

^۳ -Single Carrier Frequency Division Multiple Access

^۴ - Carrier Frequency Offset

تخصیص دسته‌ای زیرحامل‌های یک کاربر همه در همسایگی هم قرار دارند [۵].

روش‌های مختلفی برای جبران CFO در سیستم‌های OFDMA پیشنهاد شده است. این روش‌ها را می‌توان به دو گروه کلی تقسیم کرد. دسته اول روش‌های مبتنی بر MUD^۹ نام دارند. مبنای این روش‌ها بر این حقیقت استوار است که سیگنال دریافت شده توسط گیرنده در حوزه فرکانس حاصل ترکیب خطی سمبل‌های مختلط اطلاعات ارسال شده توسط تمام فرستنده‌ها است [۶]. ترکیب خطی مزبور با یک ماتریس $N \times N$ (ماتریس تداخل) نمایش داده می‌شود که اثر کانال و انحراف‌های فرکانسی را با هم در خود دارد، N تعداد کل زیرحامل‌ها است. حل این مسئله با معیار LS^{۱۰} و MMSE^{۱۱} سمبل‌های اطلاعات را با دقت بالا به دست می‌دهد [۶]. اما برای این منظور نیاز به محاسبه معکوس ماتریسی با بعد $N \times N$ است که پیچیدگی محاسباتی بسیار زیادی به سیستم تحمیل می‌کند. با توجه به اینکه این روش کارایی بسیار بالایی دارد، تلاش‌های فراوانی برای کاهش پیچیدگی محاسباتی آن انجام شده است. برای نمونه استفاده از الگوریتم بازگشتی گرادیان مزدوج یکی از روش‌های است که برای حل این مسئله پیشنهاد شده است [۷]. همچنین اخیراً روشی ارائه شده که با استفاده از خواص تقارنی ماتریس تداخل، معکوس ماتریس را با پیچیدگی پایین‌تری محاسبه می‌کند [۸]. لذا حجم محاسبات در این روش کمتر از حل مستقیم MMSE خواهد بود. دسته دوم که از نظر ایده ساده‌تر هستند روش‌های مبتنی بر SUD^{۱۲} نامگذاری می‌شوند. این تکنیک‌ها را می‌توان حالت خاصی از روش‌های مبتنی بر MUD دانست که البته از نظر پیچیدگی محاسباتی در سطح بسیار پایین‌تری قرار دارند. در این روش‌ها ابتدا انحراف فرکانسی هر کاربر به سادگی و با اعمال یک شیفت فرکانسی تصحیح می‌شود. به شرط دقیق بودن تخمین انحراف‌های فرکانسی، این کار تداخل ICI را به طور کامل حذف می‌کند. سپس برای بهبود کارایی با استفاده از الگوریتم‌های حذف تداخل، MAI تخمین زده شده و حذف می‌شود. از جمله مهم‌ترین روش‌های ارائه شده در این دسته می‌توان به روش HLCC^{۱۳} اشاره کرد که مراحل تصحیح انحراف فرکانسی و حذف تداخل را در حوزه فرکانس

انجام می‌دهد [۹]. این روش پیچیدگی بالایی داشته و بهترین کارایی آن زمانی حاصل می‌شود که اندازه انحراف‌های فرکانسی کوچک باشد. برای رفع این مشکل روش‌های CLPIC^{۱۴} و WLPIC^{۱۵} ارائه شده‌اند [۱۰]. در این دو روش تصحیح انحراف فرکانسی در حوزه زمان انجام می‌شود و سپس از یک الگوریتم حذف تداخل بهره گرفته و MAI را سمبل به سمبل حذف می‌کند. این روش نیز پیچیدگی نسبتاً بالایی دارد و تنها زمانی کارایی مناسب دارد که اختلاف بین انحراف‌های فرکانسی کوچک باشد. اخیراً روشی در [۱۱] ارائه شده است که تصحیح انحراف فرکانسی را نه برای حذف ICI بلکه با منظور به حداکثر رساندن متوسط توان سیگنال به متوسط توان تداخل (SIR^{۱۶}) انجام داده است. این تکنیک پیچیدگی محاسباتی پایینی دارد. اما تنها برای تخصیص درهم‌نهی شده قابل استفاده است. به طور کلی مشکل مشترک روش‌های جبران انحراف فرکانسی، که از نظر کارایی در سطح قابل قبولی هستند، پیچیدگی محاسباتی زیاد است. همچنین روش‌های مبتنی بر SUD به مقادیر انحراف‌های فرکانسی حساسیت نشان می‌دهند و هیچ یک روش کاملی برای جبران انحراف فرکانسی محسوب نمی‌شود. در بین روش‌های مبتنی بر SUD روش HLCC کارایی قابل قبولی دارد. از طرفی این روش، در سیستم‌های بدون کنترل توان، از روش‌های دیگر پایدارتر است. اما همانطور که اشاره شد کارایی این روش به مقادیر انحراف‌های فرکانسی کاربران بسیار حساس بوده و با افزایش انحراف‌های فرکانسی کارایی به شدت افت می‌کند [۹].

