دانشکده برق و کامپیوتر

گروه مخابرات

پایان نامه

برای دریافت درجه دکترای تخصصی

مخابرات سیستم

تخمین کانال تنک در سیستم‌های مخابراتی بیسیم

استاد راهنمای اول: دکتر مسعود رضا آقابزرگی

استاد راهنمای دوم: دکتر علی‌محمد دوست حسینی

استاد مشاور: دکتر علی‌اکبر تدین

پژوهش و نگارش: عباس کمالی

شهریورماه ۱۳۹۲

تقدیم به

پدربزرگوار و مادر مهربانم

و

همسر عزیز و دختر دلبندم

تشکر و قدردانی

پیش از هر چیز، از خداوند به خاطر تمامی نعمت‌هایی که به اینجانب هدیه کرده سپاسگزارم. از اساتید ارجمند، جناب آقایان دکتر مسعود رضا آقابزرگی و دکتر علی‌محمد دوست‌حسینی که در طول انجام این رساله همواره مشوق و راهنمای من بوده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم. همچنین از استاد مشاور گرامی و عزیزم جناب آقای دکتر علی اکبر تدین کمال تشکر و امتنان را دارم.

چکیده

در طول سالهای اخیر، انقلاب ارتباطات بیسیم تبدیل به امری واقعی و غیرقابل انکار شده است و تأثیر آن در همه جا بر روی نوع زندگی ما قابل مشاهده است؛ با توجه به اینکه، مخابرات بیسیم مطمئن غالباً نیاز به داشتن اطلاعات دقیقی از کانال مربوطه دارد. در عمل، اطلاعات وضعیت کانال به ندرت برای یک سیستم مخابراتی از پیش در دسترس بوده و لذا لازم است که این اطلاعات در گیرنده تخمین زده شود که اینکار معمولاً توسط جستجو و بررسی کانال به کمک یک شکل موج آموزشی معلوم و پردازش خطی ورودی- خروجی کانال و در نهایت تخمین پاسخ ضربه کانال انجام می‌شود. از طرف دیگر، نشان داده شده است که بسیاری از کانال‌های واقعی، قابل مدل‌سازی توسط یک سیستم با یک پاسخ ضربه با تعداد نسبتاً کم ضرائب غیرصفر هستند. روشهای تخمین کانال خطی معمولی نظیر کمترین مربعات –که برای کانال‌های چندمسیره قوی، بهینه شناخته می‌شوند– برای بهره‌برداری کامل از کم بودن ابعاد ذاتی کانال‌های تنک، از خود کارآیی اندکی نشان می‌دهند. در این راستا، با استفاده از تئوری جدید حسگری فشرده می‌توان بطور مؤثری از اطلاعات تنک بودن کانال، برای توسعه تخمین کانال تنک بهره برد؛ بدین معنا که می‌توان از این نظریه در جهت ارائه چارچوبی قوی برای کاهش تعداد اندازه‌گیری مورد نیاز و بیان فشرده سیگنال‌های تنک در بحث تخمین اینگونه کانالها استفاده نمود.

در این رساله، ابتدا مروری بر رهیافت‌های اصلی حل مسأله تخمین کانال تنک در سیستم‌های بیسیم خواهیم داشت. ساختار این قسمت به شکلی است که روشهای جدید بازیابی تنک و نیز بازیابی تنک قالبی همراه با کاربرد آنها در تخمین کانال تنک بویژه در سیستم‌های مولتیپلکس تسهیم فرکانس را در برمی‌گیرد.

