بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه بیرجند

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات

تخمین و پیش‌بینی کانال مخابرات سیار با استفاده از فیلتر ذره‌ای

بهاره خدادادی

استادراهنما:

دکتر ناصر ندا

زمستان ۱۳۹۲

تأییدیه هیات داوران

(برای پایان‌نامه)

یک نسخه اصل فرم مربوطه

چکیده

فن‌آوری‌های جدید مانند مالتی‌پلکس تقسیم فرکانسی متعامد(OFDM) و کانال‌های چندورودی-چند خروجی(MIMO) می‌توانند عملکرد سیستم‌های مخابراتی رایج را بهبود بخشند. با استفاده از مزایای این دو فن‌آوری می‌توان به نرخ داده‌ی بالا نائل شد.

یکی از چالش‌های مهم در سیستم‌های MIMO-OFDM، تخمین کانال با دقت و سرعت بالا به منظور آشکارسازی صحیح سیگنال‌های دریافتی از یک‌سو و فیدبک به فرستنده، جهت تخصیص منابع آرایش ارسال بر روی آنتن‌های چندگانه از سوی دیگر است. لذا بررسی روش‌های تخمین کانال سریع، دقیق و با پیچیدگی کم امری ضروری است. تخمین کانال به کمک پایلوت، روشی است که در آن سیگنال‌های شناخته شده به نام پایلوت، با الگوی مشخص در میان داده یا حتی برروی آن، برای به دست آوردن اطلاعات کانال ارسال می‌شوند.

در این پایان‌نامه از یک نوع فیلتر ذره‌ای برای تخمین و پیش‌بینی کانال، در سیستم‌های OFDM استفاده می‌شود که براساس مفهوم نمونه‌برداری اهمیت و استفاده از تئوری‌های بیزین می‌باشد. فیلتر ذره‌ای روشی عددی و محاسباتی برای به دست آوردن تابع چگالی احتمال یک فرآیند تصادفی می‌باشد. در این روش‌ها هدف یافتن مقدار سیگنال در همان لحظه‌ی رخداد براساس یک دنباله مشاهدات می‌باشد. فیلتر ذره‌ای به خصوص در برخورد با مسائل غیرخطی و غیرگوسی مانند تخمین کانال بی‌سیم مفید می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که فیلتر ذره‌ای نسبت به برخی از روش‌های کلاسیک تخمین کانال، عملکرد بهتری دارد.

کلید واژه‌ها: تخمین کانال، پایلوت، درون‌یاب، سیستم‌های مالتی‌پلکس تقسیم فرکانسی متعامد، فیلتر بیزین، فیلتر ذره‌ای

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست شکل‌ها ..... ج

فهرست جدول‌ها ..... ه

فصل ۱- پیشگفتار ۱

فصل ۲- مختصری بر تکنیک OFDM ۴

۲-۱- مقدمه ۴

۲-۲- مروری بر OFDM و تحقیقات انجام شده بر روی آن ۴

۲-۳- معرفی اجمالی تکنیک OFDM ۵

فصل ۳- اصول مقدماتی فیلتر ذره‌ای ۱۰

۳-۱- مقدمه ۱۰

۳-۲- فیلتر بیزین ۱۰

۳-۳- روش‌های کاربردی محاسبه انتگرال بیزین ۱۳

۳-۳-۱- حل عددی انتگرال ۱۳

۳-۳-۲- تخمین گوسی ۱۳

۳-۳-۳- نمونه‌گیری مونت‌کارلو ۱۴

۳-۳-۴- نمونه‌گیری اهمیت(IS) ۱۵

۳-۴- فیلترکردن ذره‌ای ۱۷

۳-۴-۱- تولید ذرات ۱۸

۳-۴-۲- نمونه‌گیری اهمیت زنجیره‌ای(SIS) ۱۸

۳-۴-۳- پدیده انحطاط ۱۹

۳-۴-۳-۱- نمونه برداری مجدد ۲۰

۳-۴-۳-۲- انتخاب توابع احتمال ۲۲

۳-۴-۴- الگوریتم SIR از فیلتر ذره‌ای ۲۳

۳-۴-۵- ساختار فیلتر ذره‌ای عام ۲۵

فصل ۴- مروری بر روش‌های متعارف تخمین کانال در سیستم‌های OFDM ۲۷

۴-۱- مقدمه..... ۲۷
۴-۲- مدل کلی سیستم‌های چندحامل مبتنی بر OFDM ۲۸
۴-۳- تخمین کانال با استفاده از پایلوت ۲۹
۴-۴- روش‌های درون‌یابی حداقل خطای مربع میانگین ۲۹
۴-۵- فیلترهای درون‌یابی تجزیه پذیر ۳۰
۴-۵-۱- درون‌یابی یک‌بعدی ۳۱
۴-۵-۲- درون‌یاب مبتنی بر الگوریتم FFT ۳۱
۴-۵-۳- درون‌یابی وینر یک‌بعدی ۳۱
فصل ۵- تخمین و پیش‌بینی کانال متغیر با زمان در سیستم‌های OFDM ۳۳
۵-۱- مقدمه..... ۳۳
۵-۲- الگوی پایلوت ۳۳
۵-۳- تخمین به کمک درون‌یاب خطی ۳۵
۵-۴- تخمین و پیش‌بینی کانال بر مبنای فیلتر ذره‌ای ۳۵
۵-۵- کانال‌های مورد استفاده جهت تخمین ۳۸
۵-۵-۱ کانال BRAN-flat ۳۸
۵-۵-۲ کانال BRAN-E1 ..... ۳۹
۵-۵-۳ کانال BRAN-E ۳۹
۵-۶- معرفی محیط شبیه‌سازی سیستم SISO-OFDM ۴۰
۵-۷- نتایج شبیه‌سازی در سیستم SISO-OFDM ۴۰
۵-۸- معرفی محیط شبیه‌سازی سیستم MISO-OFDM ۵۲
۵-۹- نتایج شبیه‌سازی سیستم MISO-OFDM ۵۲
فصل ۶- نتیجه‌گیری و زمینه‌ی گسترش در آینده ۵۶
۶-۱- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی ۵۶
۶-۲- ارائه‌ی پیشنهادات ۵۷
فهرست مراجع ۵۸
واژه‌نامه فارسی به انگلیسی ۶۳
واژه‌نامه انگلیسی به فارسی ۶۶