در این مقاله روشی معرفی شده است که با یک تغییر جزئی در الگوریتم HLCC در مرحله تصحیح انحراف فرکانسی، ضعف‌های این الگوریتم را پوشش می‌دهد. در این روش، که "HLCC اصلاح شده" نامگذاری شده است، با اعمال یک شیفت فرکانسی روی سیگنال قبل از تحویل سیگنال به الگوریتم HLCC، مقادیر انحراف‌های فرکانسی به حداقل میزان ممکن می‌رسد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این تغییر تاثیر به‌سزایی در افزایش کارایی داشته و عملاً عملکرد روش‌های CLPIC و WLPIC را زیر سوال می‌برد. علاوه بر این در [۱۰]

^{۱۴}-Conventional Linear Parallel Interference Cancellation

^{۱۵}-Weighting Linear Parallel Interference Cancellation

^{۱۶}-Signal to Interference Ratio

^۹-Multi User Detection

^{۱۰}-Least Square

^{۱۱}-Minimum Mean Square Error

^{۱۲}-Single User Detection

^{۱۳}-Huang-Letaief Circular Convolution

محسوب می‌شود. همچنین این روش به کاهش پیچیدگی محاسباتی نیز کمک شایانی می‌کند.

در ادامه ابتدا مدلی از یک سیستم OFDMA در حضور انحراف فرکانسی ارائه می‌شود. سپس در بخش سوم روش HLCC و الگوریتم اصلاح شده آن تشریح می‌شود. در بخش چهارم نتایج شبیه سازی ارائه شده و نهایتاً نتیجه‌گیری در بخش پنجم خواهد بود.

۲- مدل سیستم

یک سیستم OFDMA با تعداد N زیرحامل در ارسال فراسو مد نظر است. زیرحامل‌ها به N_u کاربر اختصاص یافته است. هر کاربر به طور مستقل از طریق کانالی مجزا اطلاعات خود را برای ایستگاه پایه (BS) ارسال می‌کند. سیگنال ارسالی کاربر m مفروض m به صورت:

$$x_n^m = GF_N^{-1} X_k^m, \quad -Ng < n < N - 1 \quad (1)$$

خواهد بود [۵]. در این رابطه X_k^m سمبل‌های اطلاعات است که تنها در محل زیرحامل‌های اختصاص داده شده به کاربر m مقدار داشته و در سایر نقاط صفر است. همچنین F_N^{-1} تبدیل فوریه معکوس N نقطه‌ای، G ماتریس ایجاد کننده پیشوند گردشی و Ng طول پیشوند گردشی است. این سیگنال از کانال چند مسیره با پاسخ ضربه h_n^m عبور کرده و به گیرنده می‌رسد.

$$y_n^m = x_n^m * h_n^m, \quad -Ng < n < N - 1 \quad (2)$$

مجموع سیگنال‌های ارسال شده توسط کاربران در گیرنده با انحراف‌های فرکانسی متفاوت دریافت می‌شود [۳]:

$$r_n = \sum_{i=1}^{N_u} e^{j\left(\frac{2\pi\varepsilon_i n}{N}\right)} y_n^i + w_n, \quad (3)$$

که w_n نویز سفید گوسی و ε_i انحراف فرکانسی نرمالیزه شده به فاصله فرکانسی بین زیرحامل‌ها است و $|\varepsilon_i| < 0.5$ فرض می‌شود.

