

تخمین کانال با استفاده از دنباله FZC در روش SC-FDE و مقایسه با عملکرد

سامانه OFDM در کاهش PAPR برای مدولاسیون مرتبه بالا

علیرضا صوفی نژاد^{۱*}، سیدهادی رفیعی آذر^۲

۱- دانشجوی دکترای مخابرات، دانشگاه شاهد، ۲- کارشناس ارشد مرکز تحقیقات صدر

(دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۶، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۲)

چکیده

سامانه‌های بی‌سیم باند وسیع در محیط‌های مسکونی و تجاری به دلیل ویژگی‌های انتشاری مخرب از جمله پدیده چند مسیری با شرایط متغییر کانال رو به‌رو هستند. روش ارسال OFDM یک الگوی چند حاملی مفید برای مقابله با این اثرات کانال می‌باشد. الگوریتم SC-FDE یکی از روش‌های نوین در حوزه مخابرات محسوب می‌شود که ضمن تخمین دقیق کانال، ویژگی منفی سامانه‌های OFDM را به‌خصوص در زمینه حساسیت به تقویت‌کننده‌های RF، حساسیت به انحراف فرکانسی و چالش PAPR پوشش می‌دهد. سامانه‌های SC-FDE به دلایل ساختاری با حساسیت کمتری نسبت به اختلالات RF و غیرخطی بودن تقویت‌کننده توان همراه است و همین امر باعث بهبود متغیر PAPR در مدولاسیون مرتبه بالا شده است. در این مقاله از رویکرد جدیدی برای استفاده از دنباله FZC در هماهنگ‌سازی و تخمین کانال در قالب اطلاعات استفاده شده است و عملکرد لینک رادیویی در مدولاسیون QAM ۲۵۶ مورد بررسی قرار داده شده است. علاوه بر آن، با استفاده از تغییر تناوب ارسال داده‌های آموزشی متناسب با شرایط کانال، ارسال اطلاعات اضافی در لینک رادیویی کاهش داده شده است. استفاده از این روش باعث می‌شود تا در کانال‌های مناسب تا ۴ برابر ارسال دنباله تعلیم کمتر شود.

کلید واژه: OFDM، SC-FDE، دنباله Frank-Zodoff، تخمین کانال، PAPR

۱- مقدمه

ارسال تک حاملی با جبران‌سازی حوزه فرکانس یا SC-FDE^۱ بر مبنای فناوری مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد (OFDM^۲) مطرح شد در لایه فیزیکی رنج گسترده‌ای از سامانه‌های مخابراتی، عملیاتی می‌باشد. ارسال به روش OFDM در گذشته توسط اتحادیه‌های تعیین استاندارد مخابراتی برای محدوده وسیعی از شبکه‌های سیمی و بی‌سیم تعیین و تأیید شده است، (IEEE 802.16a, ITU) [۱، ۲]. از ویژگی‌های OFDM می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- افزایش انعطاف‌پذیری و عملکرد سامانه‌های مخابراتی در کانال‌های انتشار چند مسیری با ارائه مدلی با پیچیدگی پایین و بهینه برای حذف تداخل بین نمونه‌ها (ISI^۳) می‌شود.
- امکان دستیابی به ظرفیت کامل کانال در صورت انطباق پیام‌رسانی با شرایط و حالات کانال انتشار.

توانایی دسترسی به استراتژی داپورسیتی فرکانسی به دلیل مالی پلکسینگ در حوزه فرکانس را برای سامانه‌های مخابراتی چند کاربری فراهم می‌آورد.

اگرچه OFDM یک پیشنهاد در لایه فیزیکی استاندارد سامانه‌های مخابراتی باند وسیع به‌شمار می‌رود ولی دارای مشکلاتی از جمله مقدار زیاد PAPR^۴ (نسبت بیشترین توان به توان میانگین)، غیرخطی بودن تقویت‌کننده و حساسیت بالا به انحراف فرکانسی (CFO^۵) می‌باشد.

بر اساس مشکلات و معایب مطرح شد برای سامانه‌های مبتنی بر فناوری OFDM به‌منظور طراحی جایگزین مناسب برای پوشش ضعف PAPR، فناوری جدیدی با عنوان SC-FDE معرفی شده است که از ترکیب مدولاسیون‌های تک حاملی با جبران‌سازی حوزه فرکانس به‌دست آمده است. ایده‌های اولیه از سامانه‌های SC-FDE به سال ۱۹۹۳ برمی‌گردد که شوارتز و والزن اولین تعاریف را برای آن مطرح کردند و در سال‌های بعد از آن با قوت گرفتن بحث‌ها روی سامانه‌های چند حاملی، سامانه

* رایانامه نویسنده مسئول: Soofinejad@gmail.com

^۱ Single Carrier and Frequency Domain Equalization

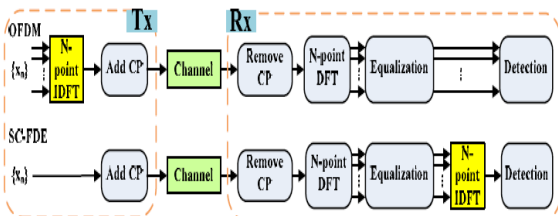
^۲ Orthogonal Frequency Division Multiplexing

^۳ Inter Symbol Interference

^۴ Peak-to-Average Power Ratio

^۵ Carrier frequency offset

مشخص است، تنها تفاوت ظاهری در این می‌باشد که زیر بلوک IFFT که در OFDM در سمت فرستنده قرار داشت در SC-FDE به سمت گیرنده انتقال داده شده است [۴].