محتوای اصلی رساله حاضر حاوی دو بخش است: در قسمت اول، نوع قالبی الگوریتم تعقیب زیرفضا –که الگوریتمی کارآمد برای بازسازی سیگنالهای تنک است– با نام "تعقیب

زیرفضای بلوکی" معرفی می‌شود. در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های بازیابی قالبی موجود نظیر BOMP و mixed l_2/l_1-norm و نیز روش بازیابی غیرقالبی SP، روش پیشنهادی در بیشتر موارد، عملکرد بازسازی بهتر و نیز مدت زمان مورد نیاز کمتری را در زمانی‌که عناصر غیرصفر در قالبهای ثابتی ظاهر می‌شوند در یک سخت‌افزار معین از خود نشان می‌دهد. این برتری بویژه در مواقعی‌که طول قالبها کوچکتر است از روی نتایج شبیه‌سازی مشهودتر است. همچنین نشان داده می‌شود که روش پیشنهادی، قابلیت بازسازی دقیق سیگنالهای تنک قالبی که ماتریس اندازه‌گیری آنها شرط BRIP را در یک بازه ثابت همسانگردی محدود برآورده می‌سازد دارا است.

در قسمت دوم، مسأله جایابی معین و غیرتصادفی راهنماها بمنظور تخمین کانال تنک در سیستم‌های OFDM مورد بررسی قرار می‌گیرد و یک معیار جدید برپایه حداقل‌سازی مجموع همبستگی ستونهای ماتریس DFT جزئی پیشنهاد می‌شود. نشان داده می‌شود که معیار پیشنهادی می‌تواند یک جایگزین ساده و مناسب برای معیار معروف اما پیچیده RIP باشد. علاوه براین، خواهیم دید که طراحی الگوی قرارگرفتن مکان راهنماها بر اساس روش پیشنهادی، عملکرد بازیابی بهتری را در مقایسه با دیگر روشهای مبتنی بر معیار همسازی[1] نمایان می‌سازد و در نتیجه منجر به نتایج شبیه‌سازی بهتری می‌شود.

کلمات کلیدی: تعقیب زیرفضا، تنک بودن قالبی، حسگری فشرده، خاصیت همسانگردی محدود قالبی، مالتی‌پلکس تقسیم فرکانسی متعامد، جایابی راهنما، کانال تنک، همبستگی ستونها

1- Coherence

فهرست:

فصل اول: مقدمه..... ۱

فصل دوم: ارتباطات بیسیم..... ۵

۲-۱ مقدمه..... ۶

۲-۲ اصول مقدماتی فرستنده و گیرنده..... ۶

۲-۳ کانال بیسیم..... ۱۰

۲-۳-۱ انتشار چندمسیرگی..... ۱۰

۲-۳-۲ کانالهای تغییرناپذیربا زمان..... ۱۲

۲-۳-۳ کانالهای متغیر با زمان..... ۱۴

۲-۴ مدل سیستم چندحاملی معادل..... ۱۵

۲-۵ تخمین کانال..... ۱۸

فصل سوم: حسگری فشرده..... ۲۳

۳-۱ مقدمه..... ۲۴

۳-۲ حسگری فشرده و الگوریتمهای بازیابی سیگنالهای تنک ۲۶

۳-۲-۱ تعاریف..... ۲۶

۳-۲-۲ حسگری فشرده و الگوریتم‌های مبتنی بر نُرم..... ۲۸

۳-۲-۳ خاصیت همسانگردی محدود..... ۳۱

۳-۲-۴ الگوریتم‌های حریص..... ۳۴

۳-۳ سیگنالهای تنک قالبی و بازسازی آنها..... ۴۰

۳-۳-۱ مفاهیم اولیه تنک بودن قالبی..... ۴۱

۳-۳-۲ الگوریتم mixed l_2/l_1 -norm..... ۴۲

۳-۳-۳ الگوریتم BOMP..... ۴۳

فصل چهارم: الگوریتم بازسازی BSP..... ۴۶

۴-۱ مقدمه..... ۴۷

۴-۲ مقدمات مورد نیاز الگوریتم BSP..... ۴۸

۴-۳ الگوریتم BSP..... ۵۳

۴-۴ تحلیل الگوریتم BSP با استفاده از BRIP..... ۵۴

۴-۵ نتایج شبیه سازی جهت ارزیابی الگوریتم BSP..... ۶۶

فصل پنجم: تخمین کانال تنک..... ۷۰

۵-۱ مقدمه..... ۷۱

۵-۲ تخمین کانالهای تنک تک حاملی..... ۷۳

۵-۳ تخمین کانال تنک در سیستم های OFDM..... ۷۶

۵-۳-۱ تخمین کانال تنک در سیستم های OFDM و

استفاده از الگوریتم های بازیابی تنک..... ۸۰

۵-۳-۲ تخمین کانال تنک در سیستم های OFDM توسط جایابی راهنماها..... ۸۳

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات..... ۱۰۲

۶-۱ نتیجه گیری..... ۱۰۳

۶-۲ پیشنهادات ۱۰۴

ضمیمه ۱..... ۱۰۶

مراجع..... ۱۰۷

چکیده انگلیسی..... ۱۱۹

فهرست اشکال:

شکل ۲-۱. نمایش انتشار چند مسیرگی..... ۱۲

شکل ۲-۲. انواع نحوه قرارگیری راهنماها..... ۲۱

شکل ۳-۲. بلوک دیاگرام روش OMP..... ۳۵

شکل ۳-۲. بلوک دیاگرام روش SP..... ۳۸

شکل ۴-۱. مقایسه عملکرد الگوریتمهای SP، BOMP، L2/L1 و BSP برای $d = 2$..... ۶۷

شکل ۴-۲. مقایسه عملکرد الگوریتمهای SP، BOMP، L2/L1 و BSP برای $d = 5$..... ۶۸

شکل ۴-۳. مقایسه عملکرد الگوریتمهای SP، BOMP، L2/L1 و BSP برای $d = 8$..... ۶۹

شکل ۴-۴. مقایسه میان دقت بازیابی روشهای بازیابی قالبی مؤلفه‌های نشتی..... ۷۱

شکل ۵-۱. پیاده سازی دیجیتال یک سیستم OFDM..... ۷۶

شکل ۵-۲. کانالهای گوسی موازی..... ۷۸

شکل ۵-۳. درصد موفقیت بازیابی کانال بر حسب تعداد ضرائب غیرصفر با استفاده از الگوریتم SP در حالت دوم..... ۹۸

شکل ۵-۴. بررسی MSE بازیابی برحسب SNR با استفاده از الگوریتم SP..... ۹۹

شکل ۵-۵. درصد موفقیت بازیابی کانال بر حسب تعداد ضرائب غیرصفر با استفاده از الگوریتم SP در حالت دوم..... ۱۰۱

۵-۶. بررسی MSE بازیابی برحسب SNR با استفاده از الگوریتم SP در حالت دوم..... ۱۰۱

فهرست جداول:

جدول ۳-۱. الگوریتم OMP ۳۶

جدول ۳-۲. الگوریتم SP ۳۹

جدول ۳-۳. الگوریتم mixed l_2/l_1 -norm ۴۳

جدول ۳-۴. الگوریتم BOMP ۴۵

جدول ۴-۱. الگوریتم پیشنهادی BSP ۵۵

جدول ۴-۲. مقایسه زمان مورد نیاز انجام الگوریتمها برای طول قالب و سطوح تنک بودن مختلف ۷۰

جدول ۵-۱. مقایسه میان برخی کارهای انجام شده در تخمین کانال تنک سیستم‌های OFDM ۸۳

جدول ۵-۲ : روش [۸۱] برای انتخاب نمایه مکان راهنماها ۹۰

جدول ۵-۳. روش پیشنهادی برای تعیین مکان راهنماها ۹۵

جدول ۵-۴. مقایسه بین شماره‌های (نمایه) مکان راهنماها برای P=16 ..... ۹۶

جدول ۵-۵. مقایسه بین شماره های (نمایه) مکان راهنماها برای P=32 ..... ۱۰۰

فصل اول: مقدمه

سیستم های مخابراتی بیسیم در طول چند سال اخیر به میزان قابل توجهی پیشرفت داشته‌اند و نقش بسیار مهمی را در نظام اجتماعی ما ایفا نموده‌اند. تقاضا برای برقراری ارتباطات در میان افراد بطور نمایی رو به افزایش است که این امر نیز به نوبه خود افزایش خدمات و کیفیت بالاتر را می‌طلبد.

