دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد

ارزیابی و بهبود عملکرد روش‌های تخمین کانال در سیستم‌های مخابراتی چندکاریری به‌کمک سیستم‌های فازی

از:

مهدی احمدی

استادان راهنما:

دکتر غلامرضا باقرسلیمی

دکترجلیل سیفعلی هرسینی

اسفندماه ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی برق

(گرایش الکترونیک)

ارزیابی و بهبود عملکرد روش‌های تخمین کانال در سیستم‌های مخابراتی چندکاریری به‌کمک سیستم‌های فازی

از:

مهدی احمدی

استادان راهنما:

دکتر غلامرضا باقرسلیمی

دکترجلیل سیفعلی هرسینی

اسفندماه ۱۳۹۱

تقدیم به

خاندان اهل بیت عصمت و طهارت علیه السلام که واسط خواسته هایم از خداوند عزوجل بودند و پدر و مادر عزیزم

که با دعاهای بی وقفه شان مرا تا سر منزل مقصود یاری نمودند.

تقدیر و تشکر

به مصداق «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق» بسی سپاس از سه وجود مقدس شایسته است:

آن که ناتوان شد تا به توانایی برسم . . .

آن که موهایش سپید شد تا روسفید شوم . . .

و آنان که عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجود و روشنگر راهم باشند . . .

پدر بزرگوارم

مادر عزیزم

استادان گرامی ام

فهرست مطالب

فهرست جدول‌ها ..... **ج**
فهرست شکل‌ها ..... **ج**
فهرست علائم اختصاری ..... **ح**
چکیده پایان نامه به فارسی ..... **د**
چکیده پایان نامه به انگلیسی ..... **ذ**
فصل اول ۱
مقدمه ۱
۱-۱ تاریخچه OFDM ۲
۱-۲ مخابرات بی‌سیم ۴
۱-۲-۱ محوشدگی چند مسیره ۴
۱-۲-۲ انواع محوشدگی ۶
۱-۳ همسان‌سازی و تخمین کانال ۶
۱-۴ مروری بر فعالیت‌ها و تحقیقات انجام شده ۸
۱-۴ ساختار پایان‌نامه ۹
فصل دوم ۱۱
همسان‌سازی کانال مخابراتی ۱۱
۲-۱ مقدمه ۱۲
۲-۲ طبقه بندی همسان‌سازها ۱۳
۲-۲-۱ همسان‌ساز خطی ۱۴
۲-۲-۲ همسان‌ساز غیرخطی ۱۸
۲-۳ الگوریتم‌های مورد استفاده برای همسان‌سازها ۲۲
۲-۳-۱ الگوریتم صفر اجباری(ZF) ۲۲
۲-۳-۲ الگوریتم حداقل میانگین مربعات (LMS) ۲۳
۲-۳-۳ الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی(RLS) ۲۶
۲-۳-۴ الگوریتم کمترین مربعات بازگشتی(کالمن) ۲۷
۲-۴ مقایسه الگوریتم‌های مختلف در همسان‌سازهای وفقی ۳۱
فصل سوم ۳۳
تخمین کانال در سیستم‌های مخابراتی چند کاریری ۳۳
۳-۱ مقدمه ۳۴
۳-۲ مدولاسیون تک کاریری و چند کاریری ۳۵
۳-۳ پهنای باند محافظ ۴۲
۳-۴ پیشوند چرخشی ۴۴

۳-۵ تخمین کانال در سیستم‌های OFDM ۴۵
۳-۶ مدل باند پایه ۴۷
۳-۷ تخمین به‌کمک پایلوت‌ها ۴۸
۳-۷-۱ آرایش بلوکی پایلوت‌ها ۴۹
۳-۷-۲ آرایش شانه‌ای پایلوت‌ها ۵۲
۳-۷-۳ آرایش دوبعدی پایلوت‌ها ۵۷
۳-۸ تخمین به‌کمک روش تصمیم‌گیری هدایت شده ۵۸
۳-۹ تخمین کور ۵۹
فصل چهارم ۶۳
سیستم‌های فازی ۶۳
۴-۱ مقدمه ۶۴
۴-۲ موتورهای استنتاج ۶۷
۴-۲-۱ جزئیات چند موتور استنتاج ۶۸
۴-۲ فازی‌سازها ۶۹
۴-۴ غیر فازی‌سازها ۷۰
۴-۴-۱ مقایسه غیر فازی‌سازها ۷۲
۴-۵ مفاهیم اولیه طراحی سیستم فازی ۷۳
۴-۶ سیستم‌های فازی به‌عنوان تقریب‌گرهای عمومی ۷۴
ضمیمه الف ۷۶
مجموعه‌های فازی و عملیات بر روی آنها ۷۶
فصل پنجم ۷۸
موارد استفاده از سیستم‌های فازی در همسان‌سازی کانال ۷۸
۵-۱ فیلترهای فازی مختلط ۷۹
۵-۱-۱ الگوریتم تطبیقی مبتنی بر LMS ۸۰
۵-۱-۲ نتایج عملی ۸۴
۵-۲ همسان‌سازهای DFE-LMS و DFE-RLS فازی ۸۵
۵-۳ تخمین و همسان‌سازی کانال محوشدگی برای سیستم MIMO-OFDM به‌کمک روش فازی ۹۰
۵-۳-۱ مدل فرستنده ۹۱
۵-۳-۲ مدل گیرنده ۹۲
۵-۳-۳ طرح مسئله ۹۳
۵-۳-۴ ردیابی کانال مبتنی بر فازی ۹۴
۵-۳-۵ فیلتر کالمن مبتنی بر فازی برای تخمین کانال تغییر پذیر با زمان ۹۶
۵-۳-۶ الگوریتم تصمیم‌گیری هدایت شده ۹۸
مراجع ۱۰۳