شکل (۱): مقایسه نمودار بلوکی سامانه‌های OFDM و SC-FDE

از دید مفهومی نیز تفاوت بنیادینی میان این دو سامانه برقرار است به‌گونه‌ای که در سامانه‌های OFDM از فناوری چندحاملی برای بالا بردن بهره پهنای باند استفاده می‌شود. این در حالی است که سامانه‌های SC-FDE از فناوری تک حاملی متداول بهره می‌برند. مقایسه اجمالی مزایا و معایب این دو روش، نشان دهنده این موضوع می‌باشد که سامانه SC-FDE از اثر PAPR کمتر و حساسیت پایین‌تر به انحراف فرکانسی نسبت به سامانه OFDM برخوردار است [۷].

۲-۲- الگوریتم عملیاتی سامانه SC-FDE

در کانال‌ها با اثر محوشدگی برای بازسازی و جبران‌سازی اطلاعات در گیرنده نیاز به آگاهی از پاسخ حالت کانال (CSI) می‌باشد. یکی از مده‌سازی‌های استاندارد برای کانال‌های محوشدگی، کانال رایلی است که در این مقاله نتایج شبیه‌سازی‌ها براساس الگوی رایلی بنا نهاده شده است. برای اطلاع از CSI کانال رایلی نیاز به اجرای سازوکاری جهت استخراج پاسخ کانال می‌باشد. به علمی که به مطالعه مجموعه روش‌هایی برای استخراج پاسخ کانال می‌پردازد، تخمین کانال^۱ گویند. پایه تمامی جبران‌سازها در سامانه‌های مخابراتی دانستن پاسخ کانال با استفاده از روش‌های تخمین کانال می‌باشد [۸].

برای تخمین کانال می‌بایست دو مرحله را در گیرنده دنبال کرد. این دو مرحله عبارتند از:

۱- شناسایی پاسخ اولیه کانال ۲- دنبال کردن پاسخ کانال

در مرحله اول ابتدا باید با دریافت پیام استاندارد شده میان فرستنده و گیرنده پاسخ کانال را محاسبه کرد. پیام نمونه به‌گونه‌ای استاندارد می‌شود تا پاسخ کانال را به‌درستی در گیرنده پوشش دهد [۳]. در واقع این پیام در حوزه زمان و فرکانس می‌بایست طیف پاسخ کانال را با تقریب مناسبی درگیرنده مدل‌سازی کند. در مرحله بعد (مرحله ۲) با استفاده از

SC-FDE تا سال‌ها مورد توجه قرار نگرفت و براساس همین مسئله مقالات و گزارش‌ها زیادی در زمینه OFDM مطرح شده است و به SC-FDE توجه کمتری بوده است [۳].

سامانه SC-FDE از اثر PAPR و حساسیت به انحراف فرکانسی فوق‌العاده کمتر نسبت به سامانه OFDM برخوردار است. از این جهت سامانه SC-FDE در سالین اخیر مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است.

با بررسی‌های صورت گرفته به این نتیجه می‌توان رسید که عملکرد و پیچیدگی سامانه‌های SC-FDE در مقایسه با OFDM براساس نکات مطرح شده، کاملاً مشترک می‌باشد. ولی سامانه SC-FDE نیز در متغیرهای چون بهره پهنای باند و اثرات کانال ISI بهینه محسوب نمی‌شود. از طرفی در کاهش PAPR بسیار موفق است. پس عملاً انتخاب میان SC-FDE و OFDM با توجه به شرایط سامانه و کانال قابل بحث و نتیجه‌گیری است [۴].

در ادامه مقاله در بخش (۲) ساختار عملیاتی SC-FDE همراه با مقایسه سامانه OFDM شرح داده می‌شود. در بخش (۳) مدل‌سازی سامانه SC-FDE پیشنهادی و در بخش (۴) نتایج شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی ارائه می‌شود. در انتها نیز از اطلاعات به‌دست آمده نتیجه‌گیری نهایی صورت می‌گیرد.

۲- ساختار عملیاتی سامانه SC-FDE

برای پیاده‌سازی سامانه مخابراتی بر مبنای روش ارسال SC-FDE نیاز می‌باشد تا ساختار عملیاتی و کاربردی این سامانه در مقایسه با سامانه OFDM مورد بررسی قرار گیرد و نمودار بلوکی استاندارد این روش معرفی شود [۵].

۲-۱- مقایسه ساختاری SC-FDE با OFDM

برای مقایسه دو سامانه SC-FDE و OFDM، نمودار بلوکی آن‌ها به نمایش درآمد است. شکل (۱) در قسمت بالا نمودار بلوکی سامانه OFDM و در قسمت پایین نمودار بلوکی سامانه SC-FDE را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از مقایسه دو سامانه برمی‌آید، ساختار سامانه SC-FDE در مقایسه با OFDM به‌خصوص در قسمت فرستنده ساده‌تر شده است ولی در بخش تخمین کانال با پیچیدگی‌هایی همراه است که در ادامه به تفصیل اشاره می‌شود [۶].