ارتباطات بیسیم، امکان تحرک را برای کاربر فراهم می‌آورد. جدای از رضایت کاربر، از دیدگاه ارائه دهندگان سرویس، توجیه قانونی دیگری نیز برای ارتباط بیسیم وجود دارد چراکه مکانهای بسیاری در جهان وجود دارند که بدلیل فاصله زیاد و یا نوع ناحیه مورد نظر، برای سیستمهای سیمی زمینی غیر قابل دسترسی هستند؛ مضاف بر اینکه در بسیاری از موارد از نقطه نظر اقتصادی نیز، ارتباطات بیسیم توجیه‌پذیر هستند. در ابتدا، تجهیزات ارتباطی بیسیم مورد استفاده به دلیل هزینه بالا و چالشهای فن‌آورانه، دارای نفوذ کمی در بازار بودند؛ اما اکنون تنها با نگاهی به گسترش تلفنهای سلولی، می‌توان به جایگاه بالای این دسته ارتباطات پی برد. با این میزان رشد می‌توان حدس زد که ارتباطات بیسیم، زمینه ساز فن‌آوری‌ای خواهند بود که نوع زندگی و فرهنگ ما را در سالهای آینده تحت تأثیر قرار می‌دهند. در عین حال، بایستی به این موضوع توجه کرد که در اغلب سیستم های بیسیم، بدلیل شرایط نامطلوب محیط انتشار و تحت تأثیر قرارگرفتن عواملی نظیر انعکاس، شکست و پراکندگی ناشی از اشیای اطراف، سیگنال دریافتی مجموعی از چندین سیگنال تأخیر یافته و تضعیف شده سیگنال اصلی است. چنین پدیده‌ای شاید در نگاه اول به نوعی مشکل ساز باشد؛ ولی چنانچه مشخصات کانال را بتوان تعیین نمود می‌توان از فواید این چندمسیرگی بهره برد. نتیجه اینکه در بسیاری از کاربردها، تخمین کانال بیسیم میان فرستنده و گیرنده امری ضروری است تا به این وسیله بتوان با اطلاع از رفتار کانال و یا به عبارتی پاسخ ضربه کانال، با اثرات نامطلوب تداخلی آن مقابله نمود.

بمنظور تخمین کانال، اغلب سیستم های امروزی از داده آموزشی در برخی موقعیت‌های از پیش تعیین شده استفاده می‌کنند و سپس با بهره گیری از تکنیکهای درونیابی، به تخمین سراسری اطلاعات کانال می‌پردازند. در راستای فرآیند تخمین کانال، از دیدگاه فیزیکی نشان داده شده است که در برخی کاربردها نظیر تلویزیون کیفیت بالا (HDTV[1])، ارتباطات در زمین‌های پر از تپه و ارتباطات صوتی زیرآبی، مدل‌سازی کانالها به صورت تنک[2] یعنی با تعداد ضرائب غیرصفر محدود، دارای توجیه عملی هستند [۱و۲]. در چنین شرایطی، بجای استفاده از روشهای سنتی تخمین کانال می‌توان از روشهای جدید تخمین که در مواجه با این کانالها کارآمدتر هستند بهره برد. هدف اصلی ما در این رساله نیز، مطالعه کاربرد روشهای نوین بازیابی تنک یا حسگری فشرده (CS[3]) درمسأله درونیابی و در نتیجه تخمین کانال است. مبحث CS یک نظریه ریاضیاتی نسبتاً جدید است که در آن، تلاش می‌شود تا سیگنالهای تنک یا با قابلیت فشردگی بالا[4] (یعنی سیگنالهایی که از اجزای اصلی کمی تشکیل شده اند) از یک تعداد بسیار محدودی اندازه‌گیریها بازیابی شوند.