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل(۲-۱) : (a) کانال با محوشدگی فرکانس‌گزین(b)کانال با محوشدگی تخت (c)سیگنال مدوله شده در کانال با محوشدگی فرکانس‌گزین (d) سیگنال باند باریک در کانال با محوشدگی فرکانس‌گزین ۶
شکل(۲-۲) : طرح مدولاسیون چندحامله ۶
شکل(۲-۳) : مالتی پلکس تقسیم فرکانسی با باند محافظ ۷
شکل(۲-۴) : مالتی پلکس تقسیم فرکانسی متعامد با طیف هم‌پوشان ۷
شکل (۲-۵) : سیستم FDM ۷
شکل(۲-۶) : طیف چگالی قدرت مربوط به (a) یک زیرکانال OFDM (b) یک سمبل OFDM ۸
شکل (۲-۷) : مقایسه بین تکنیک چندحامله‌ی معمول و OFDM ۸
شکل(۳-۱) : مراحل پیش‌بینی و به روز رسانی فیلتر بیزین ۱۲
شکل(۳-۲): نمایش نمونه‌گیری اهمیت زنجیره‌ای از چگالی احتمال پسین ۱۵
شکل(۳-۳): نمونه‌برداری یکنواخت با ۵ ذره ۲۰
شکل(۳-۴) : نمایش عملکرد مراحل نمونه‌گیری و نمونه‌گیری مجدد در فیلترهای ذره‌ای ۲۱
شکل(۳-۵) : نمایش الگوریتم SIR از فیلتر ذره‌ای ۲۴
شکل(۳-۶) : بلوک دیاگرام فیلتر ذره‌ای عام ۲۶
شکل(۴-۱) : ساختار تخمین کانال بر مبنای الگوریتم وینر ۳۲
شکل(۵-۱) : نگاشت سیگنال‌های مرجع برای سیستم SISO-OFDM ۳۴
شکل(۵-۲) : نگاشت سیگنال‌های مرجع برای سیستم MIMO-OFDM ۳۵
شکل(۵-۳) : منحنی‌های پاسخ فرکانسی کانال BRAN-flat در SNR=20 ۴۲
شکل(۵-۴) : منحنی‌های پاسخ فرکانسی کانال BRAN-E1 در SNR=20 ۴۳
شکل(۵-۵) : منحنی‌های پاسخ فرکانسی کانال BRAN-E در SNR=20 ۴۴
شکل(۵-۶) : منحنی‌های پاسخ فرکانسی کانال BRAN-flat تخمین زده شده توسط فیلتر ذره‌ای با Np=50 و SNR=20 ۴۵
شکل(۵-۷) : منحنی‌های پاسخ فرکانسی کانال BRAN-E1 تخمین زده شده توسط فیلتر ذره‌ای با Np=50 و SNR=20 ۴۶
شکل(۵-۸) : منحنی‌های پاسخ فرکانسی کانال BRAN-E تخمین زده شده توسط فیلتر ذره‌ای با Np=50 و SNR=20 ۴۷
شکل(۵-۹) : نمایش سطح کارایی MSE برحسب SNR برای کانال BRAN-flat ۴۸
شکل(۵-۱۰) : نمایش نرخ خطای بیت(BER) برحسب SNR برای کانال BRAN-flat ۴۸
شکل(۵-۱۱) : نمایش سطح کارایی MSE برحسب SNR برای کانال BRAN-E1 ۴۹
شکل(۵-۱۲) : نمایش نرخ خطای بیت(BER) برحسب SNR برای کانال BRAN-E1 ۴۹

شکل(۵-۱۳) : نمایش سطح کارایی MSE برحسب SNR برای کانال BRAN-E ۵۰
شکل(۵-۱۴) : نمایش نرخ خطای بیت(BER) برحسب SNR برای کانالBRAN-E ۵۰
شکل(۵-۱۵) : نمایش سطح کارایی MSE برحسب SNR برای پیش‌بینی کانال BRAN-flat به طول یک فریم توسط فیلتر ذره‌ای با Np=50 ..... ۵۱
شکل(۵-۱۶) : نمایش سطح کارایی MSE برحسب SNR برای پیش‌بینی کانال BRAN-E1 به طول یک فریم توسط فیلتر ذره‌ای با Np=50 ..... ۵۱
شکل(۵-۱۷) : نمایش سطح کارایی MSE برحسب SNR برای پیش‌بینی کانال BRAN-E به طول یک فریم توسط فیلتر ذره‌ای با Np=50 ..... ۵۱
شکل(۵-۱۸) : نمایش سطح کارایی MSE برحسب SNR برای کانال BRAN-flat ۵۳
شکل(۵-۱۹) : نمایش نرخ خطای بیت(BER) برحسب SNR برای کانال BRAN-flat ۵۳
شکل(۵-۲۰) : نمایش سطح کارایی MSE برحسب SNR برای کانال BRAN-E1 ..... ۵۴
شکل(۵-۲۱) : نمایش نرخ خطای بیت(BER) برحسب SNR برای کانال BRAN-E1 ..... ۵۴
شکل(۵-۲۲) : نمایش سطح کارایی MSE برحسب SNR برای کانال BRAN-E ۵۵
شکل(۵-۲۳) : نمایش نرخ خطای بیت(BER) برحسب SNR برای کانال BRAN-E ۵۵