۳- جبران انحراف فرکانس حامل

چنانچه قبلاً ذکر شد برای استخراج سمبل‌ها در این شرایط روش‌های مختلفی ارائه شده است. در این مقاله تنها روش‌های مبتنی بر SUD مورد نظر است.

در روش SUD برای استخراج سمبل کاربر m ، ابتدا سیگنال دریافت شده در حوزه زمان در عبارت $e^{-j\left(\frac{2\pi\hat{\varepsilon}_m n}{N}\right)}$ ضرب می‌شود [۱۲] که $\hat{\varepsilon}_m$ انحراف فرکانسی تخمین زده شده برای کاربر m است. اگر تخمین دقیق باشد آنگاه نتیجه می‌شود

$$\begin{aligned} \hat{y}_n^m &= e^{-j\left(\frac{2\pi\hat{\varepsilon}_m n}{N}\right)} \cdot r_n \\ &= y_n^m + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^{N_u} e^{j\left(\frac{2\pi(\varepsilon_i - \hat{\varepsilon}_m)n}{N}\right)} \cdot y_n^i \\ &\quad + w_n \cdot e^{-j\left(\frac{2\pi\hat{\varepsilon}_m n}{N}\right)}. \end{aligned} \quad (4)$$

در ادامه فرض می‌شود تخمین دقیق در دسترس بوده و داریم $\varepsilon_m = \hat{\varepsilon}_m$ ، لذا برای سادگی از نوشتن $\hat{\varepsilon}_m$ اجتناب شده است. همانطور که مشاهده می‌شود اثر انحراف فرکانسی به صورت تداخل در سیگنال دریافتی ظاهر می‌شود. برای بهبود کارایی سیستم باید تداخل ایجاد شده محاسبه و حذف شود. الگوریتم HLCC شامل دو مرحله است. مرحله اول تصحیح انحراف فرکانسی در حوزه فرکانس است که به نام تکنیک CLJL شناخته می‌شود [۱۲] و سپس در مرحله دوم تداخل باقیمانده با استفاده از یک الگوریتم تکراری محاسبه و حذف می‌شود.

۳-۱- روش HLCC

روش HLCC روش کارآمدی برای جبران انحراف فرکانسی است. ابتدا سیگنال به حوزه فرکانس انتقال یافته، سپس تصحیح انحراف فرکانسی و حذف تداخل صورت می‌گیرد. برای این کار داریم [۹]:

$$\begin{aligned} R &= DFT_N\{r_n\} = DFT_N\left\{\sum_{i=1}^{N_u} y_n^i e^{j\frac{2\pi\varepsilon_i n}{N}} + w_n\right\} \\ &= \sum_{i=1}^{N_u} Y^i \otimes C^i + W_k \end{aligned} \quad (5)$$

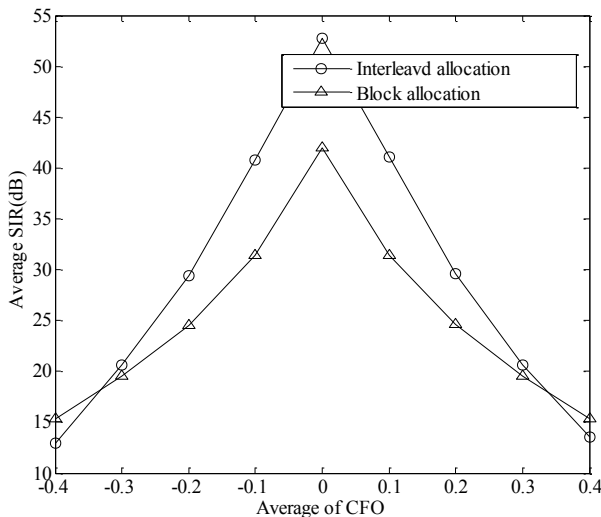
که در این رابطه $C^i = DFT_N\{e^{j\frac{2\pi\varepsilon_i n}{N}}\}$ و \otimes بیانگر کانولوشن چرخشی است. همچنین بردار R را به صورت

$$R = Y^m \otimes C^m + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^{N_u-1} Y^i \otimes C^i + W_k, \quad (6)$$

تجزیه می‌کنیم. با صرف نظر از نویز گوسی می‌توان نوشت:

برای حالت‌هایی که مقادیر انحراف‌های فرکانسی بزرگ هستند و اختلاف بین آنها کوچک است روش CLPIC و همچنین روش WLPIC معرفی شده‌اند [۱۰]. پیچیدگی این روش‌ها نیز در حد HLCC است.