علاوه براین، دسته ای از سیگنالهای تنک موسوم به سیگنالهای تنک قالبی[5] هستند که عناصر غیر صفر آنها به صورت فوجی و پشت سرهم ظاهر می‌شود. این دسته از سیگنالها که از معرفی و بررسی آنها زمان زیادی نمی‌گذرد، کاربردهای فراوانی در زمینه سیگنالهای چند باندی[6] و بردار اندازه‌گیری چندگانه[7] دارا هستند و الگوریتم‌هایی جهت بازیابی آنها معرفی شده است و نشان داده شده است که با پیش فرض قراردادن قالبی تنک بودن آنها، نتایج بهتری نسبت به حالت استفاده از روشهای مرسوم بازیابی تنک حاصل می‌شود.

1- High definition TV
2- Sparse
3- Compressive sensing
4- Compressible
5- Block-sparse signals
6- Multi-band signals
7- Multiple measurement vector

از منظر تاریخی، کاربرد تکنیکهای CS در جهت حل مسأله تخمین کانال در ابتدا در سال ۲۰۰۸ مطرح شد [۳] و از آن زمان به بعد تخمینگرهای کانال مشابه دیگری معرفی شده‌اند که ما همه آنها را تحت عنوان تخمین کانال فشرده دسته بندی می‌کنیم. در این میان، بدلیل فواید بسیار بالایی که OFDM[1] در انتقال با نرخ بالا روی کانالهای فرکانس‌گزین دارد بیشتر تحقیقات صورت گرفته در امر تخمین کانال معطوف به سیستم‌های OFDM بوده است.

با توجه به مطالبی که دراین قسمت با هدف بررسی تخمین کانال تنک سیستم‌های بیسیم بیان شد ، ساختار این رساله به شرح زیر است: فصل ۲، به بیان اصول و مفاهیم حاکم بر ارتباطات بیسیم اختصاص دارد. در فصل ۳، معرفی و ارائه تئوری حاکم بر تکنیک حسگری فشرده را مد نظر قرارداده و به بررسی و مقایسه تعدادی از روشهای مهم بازیابی تنک مورد استفاده در بازیابی سیگنالهای تنک می‌پردازد. در این فصل به معرفی و تشریح روشهای کارآمد بازیابی سیگنالهای تنک قالبی نیز پرداخته می‌شود. دو فصل ۴ و ۵، فصلهای اصلی این رساله را تشکیل می‌هند بطوریکه در فصل ۴ به ارائه روشی جدید برای بازیابی سیگنالهای تنک قالبی پرداخته می-شود و در فصل ۵، با مروری بر ساختار سیستم OFDM و کارهای انجام شده در جهت تخمین کانال تنک سیستم های OFDM، به معرفی روشی برپایه تعیین مکان قرارگیری راهنماها[2] بمنظور تخمین کانال تنک در یک سیستم OFDM پرداخته می‌شود. فصل ششم نیز به نتیجه‌گیری و پیشنهادات اختصاص می‌یابد.

1- Orthogonal Frequency Division Multiplexing
2- Pilots

فصل دوم: ارتباطات بیسیم

۲-۱ مقدمه

بادقت در روشهای ارتباطی اولیه بشر نظیر علائم دود در جنگل تا اولین ارتباطات بیسیم بهره گیرنده از امواج الکترومغناطیس در قرن ۱۹و پس از آن سیستم های ارتباطی دوطرفه نظامی بیسیم در نیمه اول قرن۲۰ و نیز فن‌آوریهای پیشرفته بعدی نظیر پخش تلویزیون ماهواره‌ای، تلفنهای سلولی و شبکه های بیسیم محلی، می‌توان دریافت که ارتباطات بیسیم بخصوص در طول چنددهه اخیر رشد قابل توجهی داشته است. در ابتدای این فصل، ایده‌های اولیه و مفاهیم مهم ارتباطات بیسیم بیان می‌شود. سپس پدیده های فیزیکی رخ دهنده در زمان انتقال بیسیم تشریح و مدلهای ریاضی توصیف کننده آن معرفی می‌شود. پس از آن، یک مدل سیستم گسسته معادل ارائه می‌شود و مقوله تخمین کانال مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲ اصول مقدماتی فرستنده و گیرنده

وظیفه اصلی در ارتباطات بیسیم، ارسال یک پیام از فرستنده به گیرنده است. در سیستم های مخابراتی مدرن، سیگنال پیام به یک سیگنال دیگر کدگذاری می‌شود و سپس توسط یک یا چند آنتن و به صورت امواج الکترومغناطیس ارسال می‌شود. درسمت گیرنده، یک یا چند آنتن، فرم‌های اعوجاج یافته سیگنال ارسالی را دریافت و تلاش می‌کنند که سیگنال پیام کدگشایی شود.