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول(۵-۱) : PDP کانال BRAN-E1 ..... ۳۹
جدول(۵-۲) : PDP کانال BRAN-E ۳۹

فصل ۱– پیشگفتار

مسئله‌ی تخمین سیستم‌های غیرخطی، موضوع مهمی در بسیاری از کاربردها می‌باشد. فیلتر بیزین[1] یکی از مرسوم‌ترین روش‌های تخمین می‌باشد. از دیدگاه تئوری بیزین، مسئله تخمین عبارت از تخمین تابع چگالی احتمال پسین[2] می‌باشد.

با دانستن چگالی احتمال پسین می‌توان تخمین بهینه حالت‌ها را نسبت به هر تابع معیاری محاسبه نمود. اما این فیلتر دارای یک حل بسته نیست و از این رو جهت پیاده‌سازی عملی مناسب نمی‌باشد. بسته به مدل فرآیند و اندازه‌گیری، روش‌های مختلفی برای حل عملی فیلتر بیزین وجود دارد. به عنوان مثال اگر مدل سیستم مورد بررسی، به صورت خطی باشد و نویزهای فرآیند و اندازه‌گیری دارای ماهیت گوسی باشند، از فیلتر کالمن استفاده می‌شود[۱]. در صورتی که سیستم غیرخطی و دارای نویز سفید گوسی باشد، می‌توان از فیلتر کالمن توسعه یافته استفاده نمود[۲،۳]. در صورتی که میزان غیرخطی سیستم زیاد باشد، فیلتر کالمن توسعه یافته به صورت بهینه عمل نخواهد کرد. غیرخطی بودن بالای سیستم سبب می‌شود که تقریب خطی سیستم بد شده و در نتیجه تابع توزیع احتمال پسین از حالت گوسی بودن بسیار منحرف و سبب خراب شدن تخمین‌ها می‌شود[۲،۴].

دیگر راه عملی پیاده‌سازی فیلتر بیزین، برای سیستم‌های غیرخطی، فیلتر ذره‌ای می‌باشد که محققان زیادی بر روی آن کار کرده‌اند[۵،۶]. فیلتر ذره‌ای در اصل پیاده‌سازی مبتنی بر نمونه‌برداری[3] است که در آن تابع چگالی احتمال پسین، با مجموعه‌ای از ذرات وزن داده شده، تخمین زده می‌شود[۲،۴].

فیلتر ذره‌ای کاربرد وسیعی در تخمین سیستم‌های غیرخطی و غیرگوسی دارد. هدف اصلی این فیلترها به تناسب کاربردهای مختلف ممکن است آشکارسازی یک رشته سمبل ارسالی، تخمین کانال، پیش‌بینی موقعیت هدف و ... باشد. در این پایان‌نامه با استفاده از فیلتر ذره‌ای، تخمین و پیش‌بینی کانال متغیر با زمان در سیستم‌های OFDM را مورد بررسی قرار می‌دهیم. تاکید اصلی ما در این پایان‌نامه به دو دلیل زیر بر روی تخمین کانال‌های OFDM است :

- مزیت استفاده از روش فیلتر ذره‌ای در تخمین کانال OFDM از دو منظر افزایش بازده طیفی و بهبود کیفیت تخمین می‌باشد، در حالی که استفاده از این روش‌ها در سیستم‌های تک‌حامل فقط منجر به بهبود کیفیت تخمین می‌شود. با توجه به مسئله‌ی استفاده بهینه از

[1] Bayesian Field
[2] Posterior Probability Density Function
[3] Sample Based

پهنای باند موجود در سیستم‌های مخابراتی، مزیت اصلی این روش‌ها را می‌توان در کاهش پایلوت‌ها و افزایش بازده طیفی دانست که این مسئله در سیستم‌های OFDM نمود پیدا می‌کند.

- مزایای متعدد مدولاسیون چندحامل OFDM که در ادامه ذکر خواهد شد، باعث شده است که این مدولاسیون برای تعداد زیادی از استانداردهای بی‌سیم مانند استاندارد WLAN(IEEE802.11a,g,n)، دسترسی بی‌سیم باند وسیع ثابت(IEEE802.16)، شبکه‌های بی‌سیم محلی(IEEE802.15)، ارسال صوت و تصویر دیجیتال(DAB,DRM,DVB) و سیستم‌های مخابراتی سلولی نسل آینده(3GPPLTE) مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اهمیت مسئله تخمین کانال در سیستم‌های OFDM، نیاز سیستم‌های به خدمت گیرنده OFDM به روش‌های تخمین کانال بسیار مهم خواهد بود.

مدولاسیون OFDM با ارسال اطلاعات روی زیرحامل‌های متعامد، یک کانال فرکانس‌گزین[1] را به چندین کانال فرکانسی تخت تبدیل می‌کند. این مسئله در نهایت، سادگی جبران‌سازی در گیرنده را نتیجه می‌دهد. همچنین با انتخاب طول پیشوند دوره‌ای[2] در سیستم‌های OFDM، مشکل ISI هم قابل حل است.