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱ مقایسه الگوریتم‌های مختلف همسان‌سازهای وفقی [۱۲]..... ۶۲
جدول۳-۱ پارامترهای شبیه‌سازی روش‌های تخمین کانال [۸-۶]..... ۳۹
جدول ۴-۱ مقایسه غیر فازی‌سازهای مرکز ثقل، میانگین مراکز و ماکزیمم [۵]. ۸۲
جدول ۵-۱ مشخصات تأخیر توان در مناطق شهری [۱۱]..... ۱۰۰
جدول ۵-۲ پارامترهای شبیه‌سازی سیستم MIMO-OFDM [۱۱]..... ۱۰۰

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱ شمای کانال چند مسیره [۲]..... ۵
شکل ۲-۱ طبقه‌بندی کلی روش‌های همسان‌سازی به‌همراه نوع، ساختار و الگوریتم‌های مورد استفاده [۱۲]..... ۱۴
شکل ۲-۲ ساختار همسان‌ساز عرضی خطی پایه [۱۳]..... ۱۴
شکل ۲-۳ یک فیلتر IIR با خط تأخیر شامل دو مسیر تأخیر پیشرو و پسخور [۱۳]..... ۱۵
شکل ۲-۴ ساختار یک نمونه همسان‌ساز عرضی خطی [۱۳]..... ۱۶
شکل ۲-۵ ساختار همسان‌ساز لتیس [۱۳]..... ۱۷
شکل ۲-۶ ساختار همسان‌ساز با پسخور تصمیم(DFE) [۱۳]..... ۲۰
شکل ۲-۷ ساختار همسان‌ساز با تخمین حداکثر درست نمایی دنباله(MLSE) با فیلتر وفقی.بیق یافته [۱۳]..... ۲۱
شکل ۳-۱ مقایسه مدولاسیون تک‌کاریری و چندکاریری: (الف) طیف فرکانسی سمبل‌های ارسالی (ب) طیف فرکانسی سمبل‌های دریافتی [۲]..... ۳۶
شکل ۳-۲ یک فرستنده OFDM مبتنی بر اسیلاتور [۲]..... ۳۸
شکل ۳-۳ گیرنده OFDM مبتنی بر اسیلاتور [۲]..... ۳۸
شکل ۳-۴ طیف فرکانسی سیگنال‌های زمان محدود متعامد با تداخل فرکانسی [۲]..... ۳۹
شکل ۳-۵ مقایسه طیف فرکانسی (الف) سیگنال‌های متعامد باند محدود بدون همپوشانی (ب) سیگنال‌های متعامد زمان محدود همپوشان ج) سیگنال‌های باند محدود همپوشان [۲]..... ۴۰
شکل ۳-۶ یک فرستنده- گیرنده OFDM باند پایه مبتنی بر FFT [۲۴]..... ۴۱
شکل ۳-۷ پاسخ ضربه یک کانال انتخاب‌گر فرکانس [۲]..... ۴۲
شکل ۳-۸ (الف) سیگنال ارسالی (ب) سیگنال دریافتی عبوری از کانال انتخاب‌گر فرکانس شکل ۳-۷ [۲]..... ۴۲
شکل ۳-۹ سیستم OFDM با بازه محافظ، (الف) سیگنال ارسالی، (ب) سیگنال دریافتی [۲]..... ۴۳
شکل ۳-۱۰ سمبل دریافتی iام بعد از حذف بازه محافظ [۲]..... ۴۳
شکل ۳-۱۱ سیستم OFDM با پیشوند چرخشی، (الف) سیگنال ارسالی، (ب) سیگنال دریافتی [۲]..... ۴۴
شکل ۳-۱۲ سیگنال دریافتی پس از حذف پیشوند چرخشی [۲]..... ۴۴
شکل ۳-۱۳ تخمین کانال در حوزه زمان- فرکانس [۲۵]..... ۴۶
شکل ۳-۱۴ پیاده‌سازی دیجیتال یک سیستم *OFDM* باند پایه [۲۸]..... ۴۷
شکل ۳-۱۵ آرایش بلوکی پایلوت‌ها [۲۵]..... ۴۹
شکل ۳-۱۶ آرایش شانه‌ای پایلوت‌ها [۲۵]..... ۵۳