امروزه، معمولاً اطلاعات دیجیتال می‌شوند (البته در صورت آنالوگ بودن) و سپس بمنظور افزایش بازدهی، فشرده و کد می‌شوند که این عمل به کدکردن منبع[1] معروف است. سپس، بیتهای اطلاعات با استفاده از یکی از کدها مثل کانولوشن یا کدهای قالبی [۴] کد می‌شوند که به آن کدکردن کانال[2] اطلاق می‌شود. در مرحله بعد، مدولاتور ارقام کد شده را به نماد[3]هایی ارسالی که متعلق به مجموعه‌ای محدود است (بطور نمادین مجموعه الفبای A) می‌نگارد. مدولاسیونهایی که

1- Source coding
2- Channel coding
3- Symbol

غالباً استفاده می‌شوند عبارتند از PSK[1] ، ASK[2] ، FSK[3] و QAM[4]. در ادامه به تشریح طرح مدولاسیون چند حاملی پرداخته می‌شودکه غالباً به‌دلیل مزایای آن نسبت به طرحهای مدولاسیون تک حاملی در سیستم های مخابراتی بیسیم مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵و۶].

در مدولاسیون چند حاملی، پهنای باند فرکانسی در دسترس B_0 به K زیرباند (زیرحامل) با پهنای $\frac{B_0}{K}$ تقسیم می‌شود. سیگنال ارسالی زمان گسسته به شکل زیر قابل بیان است:

$$s[n]=\sum_{l=0}^{L-1}\sum_{k=0}^{K-1}a_{l,k}\,g_{l,k}[n], \qquad (۱-۲)$$

که در آن $a_{l,k}\in A$ بیانگر نماد ارسالی l ام در زیرحامل k، $g_{l,k}[n]=e^{2\pi k(n-lN)/K}g[n-lN]$ نشانگر شیفت فرکانس- زمان پالس ارسالی گسسته $g[n]$ و $N\geq K$ دوره یک نماد (گسسته) است. با استفاده از رابطه (۲-۲) می‌توان $s[n]$ را توسط یک فیلتر درونیاب با پاسخ ضربه باند پایه $f_1(t)$ به سیگنال زمان پیوسته $s(t)$ مرتبط نمود: $(T_s \triangleq 1/B_0)$

$$s(t)=\sum_{n\in\mathbb{Z}}s[n]f_1(t-nT_s) \qquad (۲-۲)$$

پس از آن، این سیگنال باند پایه، جهت ارسال به باند عبور یعنی باند فرکانسی مطلوب جهت ارسال، انتقال می‌یابد. چنانچه فرض کنیم f_c نمایانگر فرکانس مرکزی باشد رابطه سیگنال باند پایه و سیگنال قابل ارسال باند عبور را می‌توان به شکل زیر بیان نمود:

$$s_p(t)=\mathrm{Re}\{e^{j2\pi f_c t}s(t)\} \qquad (۳-۲)$$

در گیرنده، دوباره سیگنال دریافتی $r_p(t)$ با کاهش فرکانس به سیگنال باند پایه $r(t)$ تبدیل می‌شود. یعنی، $r(t)=\mathrm{Re}\{e^{-j2\pi f_c t}r_p(t)\}$ و سپس طبق رابطه زیر به سیگنال زمان گسسته تغییرشکل می‌یابد:

1- Phase shift keying
2- Amplitude shift keying
3- Frequency shift keying
4- Quadrature amplitude modulation

$$r[n]=\int_{\mathbb{R}} r(t)f_2(nT_s-t)dt \qquad (۴-۲)$$

که در این رابطه، $f_2(t)$ معرف پاسخ ضربه فیلتر ضد امتزاج[۱] است. در نتیجه، دمدولاتور چند حاملی، نمادها را به شکل زیر در می‌آورد:

$$r_{l,k}=\sum_{n\in\mathbb{Z}} r[n]\gamma^*_{l,k}[n] \qquad (۵-۲)$$

که در آن $l=0,...,L-1$ و $k=0,...,K-1$ است و $\gamma_{l,k}[n]=e^{j2\pi k(n-lN)}\gamma[n-lN]$ بیانگر شیفت زمان- فرکانس پالس دریافتی $\gamma[n]$ است. طراحی پالسهای ارسالی و دریافتی بسیار اهمیت دارند چرا که بایستی از تداخل نمادهای متوالی (تداخل بین نمادی یا ISI[۲]) جلوگیری بعمل آورند. نمادهای دمدوله شده همسانسازی[۳] می‌شوند و بدینوسیله اثر نامطلوب کانال حذف می‌شود. پس از آن، عمل چندی‌سازی[۴] براساس الفبای نماد A انجام می‌شود و در نهایت نمادها به بیتهای مربوطه نگاشته شده و عمل کدگشایی و وافشردن[۵] روی آنها انجام می‌شود.

در سیستمهای عملی، این مسأله دارای اهمیت زیادی است که مدولاتور و دمدولاتور قابل پیاده سازی باشند. یکی از طرحهای مدولاسیون مطلوب چند حاملی که مورد توجه فراوانی قرار دارد، OFDM یا بطوردقیقتر CP-OFDM[۶] است [۷و۸]. در این طرح، پالسهای ارسال و دریافت هر دو به صورت مستطیلی و به شکل زیر انتخاب می شوند:

$$\gamma_{cp}[n]\triangleq\frac{1}{\sqrt{K}},n\in\{0,...,K-1\} \quad و \quad g_{cp}[n]\triangleq\frac{1}{\sqrt{K}},n\in\{-L_{cp},...,K-1\} \qquad (۶-۲)$$

که در آن $L_{cp}\triangleq N-K$ بیانگر طول فاصله محافظ است که به منظور جلوگیری از ISI استفاده می‌شود. پس ازآن، سیگنال $s[n]$ را می توان به صورت $s[n]=\sum_{l=0}^{L-1}s_l[n-lN]$ نوشت که در آن:

1- Anti-aliasing
2- Intersymbol interference
3- Equalization
4- Quantization
5- Decompression
6- Cyclic Prefix

$$s_l[n]=\frac{1}{\sqrt{K}}\sum_{k=0}^{K-1}a_{l,k}e^{j2\pi\frac{kn}{K}},n\in\{-L_{cp},...,K-1\}$$

با تعریف $l=0,...,L-1$ ،$a_l\triangleq[a_{l,0},...,a_{l,K-1}]^T$ ، داریم: $s_l[n]=\left[\mathcal{F}^{-1}(a_l)\right]_{(n)_k}$ که در آن $\mathcal{F}^{-1}$ معرف IDFT و $(n)_K\triangleq n(\mathrm{mod}\,K)$ بیانگر عملگر به پیمانه K است. در اینجا فاصله محافظی که در ابتدای s_l قراردارد بوسیله L_{cp} نماد آخر $\mathcal{F}^{-1}(a_l)$ بعنوان CP اشغال می‌شود [۸]. پیاده‌سازی مدولاتور با استفاده از FFT و یا به بیان دقیقتر IFFT نیز امکان‌پذیر است که همانطورکه می‌دانیم دارای پیچیدگی محاسباتی بسیار کمتری است. در گیرنده، CP برداشته می‌شود؛ چراکه $\gamma[n]$ در فاصله محافظ $n\in\{-L_{cp},...,-1\}$ برابر صفر است و در نتیجه، با فرض همزمانی کامل، نمادهای دمدوله شده را می‌توان به صورت زیر نوشت (با فرض برداشتن k نمونه از ابتدای سمبل) :

$$r_{l,k}=\frac{1}{\sqrt{K}}\sum_{m=0}^{K-1}r[m+lN]e^{-j2\pi\frac{mk}{K}}=\mathcal{F}(r_l),\qquad(۲-۷)$$

که در آن $r_l=[r[lN],...,r[K-1+lN]]^T$ است و $\mathcal{F}$ بیانگر DFT و قابل پیاده سازی با FFT است.