از آنچه با مقایسه ساختار دو سامانه برمی‌آید به این نکته می‌توان اشاره داشت که در SC-FDE زیر بلوک‌های FFT (تبدیل فوریه) و IFFT (عکس تبدیل فوریه) برخلاف سامانه OFDM هر دو در سمت گیرنده قرار گرفته‌اند. نشانه‌ای بر این جابه‌جایی در نمودار بلوکی شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که

^۱ Channel Estimation

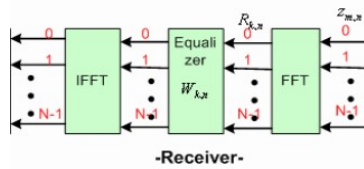
رسیدن به حداکثر ظرفیت قابل ارسال تعیین می‌شود. نمونه‌ای از الگوریتم تولید دنباله تعلیم در شکل (۲)، (سمت چپ) به نمایش درآمده است [۹].

در این مقاله با توجه به در نظر گرفتن ساختار TDD برای ارسال و دریافت، در هر لحظه کاربرها می‌توانند اطلاعات کانال را برای هم ارسال کنند. به همین دلیل بعد از مشخص شدن مؤلفه زمان همدوسی کانال، قرار دادن دنباله FZC در اطلاعات به صورتی انجام می‌گیرد که بیشترین گذردهی ممکن در سامانه رادیویی وجود داشته باشد.

برای این منظور میزان تناوب ارسال اطلاعات برای تخمین کانال به صورتی انجام می‌پذیرد که تعداد داده‌های ارسالی به زمان همدوسی کانال نزدیک شد، دنباله آموزشی مجدداً ارسال شود.

۲-۴- جبران سازی خطی در سامانه SC-FDE

در سمت گیرنده بعد از عملیات تخمین کانال و با داشتن پاسخ تقریبی از کانال، حال می‌توان از روش جبران سازی جهت بازسازی اطلاعات ارسالی استفاده کرد. جبران سازی در سامانه‌های SC-FDE از نوع فرکانسی و خطی می‌باشد. به همین دلیل قبل از جبران سازی از پیام دریافتی تبدیل فوریه گسسته گرفته می‌شود و بعد از جبران سازی حوزه فرکانس با تبدیل عکس فوریه پیام جبران شده در حوزه زمان تولید می‌شود. برشی از عملیات جبران سازی حوزه فرکانس به صورت خطی در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): نمودار بلوکی جبران سازی حوزه فرکانس [۱۲]

دو روش متداول برای جبران سازی خطی Zero forcing و MMSE می‌باشد. روش Zero forcing از سادگی محاسباتی برخوردار است که در اکثر سامانه‌های مخابراتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تابع جبران سازی این روش در رابطه (۱) آمده است:

$$C(F) = \frac{1}{F(f)} \quad (1)$$

در این رابطه عبارت F نتیجه تخمین کانال می‌باشد. اطلاعات در حوزه فرکانس با ضرب مؤلفه به مؤلفه در تابع جبران ساز C(f) باز سازی می‌شود و اثر محوشدگی کانال در گیرنده اصلاح می‌شود. در این مقاله از این روش استفاده می‌شود.

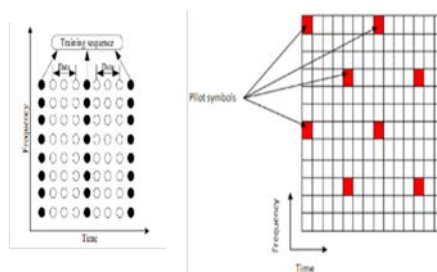
در روش MMSE با استفاده از تابع تخمین کانال که پیشتر توضیح داده شده است و جبران سازی با رابطه (۲) صورت

پاسخ محاسبه شده، جبران سازی لازم برای بلوک‌های اطلاعاتی را فراهم می‌آید. جبران سازی به دو روش خطی و غیرخطی صورت می‌گیرد [۵].

۲-۳- ساخت دنباله تخمین گر در سامانه SC-FDE

برای تخمین کانال و جبران سازی نیاز است تا پاسخ کانال با ارسال پیام نمونه در گیرنده محاسبه شود. پیام نمونه یا مرجع باید به گونه‌ای مدل شود که در هر دو سمت فرستنده و گیرنده از نوع، طول و زمان ارسال آن مطلع باشند تا با داشتن ملاک مناسبی از پیام نمونه در گیرنده و اثر پاسخ کانال محوشدگی بر روی آن بتوان به درستی تخمین را صورت داد. این پیام‌ها از استانداردهای خاصی پیروی می‌کنند. دو دسته پیام نمونه وجود دارد. دسته اول داده آموزشی^۱ و دسته دیگر دنباله تعلیم^۲ می‌باشد.

در سامانه‌های OFDM پاسخ کانال از داده‌های آموزشی که در میان پیام‌های اطلاعات با تناوب مشخصی تکرار می‌شود، به دست می‌آید. داده‌های آموزشی تنها یک نمونه اطلاعاتی می‌باشند که در زمان و فرکانس تناوبی تکرار می‌شوند. مثالی از الگوی قرار گرفتن داده‌های آموزشی در سامانه OFDM را در شکل (۲)، (راست) نشان داده شده است [۱].