اما OFDM نسبت به فیدینگ حساس بوده و برای رفع این مشکل باید تخمین مناسبی از کانال به دست آورد. تخمین کانال در سیستم‌های OFDM معمولا با قرار دادن پایلوت در بین داده‌های ارسالی و استفاده از یکی از دو روش حداقل مربعات(LS) و یا حداقل میانگین مربع خطا(MMSE) برای تخمین کانال در محل پایلوت صورت می‌گیرد. همچنین از روش‌های مختلف درون‌یابی که بعضا پیچیدگی زیادی هم دارند، مانند فیلتر کردن یک‌بعدی، دوبعدی و یا فیلتر کردن تجزیه‌پذیر دوبعدی MMSE برای تخمین کانال در سایر زیرحامل‌ها استفاده می‌شود. در این پروژه با استفاده از درون‌یاب خطی و فیلتر ذره‌ای سعی در تخمین و پیش‌بینی کانال متغیر با زمان در سیستم‌های OFDM داریم و با توجه به نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهیم که استفاده از این روش، تخمین بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک تخمین کانال متغیر با زمان به دست می‌دهد.

مسئله‌ی تخصیص پایلوت یکی دیگر از مسائل مهم در فرآیند تخمین کانال‌های OFDM به شمار می‌رود. پایلوت‌ها بر اساس نوع آرایش به دو دسته پایلوت پیوسته و پایلوت پراکنده تقسیم‌بندی می‌شوند. پایلوت‌های پیوسته اگرچه عملکرد بهتری دارند ولی نرخ ارسال داده را به دلیل افزایش تعداد پایلوت‌ها

[1] Frequency Selective
[2] Cyclic Prefix

کاهش خواهند داد. در این پایان‌نامه از الگوی پایلوت پراکنده طبق استاندارد LTE استفاده شده است. بخش‌هایی که در این پایان‌نامه پیش‌رو خواهیم داشت، به این شرح خواهند بود: پس از معرفی پروژه و بیان مقدمات در فصل اول، در فصل دوم به اختصار به ارائه‌ی مفاهیم و تعاریف اولیه تکنیک OFDM می‌پردازیم. سپس در فصل سوم اصول مقدماتی فیلتر ذره‌ای را بیان کرده و در فصل چهارم به معرفی تعدادی از روش‌های متداول در تخمین کانال‌های OFDM می‌پردازیم. در فصل پنجم به تخمین و پیش‌بینی کانال متغیر با زمان برای دو سیستم SISO و MISO بر مبنای فیلتر ذره‌ای توسط شبیه‌سازی در متلب پرداخته و سپس نتایج شبیه‌سازی بررسی می‌شوند. فصل نهایی نیز به جمع‌بندی مطالب ارائه شده و ذکر پیشنهاداتی برای ادامه پژوهش‌ها در این زمینه می‌پردازد.

فصل ۲– مختصری بر تکنیک OFDM

۲–۱– مقدمه

مدولاسیون OFDM از دهه ۱۹۶۰ در آمریکا معرفی و در برخی کاربردهای نظامی مورد بهره‌برداری قرار گرفت. OFDM(مالتی پلکس تقسیم فرکانسی متعامد) یک تکنیک مدولاسیون است که براساس اصل انتقال همزمان n فرکانس متعامد است. این مدولاسیون همان‌طور که از اسمش پیداست عملیات مالتی پلکسینگ را با استفاده از تقسیم فرکانس البته به صورت متعامد اجرا می‌کند. مفهوم تعامد در تقسیم فرکانس به یک تعریف ریاضی برمی‌گردد که در آن هرگاه دو تابع سینوسی درهم ضرب شوند، انتگرال این حاصل‌ضرب بر روی هر پریود زمانی برابر صفر خواهد بود. خاصیت تعامد بین دو فرکانس f_1 و f_2 برای حالت زمان پیوسته به صورت رابطه (۲-۱) بیان می‌شود :

$$\int_0^{T_s} cos(2\pi f_1 t) \times cos(2\pi f_2 t)\, dt = 0 \qquad (۱-۲)$$

این مدولاسیون، در تبادل اطلاعات با حجم بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد و در کاربردهایی نظیر خطوط دی اس ال[۱]، شبکه‌های محلی[۲]، وای فای[۳]، دی وی بی[۴] و وایمکس[۵] استفاده می‌شود.

۲–۲– مروری بر OFDM و تحقیقات انجام شده بر روی آن

ایده‌ی اولیه OFDM در سال ۱۹۶۶ و توسط چانگ مطرح شد[۷]، از طرف دیگر سالتزبرگ[۸] نیز در همان دوران این ایده را می‌پروراند. در این ایده، هدف ارسال اطلاعات به صورت موازی روی یک‌سری زیرحامل‌های متعامد بود. این ایده در حقیقت برای فعالیتی بود که چانگ برای پروژه سنتز سیگنال‌های باندمحدود[۶] در ارسال چندکاناله در نظر داشت. اما در آن موقع به غیر از مصارف نظامی، جای دیگری پیاده‌سازی نشد. در مقاله‌ای که وینستاین و ابرت در سال ۱۹۷۱ تالیف کردند[۹]، ایده‌ی ارسال OFDM با کمک DFT مطرح شد. هرچند این مقاله آغازگر پیاده‌سازی OFDM نشد، اما در حقیقت نقش مهمی در اثبات امکان پیاده سازی OFDM داشت. در مقاله‌ی چانگ، چون از تعداد زیادی مدولاتور استفاده می‌شد، پیاده‌سازی عملی OFDM را به خصوص برای تعداد زیاد زیرحامل‌ها عملا غیرممکن می‌ساخت.