فرض کنید در یک سیستم با N_u کاربر، انحراف‌های فرکانسی کاربران به صورت $\mathcal{E} = \{\mathcal{E}_i\}_{i=1}^{N_u}$ باشد. هرچه انحراف‌های فرکانسی کوچکتر باشند کارایی HLCC بیشتر خواهد بود. اگر قبل از اعمال الگوریتم HLCC با ایجاد شیفت فرکانسی در سیگنال، میانگین انحراف‌های فرکانسی صفر شود، آنگاه با حفظ اختلاف بین انحراف‌های فرکانسی به کوچکترین مقادیر انحراف‌های فرکانسی دست خواهیم یافت. در این شرایط کارایی HLCC بهبود یافته و عملکرد آن بهتر از CLPIC و WLPIC بوده و توجهی برای استفاده از آنها وجود ندارد. برای اینکه مطلب روشن‌تر دیده شود در شکل ۱ متوسط SIR روی تمام زیرحامل‌ها در خروجی الگوریتم HLCC برای دو سیستم با تخصیص درهم‌نهی شده و دسته‌ای بر حسب میانگین انحراف‌های فرکانسی رسم شده است. کاملاً واضح است که بالاترین کارایی زمانی بدست می‌آید که میانگین انحراف‌های فرکانسی صفر باشد. بر این اساس با اضافه شدن یک ضرب کننده در حوزه‌ی زمان قبل از الگوریتم HLCC شیفت فرکانسی لازم برای رسیدن به میانگین صفر در سیگنال ایجاد می‌شود. دیاگرام بلوکی این تکنیک در شکل ۲ دیده می‌شود.



شکل ۱: حساسیت الگوریتم HLCC نسبت به میانگین انحراف‌های فرکانسی

$$Y^m \otimes C^m = \mathbf{R} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^{N_u} Y^i \otimes C^i. \quad (7)$$

حال فرض کنید داشته باشیم $\tilde{C}^m = \text{DFT}_N \{e^{-\frac{j2\pi\epsilon_m n}{N}}\}$ در این صورت به سادگی نتیجه می‌شود:

$$Y^m = \tilde{C}^m \otimes \left(\mathbf{R} - \underbrace{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^{N_u} Y^i \otimes C^i}_{\text{MAI}} \right) \quad (8)$$

همان طور که در (۸) مشخص شده است، در صورت داشتن مقادیر سمبل‌ها، یعنی Y^i به سادگی با استفاده از این رابطه تداخل ایجاد شده روی کاربر m قابل محاسبه است. رابطه (۸) مبنای روش HLCC را تشکیل می‌دهد. پس از اینکه تخمینی از سمبل‌ها به روش CLJL بدست آمد می‌توان با استفاده از رابطه (۸) مقدار تقریبی تداخل را محاسبه کرده و حذف کرد و تقریب مناسب تری از سمبل‌ها بدست آورد. سپس این کار را می‌توان تا رسیدن به دقت مناسب تکرار کرد. به طور خلاصه مراحل الگوریتم HLCC با فرض تخمین دقیق از انحراف‌های فرکانسی کاربران مختلف عبارتند از [۹]:

۱- مرحله آماده سازی: تخمین اولیه سمبل‌های متاثر شده از کانال برای همه‌ی کاربران با استفاده از رابطه :

$$\hat{Y}^{m,(1)} = A^m \left(\tilde{C}^m \otimes (A^m \mathbf{R}) \right), \text{ for } m = 1, 2, \dots, N_u \quad (9)$$

۲- مرحله دوم- حلقه‌ی زام: در این مرحله تداخل MAI روی تمام کاربران به صورت زیر محاسبه می‌شود و تخمین جدید سمبل‌ها بدست می‌آید.