شکل (۲): تخمین کانال با داده آموزشی (راست) و نمونه‌ای از توزیع دنباله تعلیم با تناوب ۴

در سامانه‌های SC-FDE به دلیل عدم ورود به حوزه فرکانس در فرستنده و تک حاملی بودن امکان استفاده از داده آموزشی فراهم نمی‌باشد. بدین منظور از دنباله تست با عنوان دنباله تعلیم استفاده می‌شود. ویژگی ساختاری این پیام در این است که در دور زمانی ارسال یک بلوک اطلاعاتی در کل طیف فرکانسی تعیین شده برای سامانه مخابراتی ارسال این دنباله صورت می‌گیرد. تکرار ارسال دنباله تخمین با تناوب استاندارد و مشخصی انجام می‌گیرد.

دوره تناوب ارسال دنباله براساس متغیرهایی چون سرعت تغییرات کانال، نوع محوشدگی کانال رایلی و الزامات سامانه برای

^۱ Pilot

^۲ Training Sequence

دنباله FZC بیش از ۲ برابر کاهش پیدا می‌کند. این کاهش در حالت استفاده از لینک رادیویی در لینک‌های نقطه به نقطه تا ۴ برابر می‌تواند کاهش پیدا کند. این کاهش موجب افزایش ارسال اطلاعات در سامانه می‌شود که منجر به افزایش گذردهی لینک می‌شود. پیام دریافتی در حوزه زمان در رابطه (۳) نشان داده شده است.

$$Y(k) = X(k)H(k) + N(k) \quad (0 < k < M - 1) \quad (۳)$$

حال اگر دنباله تعلیم ارسالی در حوزه زمان برابر با $X_{tr}(n)$ در نظر بگیریم پیام دریافتی $Y_{tr}(n)$ در حوزه فرکانس به فرم رابطه (۴) می‌شود:

$$Y_{tr}(k) = X_{tr}(k)H(k) + N(k) \quad (0 < k < M - 1) \quad (۴)$$

در این رابطه $H(k)$ پاسخ فرکانسی کانال و $N(k)$ اختلال^۱ گوسی جمع شوند خواهد بود. حال با علم به دریافت دنباله تعلیم در گیرنده با تقسیم پیام دریافتی بر پیام مرجع استاندارد تخمین انجام می‌پذیرد و پاسخ فرکانسی کانال مورد نظر محاسبه می‌شود. تابع تخمین کانال را می‌توان به صورت رابطه (۵) نشان داد [۱۰].

$$H_{est}(k) = \frac{Y_{tr}(k)}{X_{tr}(k)} \quad (0 < k < M - 1) \quad (۵)$$

بعد از تخمین مناسب از وضعیت کانال، فرستنده شروع به ارسال رشته اطلاعات در تعداد بلوک‌های مشخص شده می‌کند. اطلاعات ارسالی $X_{tr}(n)$ می‌باشد که بعد از عبور از کانال پیام $Y_{tr}(n)$ در گیرنده دریافت می‌شود. پیام دریافتی در حوزه فرکانس در رابطه (۶) آورده شده است.

$$Y(k) = X(k)H(k) + N(k) \quad (0 < k < M - 1) \quad (۶)$$

حال در بخش جبران‌سازی با استفاده از تخمین کانالی که از دنباله تعلیم حاصل شده بود، اطلاعات طبق رابطه زیر با تقریب مناسبی بازسازی می‌شود. باید توجه داشت که از هر تخمین کانال که از دنباله تعلیم به دست می‌آید تنها برای مجموعه بلوک‌های اطلاعات با طول مشخصی امکان حداکثر جبران‌سازی را فراهم می‌آورد. این زمان برابر با زمان همدوسی کانال T مشخص می‌شود. برای دنبال کردن تغییرات کانال می‌بایست بعد از تناوب تعیین شده (N) مجدداً ارسال دنباله تعلیم تکرار شود.

عملیات جبران‌سازی بر پیام دریافتی با کمک تخمین کانال به روش Zero Forcing در معادله (۷) نشان داده شده است.

$$Y_{eq}(k) = \frac{Y(k)}{H_{est}(k)} \quad (0 < k < M - 1) \quad (۷)$$

می‌گیرد. در این مدل نیز بلوک اطلاعات دریافتی بعد از تبدیل به حوزه فرکانس در تابع جبران‌سازی رابطه (۲) ضرب می‌شود و با تبدیل عکس فوریه به حوزه زمان می‌رود.

$$C(k) = \frac{H^*(k)}{|H(k)|^2 + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2}} \quad (۲)$$

در این رابطه $H(k)$ تابع تخمین و عبارت $\frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2}$ عکس SNR دریافتی پیام می‌باشد. در سامانه SC-FDE مورد بررسی به منظور حذف اثر تداخلی بین نمونه‌ها (ISI) از روش اضافه کردن CP استفاده می‌شود. در این روش با کپی برداری از انتهای نمونه‌های ارسالی با طول استاندارد و اضافه کردن به پیام ارسالی، شرایطی به وجود می‌آید تا در گیرنده با حذف این رشته اطلاعات چرخشی از ابتدای پیام دریافتی اثر ISI کاهش یابد.