---

[1] Digital Subscribler Line(DSL)
[2] Local Area Network(LAN)
[3] Wireless Fidelity(Wi-Fi)
[4] Digital Video Broadcasting(DVB)
[5] Worldwide interoperability for Microwave access(WiMAX)
[6] Band limited

اما وینستاین و ابرت، با پیشنهاد DFT، امکان پیاده‌سازی را برای تعداد زیادی زیرحامل‌ها فراهم کردند. مقاله‌ی دیگری که در تاریخچه‌ی OFDM مهم محسوب می‌شود مقاله ای است که سیمینی[۱۰] در سال ۱۹۸۵ نوشت و در آن یک بررسی جامع در باب OFDM در کانال موبایل انجام داد که بررسی‌های او، اساس بسیاری از مقالات آتی هستند که به بررسی OFDM در کانال موبایل پرداخته‌اند، هر چند در آن مقاله، کانال فرکانسی تخت فرض شده است.

تا اوایل دهه‌ی نود، OFDM در پروژه‌های نظامی پیاده می‌شد، زیرا بسیار هزینه‌بر بود. اما در سال ۱۹۹۰ بینگهام[۱۱] در مقاله‌ای با ارائه‌ی راهکارهایی امکان پیاده سازی OFDM را با هزینه‌ی معقول در مقیاس بزرگ مطرح کرد.

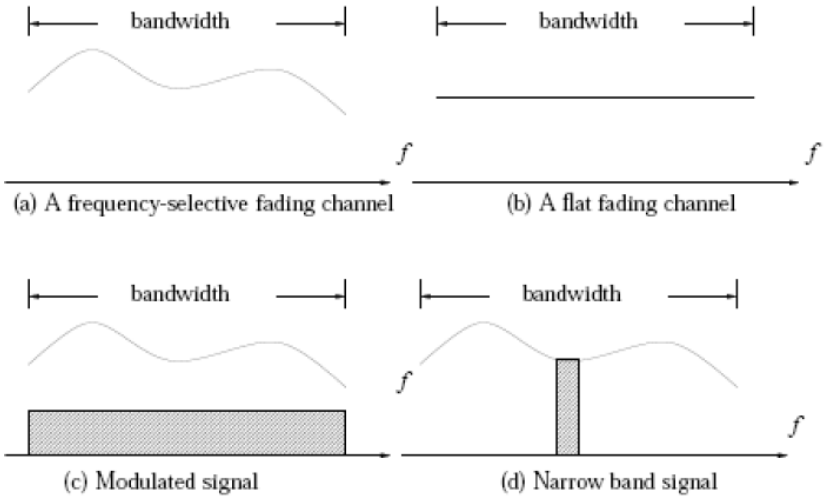
در این مدت OFDM در لایه‌ی فیزیکی مورد تحقیق در زمینه‌های متعددی بوده است. تخمین کانال، همزمانی زمانی و فرکانسی و بررسی اثرات متعددی همچون نویز فازی و یا PAPR در این سیستم از جمله موضوعات مهم تحقیق بوده است.

۲-۳- معرفی اجمالی تکنیک OFDM

کانال در صورتی فرکانس‌گزین است که پاسخ فرکانسی آن به طور مشخص در طول عرض باند سیگنال ارسالی تغییر کند[۱۲]. زمانی که پاسخ فرکانسی کانال مقداری ثابت باشد، کانال با محوشدگی تخت نامیده می‌شود. شکل(۲-۱) (a) و (b) مثال‌هایی از کانال‌هایی با محوشدگی تخت و فرکانس‌گزین را نشان می‌دهد. سیگنال‌ها که به طور دیجیتالی مدوله شده‌اند با ارسال روی کانال فرکانس‌گزین دچار اعوجاج خواهند شد(بروز خطای ISI).

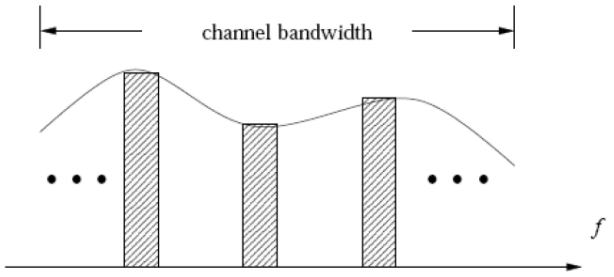
سیستم‌های دیجیتال در صورت وجود ISI، به‌خوبی قادر به‌کار کردن نیستند. برای کم کردن ISI معمولا نیاز به یک متعادل‌ساز پیچیده [۱۳] داریم که پاسخ فرکانسی کانال را در طول عرض باند موردنظر تخت کند، یا اینکه دوره‌ی سمبل‌ها باید به اندازه‌ی کافی بزرگ شوند، به طوری که بخش متاثر از خطای ISI یک سمبل قابل چشم‌پوشی باشد. از نقطه نظر حوزه‌ی فرکانس، راه‌حل دوم به این معنی است که یک سیگنال باند باریک را در طول بخشی از عرض باند کانال که می‌تواند با محوشدگی تخت فرض شود، ارسال کنیم(شکل ۲-۱(d)). توجه به این نکته، این ایده را می‌دهد که می‌توان رشته داده‌های با نرخ پایین مختلف را در فرکانس‌های حامل متفاوت، از طریق کانال به صورت موازی ارسال کرد، به این ترتیب هر رشته داده، عاری از خطای ISI خواهد بود. به این ترتیب تنها یک متعادل‌ساز ساده با یک

ضریب برای جبران‌سازی محوشدگی تخت لازم است. این ایده در شکل (۲-۲) نشان داده شده است که در واقع ایده‌ی اصلی تکنیک FDM[1] است.