شکل۳-۱۷ درون‌یابی حوزه زمان [۳۰]..... ۵۵
شکل ۳-۱۸ یک گیرنده OFDM با تخمین کانال تصمیم‌گیری هدایت شده[۳۷]..... ۵۸
شکل ۳-۱۹ تخمین کانال با مدولاسیون BPSK تحت کانال محوشدگی رایلی [۳۰]..... ۶۱
شکل ۳-۲۰ تخمین کانال با مدولاسیون QPSK تحت کانال محوشدگی رایلی [۳۰]..... ۶۱
شکل ۳-۲۱ تخمین کانال با مدولاسیون 16QAM تحت کانال محوشدگی رایلی [۳۰]..... ۶۲
شکل ۴-۱ ساختار اصلی سیستم‌های فازی خالص [۵]..... ۶۵
شکل ۴-۲ ساختار اصلی سیستم TSK [۵]..... ۶۶
شکل ۴-۳ ساختار اصلی سیستم‌های فازی با فازی‌ساز و غیر فازی‌ساز [۵]..... ۶۶
شکل ۴-۴ ارائه نمودار برای نمایش گستردگی کاربرد تئوری فازی [۵]..... ۶۷
شکل ۴-۵ مثال‌هایی از توابع تعلق شبه ذوزنقه‌ای [۵]..... ۷۳
شکل ۵-۱ مقایسه میزان خطای بیت بین همسان‌ساز بهینه و همسان‌ساز فازی [۴]..... ۸۵
شکل ۵-۲ همسان‌سازهای DFE-LMS و DFE-RLS فازی [۹]..... ۸۶
شکل ۵-۳ مقایسه سرعت همگرایی همسان‌سازهای تطبیقی [۹]..... ۸۹
شکل ۵-۴ مقایسه سرعت همگرایی همسان‌سازهای فازی [۹]..... ۸۹
شکل ۵-۵ بلوک دیاگرام سیستم OFDM [۷-۹،۱۱]..... ۹۱
شکل ۵-۶ بلوک دیاگرام فرستنده در سیستم MIMO-OFDM [۱۱]..... ۹۱
شکل ۵-۷ بلوک دیاگرام گیرنده در سیستم MIMO-OFDM [۱۱]..... ۹۳
شکل ۵-۸ توابع تعلق قواعد فازی [۱۱]..... ۱۰۱
شکل ۵-۹ روش‌های تخمین کانال برای سیستم MIMO-OFDM در کانال محوشدگی رایلی [۱۱]..... ۱۰۲
شکل ۵-۱۰ مقایسه همسان‌ساز MMSE پیشنهادی با متعارف برای سیستم MIMO-OFDM با سرعت تغییرپذیر در کانال محوشدگی رایلی [۱۱]..... ۱۰۲

فهرست علائم اختصاری

ADC …..…….Analog to Digital Converter

AWGN ...……..Additive White Gaussian Noise

BER ...……...……Bit Error Rate

CFR ……..……Channel Frequency Response

CFO ……..Carrier frequency offset

CIR ……....Channel impulse response

CP ……..……Cyclic Prefix

DAB …….……..Digital Audio Broadcasting

DFE ……Decision Feedback Equalization

DFT ...……..……Discrete Fourier Transform

DVB …….……..Digital Video Broadcasting

DWMT ...……...……Discrete Wavelet Multi-tone

FDM ..……Frequency Division Multiplexing

FIR ……..……Finite Impulse Response

ICI ...……Inter Carrier Interference

IDFT ..…… Inverse Discrete Fourier Transform

IEEE ……..…….. Institute of Electrical and Electronic Engineers

IFFT ……..……Inverse Fast Fourier Transformation

IIR ……...…….…….…….Infinite Impulse Response

ISI ……..Inter Symbol Interference

LMS ……Least Mean Square

LS ……...Least Square

LTE ……...……..Long Term Evaluation

MCM ..…….. Multi-Carrier Modulation

MLSE ……Maximum-Likelihood Sequence Estimation

MMSE …….Minimum Mean Square Error

MSE ..……Mean Square Error

NLMS ……...Normalized Least Mean Square

OFDM .....Orthogonal Frequency Division Multiplexing

PAPR ……...Peak to Average Power Ratio

PAR …….Peak to Average Ratio

PER …..……..…….Packet Error Rate

PR ……Perfect Reconstruct

RLS ……..…….Recursive Least Square

RRC ..…….. Root Raised Cosine

SC ……...……..Single Carrier

SER ……..…….Symbol Error Rate

SNR ……...…….. Signal to Noise Ratio

ZF ..……..Zero Forcing

ZP ……..…….……Zero Padding

چکیده

عنوان: ارزیابی و بهبود عملکرد روش‌های تخمین کانال در سیستم‌های مخابراتی چندکاریری به‌کمک سیستم‌های فازی
نام دانشجو: مهدی احمدی