۳- مدل‌سازی سامانه SC-FDE پیشنهادی

۳-۱- ساختار قاب‌بندی پیشنهادی

سامانه مخابراتی مبتنی بر روش SC-FDE از ساختار قاب‌بندی استاندارد پیروی می‌کند به گونه‌ای که ابتدای قاب پیام ارسالی دنباله تعلیم خواهد بود. نمونه‌های این دنباله در ابتدای بلوک اطلاعات قرار می‌گیرند. طول بلوک اطلاعات و طول دنباله تعلیم به شکل خاصی کنترل می‌شود تا میزان گذردهی لینک به حداکثر خودش برسد. نحوه قرار گرفتن رشته نمونه‌ها اطلاعات و دنباله تعلیم در یک قاب اطلاعاتی در شکل (۴) نشان داده شده است.

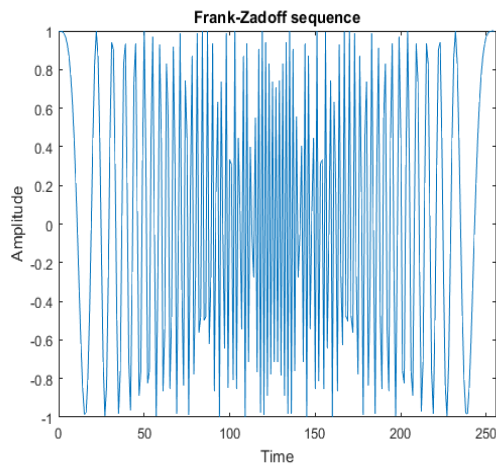
Training sequence	data	data	Training sequence
-------------------	------	------	------	-------------------

شکل (۴): ساختار قاب‌بندی اطلاعات در سامانه SC-FDE

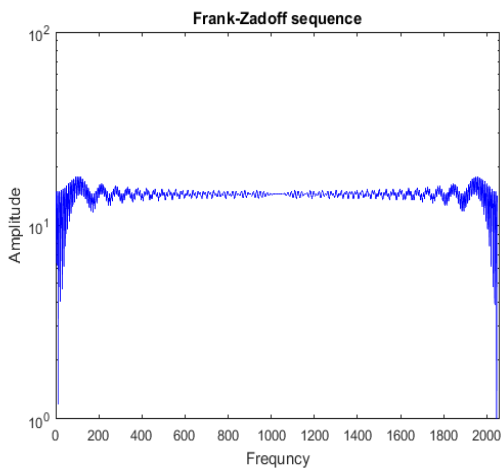
طول بلوک اطلاعات و دنباله تعلیم برابر با M فرض شده است. فاصله میان دو دنباله تعلیم برابر با N خواهد بود. طول تناوب تکرار دنباله تعلیم (N) با توجه به حالت کانال و سرعت محوشدگی برای رسیدن به حالت بهینه قابل تغییر و انتخاب قرار داده شده است.

برای این منظور و بعد از مشخص شدن زمان همدوسی کانال (T) طول رشته‌های اطلاعات را به زمان‌های Δt ثانیه تقسیم می‌شود. هر Δt ثانیه شامل M داده می‌باشد. کل بازه ارسال یک قاب برابر N در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله سعی شده است اطلاعات با طول Δt ثانیه طوری در قاب اطلاعات قرار داده شود که برای ارسال اطلاعات قاب رابطه $N < 10 * T$ برقرار باشد. با چنین تغییری در ساختار قاب می‌توان دید که میزان ارسال

^۱ Noise



شکل (۵): پاسخ زمانی دنباله تعلیم از نوع Frank-Zadoff با طول ۲۵۶ نمونه.



شکل (۶): پاسخ فرکانسی دنباله تعلیم از نوع Frank-Zadoff با طول ۲۵۶ نمونه.

هر یک از زیر بلوک‌ها شامل متغیرهایی هستند که براساس طراحی فنی سامانه مخابراتی تعیین می‌شوند. بر این اساس، در این مقاله طول پنجره FFT برابر، ۱۰۲۴ طول CP به اندازه یک شانزدهم طول بلوک اطلاعات، کانال از نوع رایلی به همراه اختلال گوسی جمع شوند، جابه‌جایی داپلری کانال به مقدار ۲۰ Hz، مدولاسیون مورد استفاده QAM ۲۵۶، پهنای باند ارسالی MHz ۵۶، دنباله تعلیم از نوع Frank-Zadoff و به اندازه طول بلوک اطلاعاتی و دوره تناوب تکرار دنباله تعلیم در میان بلوک‌های اطلاعاتی متغیر بین ۱۰ تا ۴۰ می‌باشد که وابسته به نوع کانال متغیر خواهد بود. در سناریو مطرح شده نتایج به قرار زیر است:

ابتدا نمودار پاسخ زمانی و فرکانسی کانال و همچنین پاسخ فرکانسی تخمینی را که با کمک دنباله تعلیم در گیرنده محاسبه می‌شود در یک قالب رسم می‌شود. شکل (۷) پاسخ زمانی و شکل (۸) پاسخ فرکانسی کانال (اصلی و تخمینی) را نشان می‌دهند.