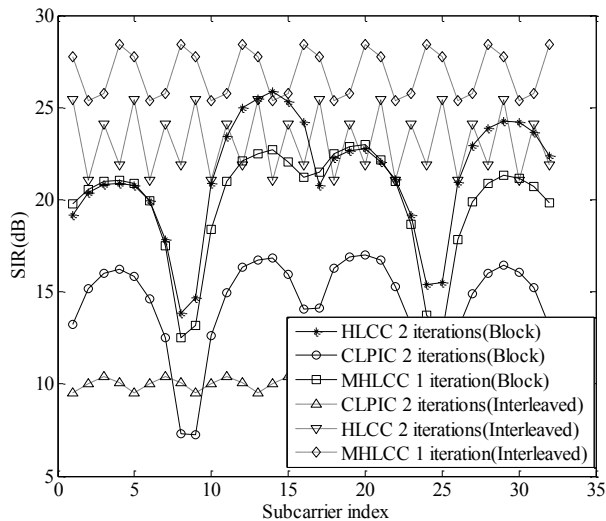
$$Y^{m,(j)} = \mathbf{R} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^{N_u} \hat{Y}^{m,(j-1)} \otimes C^i \quad (10)$$

$$\hat{Y}^{m,(j)} = A^m \left(\tilde{C}^m \otimes (A^m Y^{m,(j)}) \right), \text{ for } m = 1, 2, \dots, N_u \quad (11)$$

۳- بازگشت به مرحله دوم تا رسیدن به دقت لازم.

۳-۲- روش اصلاح شده HLCC

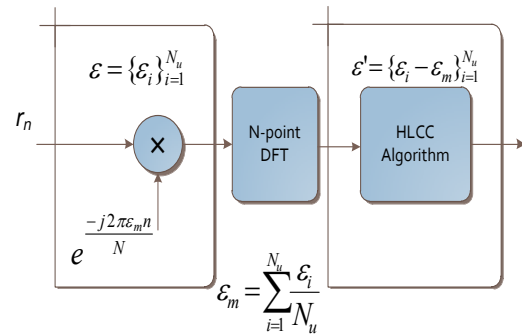
روش HLCC در حالتی که انحراف‌های فرکانسی کاربران کوچک باشد کارایی قابل توجهی دارد. با افزایش مقادیر انحراف‌های فرکانسی، کارایی این روش نیز افت می‌کند تا جایکه HLCC با پیچیدگی بسیار بالا هیچ بهبودی در نسبت توان سیگنال به توان تداخل (SIR) در خروجی ایجاد نمی‌کند.



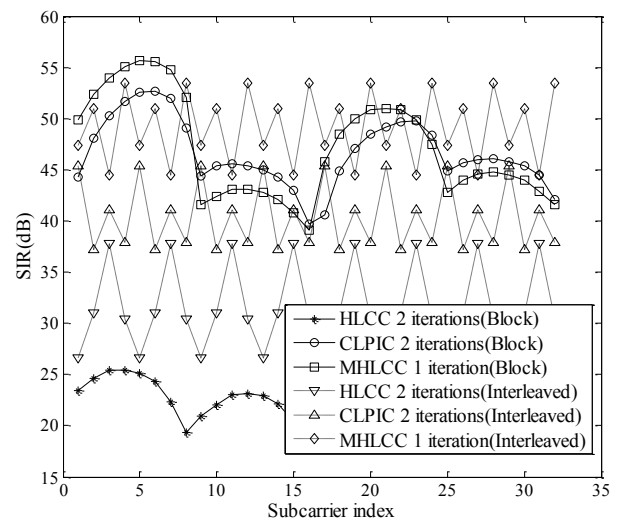
شکل ۴: SIR برای بردار انحراف فرکانسی $\varepsilon_2 = [0.25, -0.15, 0.22, -0.17]$

در شکل ۴ مقادیر انحراف‌های فرکانسی چنان انتخاب شده‌اند که کارایی CLPIC پایین و HLCC شرایط خوبی داشته باشد. بردار انحراف‌های فرکانسی برابر $\varepsilon_2 = [0.25, -0.15, 0.22, -0.17]$ است. در این شرایط نیز، در تخصیص درممنهی، برتری MHLCC بر دو روش مذکور کاملاً روشن است. همچنین در تخصیص دسته‌ای کارایی بسیار نزدیک به کارایی روش HLCC با دو تکرار الگوریتم است.