در سال‌های اخیر با رشد ارتباط چند رسانه‌ای سعی بر طراحی سیستم‌هایی است که برای میزان بالای ارسال داده‌ها بر روی کانال‌های همراه با محوشدگی، بازدهی مناسبی داشته باشند. یک انتخاب مناسب مدولاسیون چند کاریری است. تسهیم تقسیم فرکانسی متعامد (OFDM) یکی از پر کاربردترین مدولاسیون چند کاریری است که در آن اطلاعات بوسیله‌ی چندین کاریر فرعی مدوله می‌شوند. این ویژگی موجب کاهش تداخل بین سمبل‌ها (ISI) در کانال محوشدگی می‌شود. با اضافه کردن پیشوند چرخشی (CP) به هر سمبل OFDM، ISI کاملا حذف می‌شود. کانال‌های بی‌سیم، کانال انتخاب‌گر فرکانس و تغییر پذیر با زمان می‌باشند. بنابراین بیت‌های مدوله شده در طی عبور از کانال دچار شیفت در دامنه و فاز می‌شوند. برای این که گیرنده بتواند بیت‌های اولیه را بازیابی کند لازم است اثر این تغییرات ناخواسته به‌نحوی خنثی شود. برای این منظور از تخمین کانال و همسان‌سازی استفاده می‌شود که درابتدا بوسیله‌ی یکی از روش‌های تخمین، پاسخ فرکانسی کانال تخمین زده می‌شود.

سیستم‌های فازی بوسیله موتور استنتاج فازی که در ارتباط مستقیم با فازی‌ساز و غیر فازی‌ساز می‌باشند، مجموعه‌ای فازی در فضای ورودی را به مجموعه‌ای فازی در فضای خروجی خود مبتنی بر اصول منطق فازی نگاشت می‌کنند. به‌کمک سیستم‌های فازی می‌توان با کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی، سرعت محاسبات را افزایش داده و قابلیت لازم برای پیاده‌سازی سیستم در عملیات پیوسته و متغیر با زمان را فراهم کرد. در این پایان‌نامه به بررسی مسئله تخمین کانال در سیستم‌های OFDM درشرایط مختلف و سپس همسان‌سازی آن با استفاده از سیستم‌های فازی پرداخته می‌شود. در ابتدا روش‌های تخمین و همسان‌سازی کانال در سیستم‌های OFDM و سپس استفاده از روش‌های فازی در بهبودکارایی سیستم‌های OFDM مورد بررسی قرار می‌گیرد. این روش‌ها به‌منظور ارزیابی عملکرد سیستم و ارائه‌ی راه‌کاری برای کمینه کردن آثار مخرب ناخواسته مانند محوشدگی کانال‌ها و عناصر غیرخطی موجود در سیستم به‌کار می‌روند.

کلید واژه: مدولاسیون چند کاریری، تسهیم تکنیک تقسیم فرکانسی متعامد، کانال بی‌سیم، تخمین کانال، همسان‌سازی، سیستم‌های فازی

Abstract:

Title: Performance Evaluation and Improvement of Channel Estimation Techniques in Multi-carrier Communication Systems using fuzzy systems

Student name: Mahdi Ahmadi

In recent years with the growth of multimedia communications, there is an attempt to design systems that have proper efficiency for high rate of transmitting data on mobile fading channels. Multi-carrier modulation is a suitable choice. Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is one of the most used multi-carrier modulation techniques that data is modulated by multiple sub-carriers.This features reduces the inter-symbol interference of the fading channels. By adding cyclic prefix (CP) to each OFDM symbol, ISI is completely eliminated. Wireless channels are frequency selective and time-varying. Therefore, modulated bits passed through channel experience amplitude variation and phase shift. It is necessary to neutralize the effect of these undesirable variations to recover initial bits by the receiver. Channel estimation and equalization are used for this purpose that at first, frequency response of channel is estimated by one of the estimation methods.

The fuzzy systems with fuzzy inference engine that is related with the fuzzifiers and defuzzifiers, map a fuzzy set in the input space to a fuzzy set in output space based on principles of fuzzy logic. With the aid of fuzzy systems, the computational complexity can be reduced and increases computing speed and prepares capacity necessary to implement system providing continuous and time-varying operation**.** This thesis examines the problem of channel estimation in OFDM systems in different conditions and then equalization using fuzzy systems is discussed. At first, Estimation methods and channel equalization in OFDM systems is reviewed, and then using fuzzy systems in improvement of OFDM system performance is examined. These methods are applied to evaluate performance of system and to offer a proper solution for minimizing undesirable effects like Channel fading and nonlinear elements in system.