با توجه به اینکه IDFT و DFT به ترتیب معرف مدولاتور و دمدولاتور بوده و دارای طول K هستند؛ لذا تعداد زیرحاملها معمولاً به صورت توانی از ۲ انتخاب می‌شوند تا پیاده‌سازی به سریع-ترین شکل ممکن درآید. به عنوان جایگزینی برای CP، می‌توان از تکنیک اضافه کردن صفر[1] در انتهای s_l نیزبهره برد، هر چند که اینکار موجب تداخل میان حاملها می‌شود [۹].

۲-۳ کانال بیسیم

درحالت ایده‌آل، کانال بیسیم همان سیگنال ارسالی اولیه را به مقصد می‌رساند و درنتیجه سیگنال دریافتی، معادل با سیگنال ارسالی است؛ به عبارت دیگر، $r(t)=s(t')$ که در آن $t'=t-\tau_0$ شیفت زمانی مورد نیاز τ_0 را برای پیمودن سیگنال از فرستنده به گیرنده نشان می-دهد. با فرض همزمانی کامل بین فرستنده و گیرنده (یا به تعبیری معلوم بودن τ_0)، نمادهای

1- Zero padding

دمدوله شده $r_{l,k}$ برابر با نمادهای ارسالی $a_{l,k}$ می‌شوند؛ مشروط بر اینکه تجهیزات دریافت، بدون اغتشاش بوده و پالس ارسالی g و پالس دریافتی γ شرط تعامد را به شکل زیر داشته باشند که درآن $\delta[l]$ نماد دلتای کرونیکر[1] است.

$$\left\langle g_{l,k}, \gamma_{l',k'} \right\rangle = \sum_{n\in\mathbb{Z}} g_{l,k}[n]\gamma^{*}_{l',k'}[n] = \delta[l-l']\delta[k-k'], \qquad (۸-۲)$$

البته، یک کانال ایده‌آل، هیچگاه در عمل واقعیت ندارد و ما در ادامه قصد داریم مهمترین اثرات تأثیرگذار روی انتقال را بررسی نماییم.

۲-۳-۱ انتشار چندمسیرگی[2]

پدیده‌های مختلفی بر روی سیگنال عبوری از مسیر کانال رادیویی تأثیر می‌گذارند. مهمتر از همه آن‌که چون امواج رادیویی در حال انتشار پخش می‌شوند تضعیف شده و در نتیجه قدرت سیگنال دریافتی با افزایش فاصله میان فرستنده و گیرنده کاهش می‌یابد. این پدیده به تلف مسیر فضای آزاد[3] معروف است. همچنین، علاوه بر مسیر مستقیم ارتباطی میان فرستنده و گیرنده که ممکن است توسط دیوارها و ساختمان‌ها و ... مسدود شود انتشار غیرمستقیم امواج الکترومغناطیس باعث ایجاد چندین مسیر دیگر برای ارسال سیگنال می‌شود. این انتشار چندمسیره ناشی از این واقعیت است که معمولاً نسخه‌هایی از سیگنال توسط سطوح بزرگ و صاف (مانند دیوار ساختمان ها) انعکاس[4] می‌یابند، بوسیله سطوح ناهموار و کوچک (مانند برگهای درختان) پراکنده[5] می‌شوند، توسط بعضی لبه های اشیاء (مانند کوهها و ماشینها و خانه‌ها و...)

1- Kronecker-delta
2- Multipath propagation
3- Free space path loss
4- Reflection
5- Scattering