برای رسیدن به بهینه‌ترین حالت، متغیرهای فراوانی بر سامانه SC-FDE تأثیرگذار است. از جمله موارد اثرگذار می‌توان به طول بلوک اطلاعات (M)، دوره تناوب پیام (N)، طول پنجره FFT در بخش جبران‌سازی، طول CP در پیام ارسالی، مرتبه مدولاسیون QAM و پهنای باند تخصیص داده شده به سامانه اشاره کرد. طول FFT برابر با طول بلوک‌های اطلاعاتی تعیین می‌شود.

۳-۲- ساخت دنباله تعلیم

همان‌طور که پیشتر گفته شد، دنباله تعلیم کل پهنای باند کانال را در طول زمانی یک بلوک اطلاعاتی اشغال می‌کند. دنباله تعلیم از پیام‌های استاندارد انتخاب می‌شوند تا دارای ویژگی زیر باشند [۱۰]:

۱- دامنه ثابت پیام در حوزه فرکانس

۲- محدوده دامنه ثابت پیام در حوزه زمان به منظور کاهش PAPR

دنباله معروفی که به‌عنوان تعلیم از آن بهره برده می‌شود، دنباله Frank-Zadoff می‌باشد. تابع این دنباله در رابطه (۸) آورده شده است [۱۱]:

$$x_u(n) = \exp\left(-j \frac{\pi u n(n + c_f + 2q)}{N_{zc}}\right) \quad (8)$$

N_{zc} = length of sequence

$c_f = N_{zc} \bmod 2$

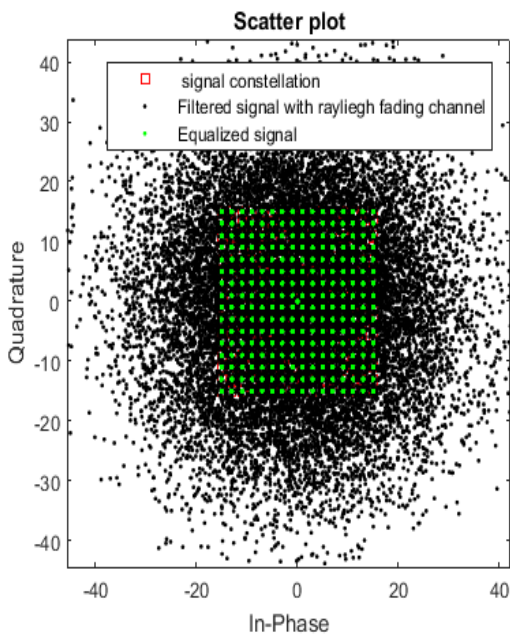
$0 < u < N_{zc}$

در مدل‌سازی سامانه SC-FDE در این مقاله از دنباله Frank-Zadoff جهت تخمین کانال استفاده می‌شود. پاسخ زمانی و فرکانسی دنباله Frank-Zadoff با ۲۵۶ نمونه در نمودار شکل (۵، ۶) نشان داده شده است.

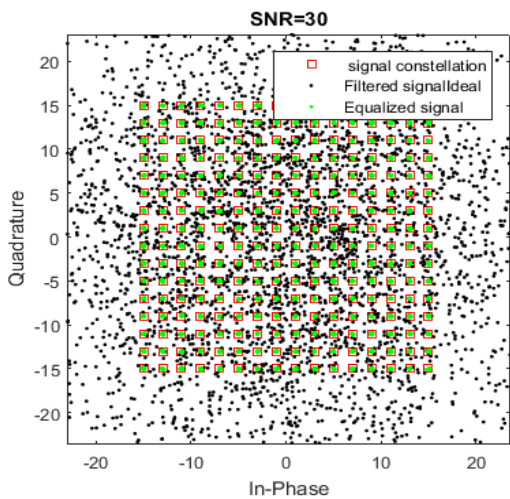
۴- شبیه‌سازی ساختار سامانه SC-FDE

پیشنهادی

براساس نکات ساختاری و عملیاتی پیشنهاد شده، سامانه SC-FDE با مدولاسیون مرتبه بالا را در محیط نرم‌افزاری MATLAB پیاده‌سازی کرده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این بخش نشان داده می‌شوند. زیر بلوک‌های اساسی در یک سامانه مخابراتی شامل مدولاسیون و دمدولاسیون، اضافه و حذف پیشوند چرخشی تبدیل فوریه و عکس تبدیل فوریه گسسته، تخمین‌گر کانال و جبران‌ساز می‌باشند.

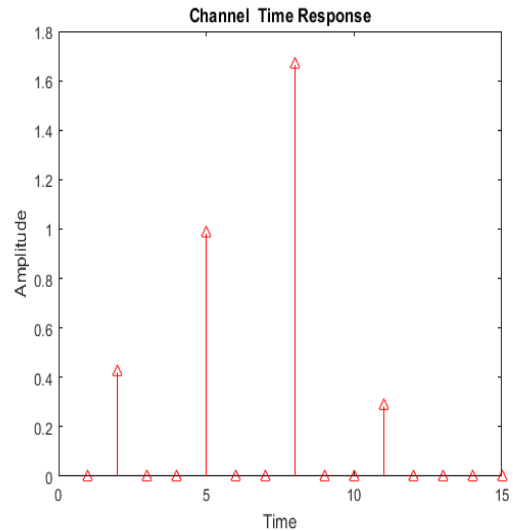


شکل (۹): منظومه مدولاسیون ۲۵۶ QAM قبل از ارسال، بعد از عبور از کانال و بعد از جبران سازی Zero Forcing بدون اختلال