Key word: Multi-Carrier Modulation, Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Wireless Channel, Channel Estimation, Equalization, Fuzzy Systems

فصل اول

مقدمه

۱-۱ تاریخچه OFDM[۱]

در سال‌های اخیر با رشد روز افزون ارتباط چند رسانه‌ای شامل: صوت، تصویر، دیتا، شبکه‌های کامپیوتری مانند اینترنت و افزایش استفاده از سرویس‌های موبایل، سعی بر طراحی سیستم‌هایی است که برای ارسال میزان داده‌ی بالا بر روی کانال‌های همراه با محوشدگی، بازدهی مناسبی داشته باشند[۱]. یک انتخاب مناسب برای شبکه‌های بی‌سیم پر ظرفیت، مدولاسیون‌های چند کاریری است. مدولاسیون چند کاریری[۲] (MCM) از مدولاسیون‌های مخابرات دیجیتال است [۲]. این مدولاسیون به‌علت مقاومت در برابر محوشدگی انتخاب‌گر فرکانسی[۳] کاربرد وسیعی در مخابرات بی‌سیم دارد. در مخابرات بی‌سیم از فضای آزاد به‌عنوان کانال استفاده می‌شود. وجود موانعی همچون ساختمان‌ها، کوه‌ها و وسایل نقلیه و ... بین فرستنده و گیرنده باعث می‌شوند سیگنال تنها از مسیر مستقیم به گیرنده نرسد و آن‌چه در گیرنده دریافت می‌شود نسخه‌های تضعیف شده و تأخیر یافته از سیگنال ارسالی می‌باشد. این پدیده محوشدگی[۴] نام دارد. در مدولاسیون تک کاریری سمبل‌ها به‌طور پشت سر هم ارسال می‌شوند و منجر می‌شود نسخه تأخیر یافته یک سمبل با سمبل بعدی تداخل پیدا کند که به آن تداخل بین سمبل[۵] (ISI) می‌گویند. هرچه طول سمبل بیش‌تر باشد مقاومت در برابر ISI بیش‌تر خواهد بود اما افزایش طول سمبل سرعت ارسال را کاهش می‌دهد. در MCM چند سمبل با طول زیاد را به‌طور همزمان و با کاریرهای مختلف ارسال می‌کنند. به‌این

۱ - Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)
۲- Multicarrier modulation
۳- Frequency selective fading
۴ -Fading
۵ -Inter Symbol Interference

ترتیب بدون اینکه سرعت ارسال سمبل‌ها کم شود میزان ISI کاهش می‌یابد. طیف هر کدام از این سمبل‌ها قسمتی از پهنای باند کانال را اشغال می‌کند و در صورت تداخل باریک باند همه‌ی کاریرهای فرعی از بین نمی‌روند. از آنجایی‌که عمل همسان-سازی به‌طور مستقل از یکدیگر بر روی هر کدام از طیف‌ها انجام می‌شود منجر به ساده شدن همسان‌سازی شده و از این رو به-عنوان یکی از مهمترین مزیت‌های MCM شناخته می‌شود. OFDM یکی از پر کاربردترین مدولاسیون‌های چند کاریری است. قدمت OFDM به اواسط دهه‌ی ۶۰ میلادی برمی‌گردد، زمانی که چانگ[۱] مقاله‌ی خود را در زمینه‌ی ترکیب سیگنال‌های باند محدود[۲] برای انتقال چند کاناله[۳] منتشر کرد [۲]. او در این مقاله اصول مربوط به ارسال پیوسته پیام در یک کانال خطی باند محدود را بدون حضور اثرات تداخل بین کاریر (ICI) و ISI مطرح ساخت. به فاصله کمی از او، سالتزبرگ[۴] با تجزیه و تحلیل سیستم پیشنهادی چانگ نتیجه‌گیری کرد که در طراحی یک سیستم موازی کارآمد، به‌دلیل شدت یافتن اعوجاج‌های ناشی از اثر هم‌شنوایی[۵] توجه به کاهش این اثر بین کانال‌های مجاور مساله‌ای مهم‌تر نسبت به تشخیص و جداسازی کانال‌ها از یکدیگر است [۳]. در واقع این یک نتیجه مهم و اساسی بود که درستی و صحت آن در پردازش سیگنال باند پایه دیجیتال به فاصله چند سال پس ازمطرح شدن اثبات شد.