برای شبیه‌سازی حالت واقعی نمودار نرخ خطای بیت (A BER) برای حالت انحراف‌های فرکانسی تصادفی در شکل ۵ رسم شده است. سیستم دارای ۶۴ زیرحامل و ۴ کاربر است. کدگذار کانال یک کد کانولوشن چرخشی با طول قید ۵ بوده و کانال چند مسیره با طول ۴ می‌باشد. انحراف‌های فرکانسی کاربران تصادفی و بطور یکنواخت در بازه $[-0.5, 0.5]$ توزیع شده‌اند. نمودار BER هم برای تخصیص دسته‌ای و هم برای تخصیص درممنهی بهبود قابل توجهی را برای روش MHLCC در مقایسه با HLCC و CLPIC نشان می‌دهد. تا جایی که کارایی روش MHLCC با یک تکرار الگوریتم از دو روش دیگر پیشی می‌گیرد. گرچه در پیاده‌سازی این روش N ضرب مختلط به الگوریتم HLCC اضافه می‌شود. با این حال در مجموع می‌توان گفت استفاده از روش MHLCC به کاهش پیچیدگی محاسباتی کمک می‌کند. برای اینکه این موضوع روشن‌تر دیده شود، در جدول ۱ یک مقایسه عددی بین تعداد ضرب‌های مختلط مورد نیاز برای پیاده‌سازی هر الگوریتم در یک سیستم با ۴ کاربر و ۶۴ زیرحامل انجام شده است. باید توجه شود



شکل ۲: بلوک دیاگرام روش "HLCC اصلاح شده"



شکل ۳: SIR برای بردار انحراف فرکانسی $\varepsilon_1 = [0.22, 0.27, 0.19, 0.15]$

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت یک سیستم OFDMA با چهار کاربر فعال و ۳۲ زیرحامل در ارسال فراسو و در شرایط مختلف انحراف فرکانسی شبیه‌سازی شده است. روش HLCC اصلاح شده با نام MHLCC با روش‌های HLCC و CLPIC مقایسه شده است. ابتدا این روش‌ها از نظر SIR خروجی در دو حالت تخصیص درممنهی شده و تخصیص دسته‌ای مقایسه شده‌اند. بردار انحراف‌های فرکانسی در شکل ۳ برابر $\varepsilon_1 = [0.22, 0.27, 0.19, 0.15]$ نظر گرفته شده است. چون مقادیر انحراف‌های فرکانسی بزرگ هستند HLCC کارایی ضعیف دارد و چون اختلاف انحراف‌های فرکانسی کوچک است کارایی CLPIC قابل توجه است. با این حال دیده می‌شود که در تخصیص درممنهی روش MHLCC حتی با یک تکرار الگوریتم کارایی بالاتری نسبت به CLPIC با دو تکرار دارد. در تخصیص دسته‌ای نیز کارایی به مراتب بالاتر از HLCC و در حد CLPIC با دو تکرار الگوریتم است.

تکرار الگوریتم کارایی بهتری نسبت به HLCC با دو تکرار دارد. این مقایسه نشان می‌دهد که در مجموع با استفاده از MHLCC پیچیدگی محاسباتی به نصف کاهش و کارایی نیز بهبود یافته است. بنابراین روش ارائه در این مقاله نه تنها از نظر کارایی و حساسیت پایین‌تر به مقادیر انحراف فرکانسی بر HLCC برتری دارد، بلکه می‌توان پیچیدگی محاسباتی پایین را نیز از نقاط قوت آن به حساب آورد.