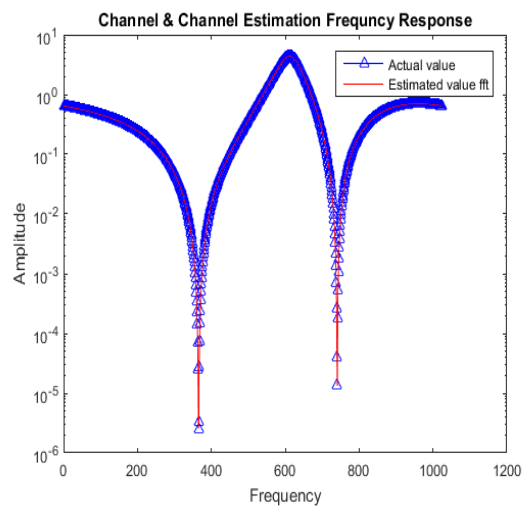


شکل (۱۰): منظومه مدولاسیون ۲۵۶ QAM قبل از ارسال، بعد از عبور از کانال و بعد از جبران سازی Zero Forcing در حضور اختلال

در ادامه احتمال خطا بیت (BER) برای SNR های مختلف در مدولاسیون ۲۵۶ QAM نشان داده شده است. برای مقایسه بهتر، منحنی احتمال خطای بیت را برای دو حالت متناسب با روابط احتمال خطا در سامانه OFDM و نتایج حاصل از شبیه سازی در سامانه SC-FDE در یک نمودار رسم شده است. این منحنی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. از نتیجه به دست آمده به این نکته می توان رسید که تقریباً به غیر از SNR های بالا که SC-FDE بهتر می شود، در بقیه مقادیر نتایج یکسان است.



شکل (۷): پاسخ زمانی کانال رایلی



شکل (۸): پاسخ فرکانسی کانال و تخمین کانال با توزیع رایلی

تغییرات پاسخ کانال برای هر قاب اطلاعاتی که در ابتدای خود دنباله تعلیم دارد، اعمال می شود. حال منظومه پیام بعد از عبور از کانال محوشدگی (رایلی) بدون اختلال جمع شونده و بعد از اعمال جبران ساز بررسی می شود. بدین منظور در شبیه سازی صورت گرفته منظومه مدولاسیون مرتبه بالای ۲۵۶ QAM در زمان ارسال، دریافت و بعد از جبران سازی خطی با روش Forcing Zero در نمودار (۹) نشان داده شده است. منظومه رسم شده در شکل (۹) تنها برای کانال با اثر محوشدگی نمایش داده شده است. به منظور محاسبه احتمال خطا نیاز است تا اثر اختلال جمع شونده یا کانال AWGN نیز بر روی منظومه پیام مورد بررسی قرار داده شود. بنابراین منظومه پیام تحت اثر کانال محوشدگی و اختلال جمع شونده با ۳۰dB SNR در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

تناوب ارسال داده‌های آموزشی برابر ۱۰ قرار داده شود تا تاثیری در عملکرد لینک رادیویی ایجاد نشود.

۵- نتیجه‌گیری

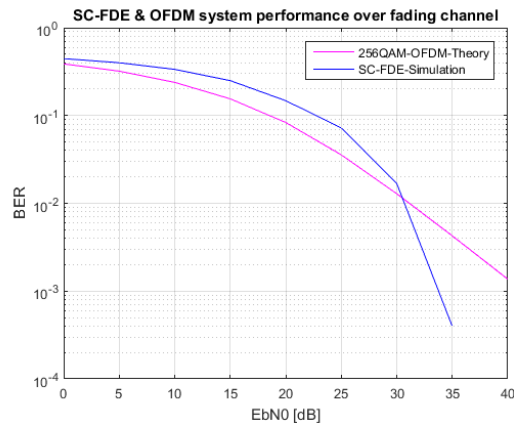
در این مقاله به بررسی سامانه مخابراتی مبتنی بر روش ارسال SC-FDE پرداخته شد. این روش جایگزینی برای روش OFDM خواهد بود تا بتواند نقاط ضعف سامانه OFDM را پوشش دهد. یکی از مهمترین مزایای ارسال SC-FDE در مقایسه با OFDM کاهش PAPR است. نتایج این کاهش در شبیه‌سازی‌های انجام شده مشخص است. کاهش PAPR تأثیر به‌سزایی در کنترل و نگهداری تقویت‌کننده‌های قدرت دارد.

همچنین در این مقاله از روشی تطبیقی برای قرار دادن داده‌های آموزشی برای تخمین کانال استفاده شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده مشخص شد می‌توان با استفاده از زمان هم‌دوسی کانال تناوب ارسال داده‌های آموزشی را تغییر داد. با چنین ساختاری مشاهده می‌شود که می‌توان در کانال‌هایی که وضعیت بهتری دارند مانند PedA تا ۴ برابر ارسال داده‌های آموزشی را کاهش داد که موجب افزایش گذردهی لینک می‌شود.