یکی از مهمترین تحولات OFDM در سال ۱۹۷۱ و با پیشنهاد وینستین[۶] و ایبرت[۷] مبنی بر استفاده از DFT برای مدولاسیون و دمودلاسیون باند پایه صورت گرفت [۲]. به این ترتیب با حذف بانک نوسان‌سازهای زیر کانال‌ها، روشی کارآمد در پردازش سیگنال معرفی شد. علاوه بر این به‌منظور کاهش اثرات ISI و ICI، هر دوی آنها از یک باند محافظ در حوزه زمان بین سمبل-ها و پنجره RC[۸] استفاده کردند. اگر چه در سیستم معرفی شده توسط آنها، متعامد بودن کامل زیر کانال‌ها حاصل نمی‌شد ولی نتایج تلاش آنها تحولی مهم در OFDM محسوب می‌شد. مشکل متعامد باقی ماندن زیر کانال‌ها نیز در سال ۱۹۸۰ توسط پلد[۹] و رویز[۱۰] با معرفی پیشوند چرخشی[۱۱] حل شد [۲]. در این روش به‌جای استفاده از فضای خالی بین سمبل‌ها، این فضا با امتداد سمبل OFDM پر می‌شود. در واقع استفاده از CP معادل با اثر کانال به‌صورت کانولوشن چرخشی[۱۲] است. CP کپی قسمت انتهایی سمبل است که به ابتدای آن اضافه می‌گردد. همچنین با افزایش دوره تناوب سمبل برای کانال‌های موازی و با

۱- chang
۲- Band Limited
۳- Multichannel Transmission
۴- Saltzberg
۵ - Inter Carrier Interference
۶- Weinstein
۷- Ebert
۸- Cosine Raised
۹- Peled
۱۰- Ruiz
۱۱- Cyclic Prefix
۱۲- Cyclic Convolution

میزان داده پایین‌تر می‌توان اثر پراکندگی در حوزه زمان را به‌طور نسبی کاهش داد. مساله دیگر شکل پالس مورد استفاده در طراحی سیستم‌های OFDM است که با وجود آن‌که درگذشته عموما از پالس‌های مستطیلی استفاده می‌شده ولی از دهه‌ی ۱۹۹۰ توجه به مساله شکل‌دهی پالس[۱] معطوف شده، زیرا با به کارگیری پالس‌هایی غیر از پالس مستطیلی، طیف فرکانسی سیگنال OFDM شکل مناسب تری می‌یابد که این مساله از دیدگاه تداخل حائز اهمیت است.

در طراحی یک سیستم براساس OFDM پارامترهایی همچون تعداد کانال‌ها، طول CP یا بازه محافظ، دوره تناوب سمبل، فاصله‌ی بین کانال‌ها، مدولاسیون هر کانال و نوع کدینگ که تمام این پارامترها تحت تأمین پهنای باند موجود، میزان بیت مورد نیاز، گستره‌ی تأخیر و داپلر می‌باشند، باید در نظر گرفته شوند.

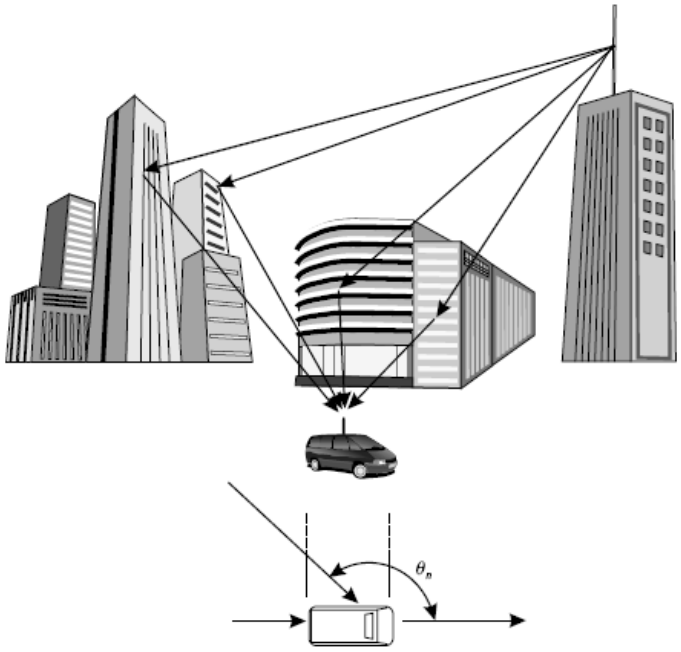
۱-۲ مخابرات بی‌سیم

در سیستم مخابرات بی‌سیم انرژی الکترومغناطیسی به وسیله یک آنتن که به‌عنوان تشعشع کننده عمل می‌کند به محیط انتشار ارسال می‌شود. سیگنال در طی انتشار در کانال بی‌سیم دچار پدیده‌ای به نام محو یا محوشدگی می‌شود. محوشدگی عبارت است از تغییراتی که در دامنه و فاز سیگنال بر اثر انتقال سیگنال از چند مسیر، تغییرات محیط انتشار و حرکت فرستنده و گیرنده ایجاد می‌شود.