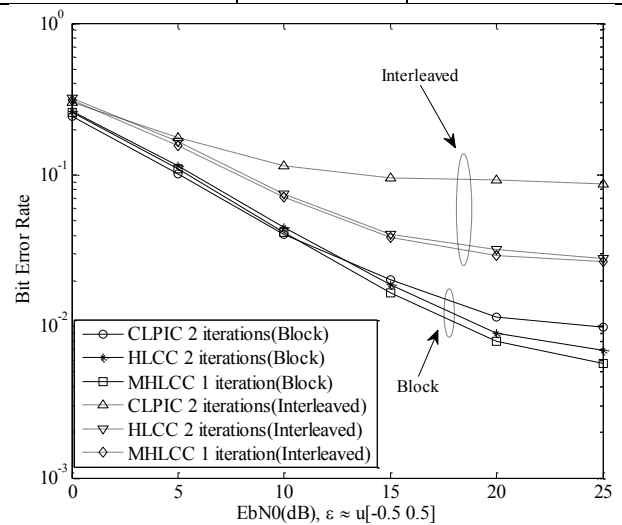
مراجع

- [1] Y., (Geoffery) Li, and G., Stuber, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communication*, Springer Science+Business Media Inc., 2006.
- [2] D., Astély, E., Dahlman, A., Furuskär, Y., Jading, M. Lindström, and S. Parkvall, "LTE: The Evolution of Mobile Broadband," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 44–51, April 2009
- [3] B.M. Morelli, C.C.J. Kuo, M.N. Pun, "Synchronization techniques for orthogonal frequency division multiple access (OFDMA): A tutorial review," *proc. of the IEEE* 95 (7) (2007) 1394-1427
- [4] S.K., Hashemizadeh, H.Saeedi-Sourck, M.J.Omidi, "Sensitivity analysis of interleaved OFDMA system uplink to carrier frequency offset", *PIMRC*, 2011, pp. 1631-1635.
- [5] محمدی سیاهبومی، ج. کاهش پیچیدگی جبران انحراف فرکانس حامل در سیستم SC-FDMA، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بهار ۱۳۹۲.
- [6] F. S., Al -kamali, M., Dessouky, I. B., Sallam, M. F. Shawki, and F. E., Abd El-Samie, "Equalization and carrier frequency offsets compensation for the SC-FDMA system", *Wireless Pres Commun., Springer*, September 2011.
- [7] K., Lee, S.-R., Lee, S.-H. Moon and I. Lee, "MMSE-Based CFO compensation for uplink OFDMA systems with conjugate gradient," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2012
- [8] A., Farhang, N., Marchetti, and L. E., Doyle, "Low Complexity LS and MMSE Based CFO Compensation Techniques for the Uplink of OFDMA Systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2013.
- [9] D., Huang, and K.B., Letaief, "An interference cancellation scheme for carrier frequency offsets correction in OFDMA systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 7, pp. 1155-1165, Jul. 2005.
- [10] S., Manohar, D., Dheeraj, V., Tikiya, and A., Chokalingam, "Cancellation of multiuser interference due to carrier frequency offsets in uplink OFDMA," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 7, July 2007.
- [11] J., Mohammadi-Siahboomi, M.J., Omidi, H, Saeedi-Sourck, " A low-complexity CFO compensation technique for interleaved OFDMA system uplink," *Telecomm (IST), Sixth International Symposium on*, 2012, pp. 221 - 225.
- [12] J. Choi, C. Lee, H.W. lung, and Y.H. Lee, "Carrier frequency offset compensation for uplink of OFDM-FDMA systems," *IEEE commun. Lett.*, vol. 4, no. 12, pp. 414-416, Dec. 2000.

که روش MHLCC تنها با یک تکرار به پاسخی بهتر از دو روش دیگر با دو تکرار می‌رسد.

جدول ۱: مقایسه عددی پیچیدگی محاسباتی

تکنیک مورد استفاده	تعداد ضرب‌های مختلف	
	۶۴ زیرحامل	۱۰۲۴ زیرحامل
HLCC با دو تکرار	۱۱,۴۵۶	۲,۸۸۸,۷۰۴
CLPIC با دو تکرار	۸,۱۸۰	۱,۵۹۳,۸۵۶
MHLCC با یک تکرار	۶,۴۰۰	۱,۵۷۸,۰۴۸



شکل ۵: مقایسه BER برای روش‌های مختلف جبران انحراف فرکانسی.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای اصلاح الگوریتم HLCC برای جبران انحراف فرکانس حامل پیشنهاد شد. روش حاصل، که MHLCC نامیده شد، نسبت به HLCC هیچ‌گونه افزایشی در پیچیدگی محاسباتی ندارد. با این وجود به میزان قابل ملاحظه‌ای کارایی را بهبود بخشیده و حساسیت الگوریتم را نسبت به مقادیر انحراف‌های فرکانسی کاسته است. با این کار مهم‌ترین عیب HLCC پوشش داده شده است. از طرفی با توجه به نتایج شبیه‌سازی، بهبود کارایی به حدی است که MHLCC تنها با یک