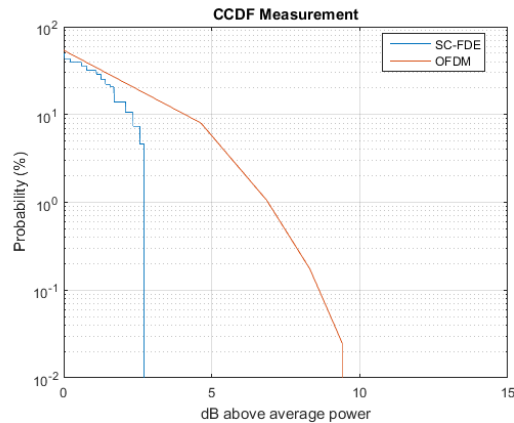
فناوری SC-FDE به‌دلیل جبران‌سازی حوزه فرکانسی و هماهنگ‌سازی زمانی و فرکانسی که به همراه خود دارد، توانسته تا در میان سامانه‌های مخابراتی تک‌حاملی از اقبال خوبی برخوردار باشد و جایگزین مناسب برای سامانه‌های OFDM نظر گرفته شود. استفاده از این روش برای رادیوهای ماکروویو تک‌حاملی نیز مورد استقبال قرار گرفته است. در راستای بهبود متغیرهای ارسال و دریافت سامانه‌های مبتنی بر این استاندارد (SC-FDE) مقالات و پژوهش‌هایی صورت گرفته و در حال حاضر نیز مورد توجه می‌باشد.

۶- مراجع

- [1] Broadband "Wireless Access Working Group, Draft Document for SC-FDE PHY Layer System for Sub 11 GHz BWA," IEEE 802.16.
- [2] Recommendation ITU-R SM.1600-2 Technical identification of digital signals.
- [3] D. D. Falconer and S. L. Ariyavisitakul, "Broad band wireless using single carrier and frequency domain equalization," The 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, vol. 1, 2002.
- [4] J. Li, Y. Du and Y. Liu, "Comparison of Spectral Efficiency for OFDM and SC-FDE under IEEE 802.16 Scenario," 11th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC'06), 2006.
- [5] F. Pancaldi and et. al., "Single-carrier frequency domain



شکل (۱۱): مقایسه BER مدولاسیون QAM ۲۵۶



شکل (۱۲): مقایسه منحنی CCDF در سامانه

OFDM و SC-FDE

در انتها و برای جمع‌بندی مشخصات سامانه SC-FDE نمودار PAPR رسم شده است. برای محاسبه PAPR نمودار CCDF در سامانه SC-FDE و OFDM محاسبه شده و نتایج در تصویر شماره (۱۱) نشان داده شده است. نتیجه شبیه‌سازی نشان دهنده بهبود قابل توجه PAPR در سامانه SC-FDE می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است PAPR در سامانه SC-FDE تا حدود ۶ dB بهتر از سامانه OFDM است.

در شبیه‌سازی‌های انجام شده تأثیر تغییر N یا دوره تناوب ارسال داده‌های آموزشی مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی تأثیر افزایش دوره تناوب داده‌های آموزشی عملکرد سامانه رادیویی در کانال‌های مخابراتی نظیر PedA، PedB و VehA مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی‌ها مشخص شد برای داشتن ارتباط مناسب در کانال PedA می‌توان مقدار N را تا ۴۰ افزایش داد بدون اینکه افتی در عملکرد سامانه ایجاد شود. این مسئله باعث می‌شود تا داده‌های آموزشی ۴ برابر کمتر ارسال شود. این مسئله در حالتی که از کانال VehA استفاده شود ممکن نیست. در این کانال به‌دلیل کم بودن زمان هم‌دوسی کانال باید دوره

- [9] C. Lam, D. D. Falconer, F. Danilo-Lemoine, and R. Dinis, "Channel Estimation for SC-FDE Systems Using Frequency Domain Multiplexed Pilots," IEEE Vehicular Technology Conference, 2006.
- [10] Chen, Ying and Zhang, Jian, and Jayalath, Dhammika, "New Training Sequence Structure for Zero-Padded SC-FDE System in Presence of Carrier Frequency Offset," In Proceedings IEEE 68th Vehicular Technology Conference, 2008.
- [11] X. Boyuan and X. Weizhang, "Research of the SC-FDE synchronization technology in HF wireless communication," IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013.
- equalization," in IEEE Signal Processing Magazine, vol. 25, no.5, pp. 37-56, 2008.
- [6] D. Falconer, S. L. Ariyavisitakul, A. Benyamin-Seeyar, and B. Eidson, "Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems," in IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 4, pp. 58-66, 2002.
- [7] Lu, I-Cheng Wei, Chia-Chien Jiang, Wen-Jr Chen, Hsing-Yu Chi, Yu-Chieh Li, Yi-Cheng Hsu, Dar-Zu Lin, Gong-Ru Chen, Jyehong, "20-Gbps WDM-PON transmissions employing weak-resonant-cavity FPLD with OFDM and SC-FDE modulation formats," Optics express, vol. 21, pp. 1011-1025, 2013.
- [8] J. Li and Y. Du, "Channel Estimation Schemes for SC-FDE/FS System," 11th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC'06), 2006.