۱-۲-۱ محوشدگی چند مسیره

مسیر بین ایستگاه پایه و ایستگاه سیار در مخابرات سیار زمینی[۲] با موانع و انعکاس‌های گوناگون توصیف می‌شود. به‌عنوان مثال یک محیط داخلی[۳] شامل ماشین‌های اداری و اثاثیه می‌باشد و ساختمان‌ها و درختان در محیط بیرونی[۴] وجود دارند که این موارد وقتی سیگنال رادیویی از ایستگاه پایه به ایستگاه سیار منتشر می‌شود تأمین زیادی در سیگنال دریافتی می‌گذارند که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.

۱ -Pulse Shaping
۲ -Terrestrial mobile communications
۳ - Indoor environment
۴ - Outdoor environment



شکل ۱-۱ شمای کانال چند مسیره[۲].

موج رایویی که از ایستگاه پایه منتشر می‌شود در همه جهات گسیل می‌شود. این امواج رادیویی شامل ۱) امواج بازتابی[۱] (وقتی سیگنال به یک سطح برخورد می‌کند، بخشی از انرژی منعکس می‌شود و بخشی از آن به سطح منتقل می‌شود) که در جهت-های مختلف منعکس می‌شوند،۲) امواج شکسته‌شده[۲] (وقتی سیگنال به یک جسم نوک تیز برخورد می‌کند و امواج ثانویه تولید می‌شوند)، ۳) امواج پراکنده‌شده[۳] (وقتی سیگنال به سطوح زبر یا اشیائ کوچک برخورد می‌کند) و۴) موج مستقیم از ایستگاه پایه به ایستگاه سیار می‌باشند. در این مورد چون طول مسیر امواج منعکس شده، تجزیه شده و پراکنده شده متفاوت است زمانی که برای رسیدن به ایستگاه پایه طی می‌کنند متفاوت است. علاوه بر این فاز سیگنال ورودی نیز به خاطر بازتاب‌ها متفاوت خواهد بود. در نتیجه گیرنده برآیند موج‌های متفاوت که فاز و زمان رسیدن آن‌ها متفاوت است را دریافت می‌کند. موج رادیویی که زمان رسیدن آن عقب‌تر از موج مستقیم است موج تأخیر یافته نامیده می‌شود. محیط دریافت که با برآیند امواج تأخیر یافته مشخص می‌شود محیط انتشار چند مسیره نامیده می‌شود. در محیط انتشار چند مسیره سیگنال دریافتی گاهی تضعیف یا تقویت می‌شود. این پدیده محوشدگی چند مسیره نامیده می‌شود و سطح سیگنال دریافتی لحظه به لحظه تغییر می‌کند. برای اطمینان از بهره‌وری بالای سیستم مخابراتی بی‌سیم یک روش جبران برای محوشدگی چند مسیره الزامی است.

۱- Reflected waves
۲- Diffracted waves
۳- Scattering waves

۱-۲-۲ انواع محوشدگی

نوع محوشدگی‌ای که سیگنال دچار آن می‌شود بستگی به پهنای باند و طول سمبل ارسالی دارد. ریشه‌ی دوم میانگین مربع تأخیرها، RMS[۱] وسعت تأخیر[۲] نامیده می‌شود و آن‌را با σ_τ نشان می‌دهند. پهنای باند همدوسی[۳] که آن‌را با B_c نمایش می‌دهند پهنای باندی است که در آن پاسخ فرکانسی کانال هموار است. B_c به‌طور معکوس با σ_τ متناسب است. اگر طول سمبل بزرگ‌تر از σ_τ باشد و یا به‌طور معادل پهنای باند سمبل کوچک‌تر از B_c باشد محوشدگی هموار[۴] خواهیم داشت در غیر این صورت محوشدگی را انتخاب‌گر فرکانسی می‌نامند. از عوامل دیگر که باعث محوشدگی می‌شود تغییر پذیری کانال با زمان است. این تغییرات ممکن است به خاطر تغییرات در شرایط اتمسفری و یا به علت حرکت نسبی آنتن‌های فرستنده و گیرنده باشد. گستره داپلر[۵](B_D) معیاری از بیشینه فراخی طیف به علت شیفت داپلر است. معادل حوزه زمان گستره داپلر، زمان همدوسی(T_C) می‌باشد. زمان همدوسی فاصله زمانی است که در آن کانال تغییر پذیر با زمان است. اگر طول سمبل کوچک‌تر از زمان همدوسی کانال باشد و یا به‌طور معادل پهنای باند کانال بیش‌تر از B_D باشد محوشدگی کند[۶] خواهیم داشت در غیر این‌صورت محوشدگی را سریع[۷] می‌نامند.