شکل(۲-۱) : (a) کانال با محوشدگی فرکانس گزین(b)کانال با محوشدگی تخت (c)سیگنال مدوله شده در کانال با محوشدگی فرکانس گزین (d) سیگنال باند باریک در کانال با محوشدگی فرکانس گزین[۱۴]

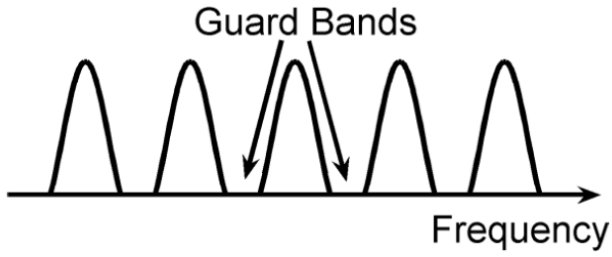
هرچند این طرح ارسال چندحامل، ممکن است خطای تداخل بین‌حامل‌ها[2] (ICI) را به سیستم تحمیل کند، یعنی سیگنال‌های حامل‌های مجاور ممکن است با یکدیگر تداخل داشته باشند.



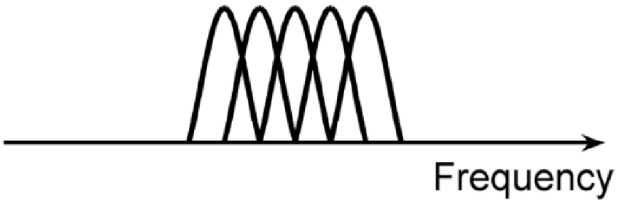
شکل(۲-۲) : طرح مدولاسیون چندحامله[۱۴]

برای اجتناب از ICI باندهای حفاظت‌کننده برای مجزا کردن زیرحامل‌ها در FDM به کار می‌روند(شکل(۲-۳)) و این امر باعث استفاده غیرموثر از منابع طیف نادر و گران‌قیمت می‌شود. تکنیک OFDM روش مدولاسیون چندحامل مشابهی را دنبال می‌کند، در حالی که از زیرحامل‌های متعامد برای از بین بردن ICI بدون نیاز به باندهای حفاظت‌کننده استفاده می‌کند(شکل(۲-۴)).

[1] Frequency Division Multiplexing
[2] Inter-Carrier Interference



شکل(۲-۳) : مالتی پلکس تقسیم فرکانسی با باند محافظ[۱۲]



شکل(۲-۴) : مالتی پلکس تقسیم فرکانسی متعامد با طیف هم‌پوشان[۱۲]

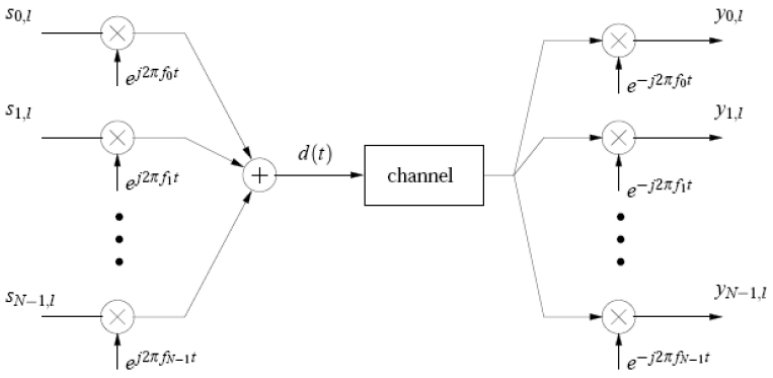
سیگنال‌های مدوله شده با فرکانس‌های تسهیم شده در یک دوره‌ی سمبل، به شکل زیر نشان داده می‌شوند :

$$d(t)=\sum_{k=0}^{N-1} s_{k,l}\, e^{j2\pi f_k t} \quad , \quad lT \le t \le (l+1)T \qquad (۲-۲)$$

به طوری که N سمبل اطلاعات $s_{k,l}, k = 1,2,\dots,N-1$ به طور پیوسته ارسال می‌شوند، با این فرض که l شاخص بلوک ارسالی ، f_k زیرحامل k ام ، و T دوره‌ی هر سمبل است .

در OFDM شرط تعامد زیر همواره برقرار است :

$$\int_0^T e^{j2\pi f_i t} \int_0^T e^{j2\pi f_j t} = \int_0^T e^{j2\pi (f_i - f_j)t} = 0 \qquad (۲-۳)$$



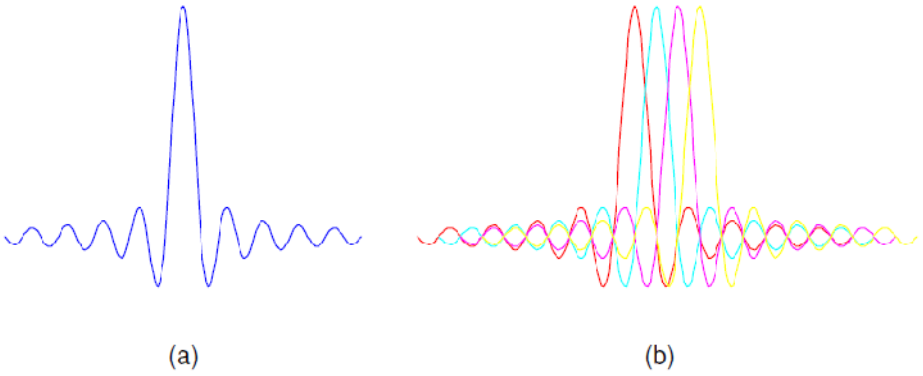
شکل(۲-۵) : سیستم FDM [۱۴]

برای برقراری رابطه‌ی(۲-۳)، ثابت می‌شود که هر دو فرکانس f_i و f_j باید در رابطه‌ی(۲-۴) صدق کنند.