۱-۳ همسان‌سازی و تخمین کانال

بسیاری از کانال‌های مخابراتی را می‌توان به‌صورت فیلترهای خطی باند محدود با پاسخ فرکانسی

$$c(f) = A(f)e^{j\theta(f)} \qquad (۱-۱)$$

مدل کرد. در کانال ایده‌آل $A(f)$ ثابت و $\theta(f)$ تابعی خطی از فرکانس است. اگر هر یک از این شرایط برقرار نباشد کانال را غیر ایده آل می‌گویند. کانال غیر ایده‌آل باعث تداخل بین سمبل‌ها می‌شود. از طرفی جزء جدا نشدنی هر سیستم مخابراتی نویز است. پس سیگنال دریافتی نسخه فیلتر شده‌ی سیگنال ورودی همراه با نویز خواهد بود:

$$r(t) = s(t) * c(t) + n(t) \qquad (۲-۱)$$

۱-Root of Mean Square

۲- Delay spread

۳- Coherence Bandwidth

۴- Flat fading

۵- Doppler Spread

۶- Slow Fading

۷- Flat Fading

با همسان‌سازی می‌توان اثرات نامطلوب نویز و ISI ناشی از اعوجاج کانال را از بین برد. مشخصه کانال ممکن است با زمان نیز تغییر کند در این‌صورت ISI با زمان تغییر می‌کند و همسان‌ساز باید تغییرات زمانی کانال را دنبال کند.

همسان‌سازها را می‌توان به دو دسته کلی همسان‌ساز خطی و همسان‌ساز غیرخطی تقسیم کرد. همسان‌ساز خطی فیلتری است که اثر کانال را خنثی می‌کند. متداول‌ترین نوع آن یک فیلتر FIR[۱] با ضرایب قابل تنظیم است که به آن فیلتر ترانسورسال[۲] نیز می‌گویند.

همسان‌سازهای خطی خود به دو گروه همسان‌ساز پیش تنظیمی[۳] و همسان‌ساز تطبیقی[۴] تقسیم می‌شوند [۳]. در همسان‌ساز پیش تنظیمی پارامترهای بردار همسان‌ساز در طی انتقال داده‌ها ثابت می‌مانند یعنی مشخصه‌های کانال را اندازه گرفته و پارامترهای تنظیم پذیر همسان‌ساز را تنظیم می‌کنند. همسان‌سازهای تطبیقی پارامترهای خود را طی انتقال داده‌ها به‌طور دائم به روز می‌کنند بنابراین می‌توانند پاسخ کانالی را که به تدریج با زمان تغییر می‌کند دنبال کنند[۳]. از طرفی برای تنظیم ضرایب باید یک معیار عملکرد مثلا حذف کامل ISI در نظر گرفته شود. بر این اساس همسان‌سازهای متفاوتی خواهیم داشت. مثلا در همسان‌ساز اجبار به صفر[۵] هدف حذف ISI ناشی از کانال است و از اثر نویز چشم پوشی می‌شود. در همسان‌ساز با معیار MMSE[۶] ضرایب طوری تنظیم می‌شوند که مجموع توان در ISI باقی مانده و نویز اضافه شونده حداقل شود.

محدودیت اصلی همسان‌سازهای خطی این است که در کانال‌های دارای صفر طیفی بد عمل می‌کنند. با چنین کانال‌هایی در مخابرات رادیویی مواجه می‌شویم که کانال‌های رادیویی سیار از آن جمله‌اند. در چنین مواردی همسان‌ساز غیرخطی عملکرد بهتری نسبت به همسان‌سازهای خطی دارد. همسان‌ساز با پسخور تصمیم‌گیری[۷] (DFE) یک مثال از همسان‌سازهای غیرخطی است که از تصمیمات قبلی برای حذف ISI، (که توسط سمبل‌های آشکار شده قبلی بر روی سمبل‌های فعلی ایجاد می‌شود) بهره می‌گیرد. لازم به‌ذکر است که آن چه همسان‌ساز DFE را غیرخطی می‌کند مشخصه غیرخطی آشکار ساز است.
کانال‌های چند مسیره بی‌سیم (مانند کانال‌های رادیویی) همیشه تغییر پذیر با زمان هستند و همسان‌ساز برای تعقیب تغییرات کانال باید به‌روزرسانی شود. به‌روزرسانی ضرایب همسان‌ساز ساده نیست. سرعت تعقیب با افزایش طول همسان‌ساز کاهش می‌یابد. بنابراین وقتی کانال به شدت انتخاب‌گر فرکانس باشد همسان‌ساز طول زیادی داشته و الگوریتم به‌روزرسانی همسان‌ساز

۱- Finite Impulse Response
۲- Transversal
۳- Preset Equalizer
۴- Adaptive Equalizer
۵ - Zero-Forcing equalizer
۶- Minimum Mean Square Error
۷- Decision Feedback Equalizer