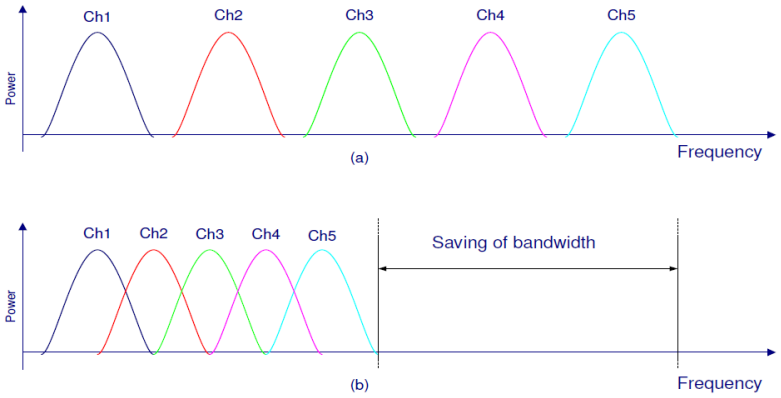
$$\Delta f = f_i - f_j = \frac{m}{T} \quad (۴-۲)$$

که در آن m یک مقدار صحیح مثبت است. بدیهی است کمترین فاصله برای تعامد دو کانال مجاور برابر با نرخ $1/T$ می‌باشد. با برقراری تعامد هر زیرحامل می‌تواند به طور مجزا، بدون ICI، دمدوله شود. این نکته باید موردتوجه قرار گیرد که درOFDM، همان‌طور که شکل(۲-۶) نشان می‌دهد، طیف سیگنال، شکل sinc را دارد و اگرچه باند محدود نیست، زیرحامل‌ها از طریق تعامد ازهم جدا می‌شوند. ممکن است باند گذار زیرحامل‌ها با هم هم‌پوشانی داشته باشند. این ویژگی به ما این امکان را می‌دهد که زیرحامل‌ها را در یک باند طیفی مفروض به شکل چگال‌تری قرار دهیم، بنابراین امکان دست‌یابی به بهره‌ی طیفی بالایی را فراهم می‌آورد .

شکل(۲-۷) تفاوت بین تکنیک چندحامل بدون هم پوشانی معمول و OFDM را نشان می‌دهد.



شکل(۲-۶) : طیف چگالی قدرت مربوط به (a) یک زیرکانال OFDM (b) یک سمبل OFDM [۱۵]



شکل(۲-۷) : مقایسه بین تکنیک چندحامله‌ی معمول و OFDM [۱۵]

به صورت کلی مهم‌ترین مزایا و معایب سیستم OFDM به شرح زیر است:

- OFDM با تبدیل کانال انتخابگر فرکانسی به کانال تخت، منجر به افزایش عملکرد سیستم از جنبه نرخ خطای بیت می شود.
- OFDM در کانال‌های چندمسیره به علت افزایش طول سمبل ارسالی مقاوم می‌باشد.
- در OFDM با استفاده از تعامد زیرکانال‌ها از طیف فرکانسی موجود استفاده بهینه می‌گردد.
- OFDM در مقابل تداخل باند باریک مقاوم است.
- پیاده‌سازی OFDM با تکنیک‌های پردازش سیگنال(IFFT[1]/FFT[2]) به جای به کارگیری نوسان‌سازهای متعدد، بهره‌وری سیستم را افزایش می‌دهد.
- انعطاف‌پذیری سیستم(امکان داشتن نرخ ارسال و توان ارسالی متفاوت در زیرحامل‌های مختلف)
- یکی از نقاط ضعف OFDM، نیاز به دقت بالای تطابق فرکانس و فاز در گیرنده و فرستنده است، یعنی گیرنده و فرستنده باید با دقت بالایی سنکرون باشند.
- OFDM نسبت به رفتارهای غیرخطی به خصوص در حوزه‌ی فاز سیگنال بسیار حساس و آسیب‌پذیر می‌باشد، به همین دلیل معمولا از تقویت کننده‌های توان گرانقیمت‌تر نسبت مدولاسیون‌های دیگر مثل DSSS[3] یا FHSS[4] (طیف گسترده) استفاده می‌کند.

[1] Inverse Fast Fourier Transform
[2] Fast Fourier Transform
[3] Direct Sequence Spread Spectrum
[4] Frequency Hopping Spread Spectrum

فصل ۳– اصول مقدماتی فیلتر ذره‌ای

۳–۱– مقدمه

فیلتر ذره‌ای روشی قدرتمند برای پردازش سیگنال‌های متوالی با گستره‌ی وسیعی از کاربردها در علوم مهندسی می‌باشد. فیلتر ذره‌ای یک روش مونت‌کارلو است که ایده‌ی اساسی آن، محاسبات بازگشتی از توزیع‌های احتمال مربوطه، با استفاده از مفهوم نمونه‌گیری اهمیت و تقریب توزیع احتمال با اندازه‌های تصادفی گسسته می‌باشد.

۳–۲– فیلتر بیزین[۱۶،۱۷،۱۸]

فیلترکردن بیزین[1] روشی است که سعی می‌کند تابع چگالی احتمال بردار حالت را با استفاده از تمامی اطلاعات موجود به دست آورد. در این کار ما علاقمندیم که مساله تخمین حالت را در حوزه‌ی زمان گسسته بررسی کنیم.

فرض کنید بردار حالت $x_k \in R^n$ ، از روی مدل سیستم زیر به دست می‌آید :

$$x_k = f_k(x_{k-1}, v_{k-1}) \qquad (۱-۳)$$

اندیس k، $k = 1,2, \dots$ نشان دهنده‌ی یک لحظه زمان t_k در مسئله می‌باشد. بردار x، $x \in R^{n_x}$ بردار وضعیت را بیان می‌کند و متغیرهای تخمینی را شامل می‌شود. f در حالت کلی یک تابع غیرخطی از متغیرهای حالت x و بردار نویز v، $v \in R^{n_v}$ می‌باشد. در موارد خاص که f_k خطی و v گوسی باشد، $p(x_k|x_{k-1})$ نیز گوسی می‌باشد.

در زمان گسسته‌ی k ام مقدار $z_k \in R^{n_z}$ به عنوان خروجی برحسب حالت سیستم تا این لحظه با رابطه‌ی(۳-۲) داده می‌شود.

$$z_k = h_k(x_k, u_k) \qquad (۲-۳)$$

اندازه‌گیری‌ها به طور کلی با متغیر x در ارتباط می‌باشند و h می‌تواند غیرخطی باشد. $u \in R^{n_u}$ نویز مشاهده می‌باشد. برای موارد خاص که h_k خطی و u گوسی است، $p(z_k|x_k)$ نیز گوسی می‌باشد.

هدف مسئله‌ی تخمین در به دست آوردن اطلاعات در مورد x_k براساس مدل سیستم(رابطه‌ی (۳-۱)) و اندازه‌گیری‌ها $z_{1:k} = \{z_i, i = 1, \dots, k\}$ که براساس مدل مشاهده و توسط رابطه‌ی (۳-۲) داده شده است، می‌باشد.

---

[1] Bayesian Filtering

مدل سیستم (رابطه‌ی (۳-۱)) و مدل مشاهده (رابطه‌ی (۳-۲)) براساس فرضیات زیر می‌باشند.

جمله‌ی x_k برای $k = 1,2, \dots$، فرآیند مارکوف[۱] [۲۰،۱۹] می‌باشد به این معنی که:

$$p(x_k|x_0, x_1, \dots, x_{k-1}) = p(x_k|x_{k-1}) \quad (۳-۳)$$

جمله‌ی z_k برای $k = 1,2, \dots$، فرآیند مارکوف می‌باشد. با توجه به سابقه‌ی x_k ، برابر است :

$$p(z_k|x_0, x_1, \dots, x_{k-1}) = p(z_k|x_k) \quad (۳-۴)$$

جمله x_k به مشاهدات گذشته، تنها در طول سابقه‌ی خود بستگی دارد که برابر است:

$$p(x_k|x_{k-1}, z_{1:k-1}) = p(x_k|x_{k-1}) \quad (۳-۵)$$

به علاوه برای مدل سیستم(رابطه‌ی(۳-۱)) و مشاهده(رابطه‌ی (۳-۲)) فرض شده است که برای $i \neq j$ بردارهای نویز v_i و v_j و همچنین u_i و u_j دو به دو مستقلند و همچنین دو به دو مستقل از وضعیت اولیه می‌باشند. همچنین بردارهای v_i و u_j دو به دو برای همه‌ی i و j ها مستقلند[۲۱].

در این پروژه با مسئله‌ی تخمین سروکار داریم. با فرض این‌که $p(x_0|z_0) = p(x_0)$ دردسترس است، چگالی احتمال پسین $p(x_k|z_{1:k})$، همان‌طور که در شکل(۳-۱) نشان داده شده است، توسط فیلتر بیزین در دو مرحله

۱.پیش‌بینی

۲. به روزرسانی

به دست می‌آید.

فرض کنید$p(x_{k-1}|z_{k-1})$ دردسترس باشد. بنابراین تابع چگالی پیشین $p(x_{0:k}|z_{0:k-1})$ می‌تواند از طریق مدل سیستم معرفی شده در رابطه‌ی (۳-۱)، برای $k > 0$ به دست آید:

$$p(x_{0:k}|z_{1:k-1}) = \int p(x_{0:k}|x_{0:k-1}, z_{1:k-1}).\, p(x_{0:k-1}|z_{1:k-1}) dx_{k-1} \quad (۳-۶)$$

این رابطه به عنوان معادله‌ی چاپمن کولموگرو[۲] شناخته می‌شود.

با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده در روابط(۳-۳) و(۳-۴)، می‌توان رابطه‌ی(۳-۶) را به صورت رابطه‌ی(۳-۷) بازنویسی کرد.

$$p(x_k|z_{1:k-1}) = \int p(x_k|x_{k-1}).\, p(x_{k-1}|z_{1:k-1}) dx_{k-1} \quad (۳-۷)$$

که در آن از رابطه‌ی $p(x_k|x_{k-1}, z_{1:k-1}) = p(x_k|x_{k-1})$ (با توجه به فرض در نظر گرفته شده در رابطه‌ی (۳-۵)) استفاده شده است، و مدل احتمالاتی $p(x_k|x_{k-1})$ توسط معادله‌ی سیستم(رابطه‌ی (۳-۱)) و مشخصات آماری معلوم v_{k-1} تعریف می‌شود.

---

[1] Markovian process

[2] Chapman-kolmogorov