وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
مؤسسه آموزش عالی غیردولتی غیرانتفاعی سجاد

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد

مهندسی برق- مخابرات

پیشنهاد روش‌هایی جدید برای تخمین کور کانال‌های مخابراتی SIMO و MIMO-OFDM به روش زیرفضا

عمار حسنوند

استاد راهنما :

دکتر ایمان اَحدی اخلاقـی

تابستان ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحیم

تقدیم به:

خانواده عزیزم

تشکر و قدردانی:

الهی، عاجز و سرگردانم، نه آنچـه دانم، دارم و نه آنچه دارم؛ دانم. چون توانستم؛ ندانستم و چون دانستم؛ نتوانستم. من کی‌ام که تو را خواهـــم، چون از قیمت خویش آگاهم.

«خواجه عبدا...انصاری»

با تشکر و قدردانی فـــراوان از اساتید ارجمنـد گروه برق موسسه آموزش عالی سـجاد و استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر ایمان احدی اخلاقی و تمام کسانی که مرا در انجام این پایان‌نامه یاری نموده‌اند.

عمارحسنوند – تابستان۹۲

چکیده

در این پایان‌نامه از تخمین کور کانال به روش زیرفضا به منظور آشکارسازی بهتر سیگنال دریافتی در گیرنده استفاده شده است. معمولا تخمین کانال به وسیله داده‌های آموزشی صورت می‌گیرد اما عمل ارسال داده آموزشی باید به صورت متناوب صورت پذیرد که موجب صرف انرژی و پهنای باند می‌شود و این عملکرد سیستم را پایین خواهد آورد. روش‌های کور، کانال را بر اساس اطلاعات آماری سیگنال دریافتی تخمین می‌زنند. الگوریتم زیرفضا یک روش با پیچیدگی محاسباتی نسبتا کم و عملکرد مناسب می‌باشد که ما از این الگوریتم برای تخمین کانال‌های SIMO استفاده نمودیم و با پیشنهاد روش الگوریتم تجزیه زیرفضا برای تخمین مرتبه کانال، شرط دانستن مرتبه کانال برای الگوریتم تخمین کانال به روش زیرفضا، برطرف گردید. در بخش آخر الگوریتم تخمین کانال به روش زیرفضا برای سیستم‌های MIMO-OFDM بررسی گردید و با شبیه‌سازی رایانه‌ای عملکرد روش‌های ارائه‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت.

کلیدواژه :آمارگان مرتبه دوم- بازپخت ذرات- تخمین کور- زیرفضای نویز- سیستم‌هایSIMO - سیستم‌های MIMO-OFDM.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست شکل‌ها ..... ج

فصل ۱- مقدمه ۱

فصل ۲- اهمیت و ضرورت تخمین کور کانال و ابزار استفاده شده در تخمین ۴

۲-۱- کانال‌های مخابراتی بی‌سیم ۴

۲-۲- روش‌های تخمین کانال ۵

۲-۳- محو شوندگی ۷

۲-۴- سیستم‌های MIMO ۸

۲-۴-۱- محو شدگی در کانال‌های MIMO ۹

۲-۵- تسهیم تقسیم فرکانسی متعامد(OFDM) ۱۰

۲-۵-۲ مزیت استفاده از سیستم چند حامله ۱۱

۲-۶- الگوریتم بهینه‌سازی بازپخت ذرات ۱۳

فصل ۳- روشی پیشنهادی برای تخمین کور کانال‌های SIMO به روش زیرفضا ۱۶

۳-۱- تخمین کورکانال SIMO به روش زیرفضا با طول مرتبه کانال مشخص ۱۸

۳-۱-۱ مدل سیستم و فرمول‌بندی مساله ۱۸

۳-۱-۲ نتایج شبیه‌سازی ۲۰

۳-۲- تخمین کورکانال SIMO به روش زیرفضا با طول مرتبه کانال نامشخص ۲۳

۳-۲-۱ مدل سیستم و فرمول‌بندی مساله ۲۳

۳-۲-۲ تخمین مرتبه کانال ۲۴

۳-۲-۳ تخمین کور کانال ۲۶

۳-۲-۴ نتایج شبیه‌سازی ۲۶

فصل ۴- تخمین کور سیستم‌های MIMO-OFDM به روش زیرفضا ۳۱

۴-۱- مدل سیستم و فرمول‌بندی مساله ۳۳

۴-۲- نتایج شبیه‌سازی ۴۰

فصل ۵- جمع‌بندی و نتیجه گیری و مسیر پیش رو..... ۴۲

۵-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری..... ۴۲

۵-۲- مسیر پیش رو..... ۴۳

مراجع..... ۴۴

واژه نامه فارسی به انگلیسی..... ۴۷

واژه نامه انگلیسی به فارسی..... ۴۹

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: یک کانال چند ورودی چند خروجی ۱

شکل ۱-۲: سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم کنونی و آتی ۲

شکل ۲-۱: انتشار چندمسیرگی در کانال مخابراتی بی‌سیم ۴

شکل ۲-۲: یک سیستم MIMO ۹

شکل ۲-۳: مدولاسون چند حامله با چهار زیر حامل ۱۲

شکل ۲-۴: رویکرد تک حامل و چند حامله بودن در ارسال ۱۲

شکل ۳-۱: نمودار نحوه همگرایی الگوریتم SA در SNR=۲۵ ..... ۲۱

شکل ۳-۲: نمودار معیار تخمین MSE(dB) به ازای SNR های مختلف ۲۲

شکل ۳-۳: SNR=۵ و L_a = ۱ ..... ۲۷

شکل ۳-۴: SNR =۵ و L_a = ۲ ..... ۲۸

شکل ۳-۵: SNR=۵ و L_a = ۳ ..... ۲۸

شکل ۳-۶: SNR=۵ و L_a = ۴ ..... ۲۸

شکل ۳-۷: SNR=۵ و L_a = ۵ ..... ۲۹

شکل ۳-۸: SNR=۱۰ و L_a = ۲ ..... ۲۹

شکل ۳-۹: SNR=۱۵ و L_a = ۲ ..... ۲۹

شکل ۳-۱۰: نمودار معیار تخمین MSE(dB) به ازای SNR های مختلف و طول کانال نامعین ۳۰

شکل ۴-۱: یک طرح ساده از فرستنده‌ی MIMO-OFDM ۳۳

شکل ۴-۲: یک طرح ساده از گیرنده‌ی MIMO-OFDM ۳۳

شکل ۴-۳: مدل سیستم MIMO-OFDM با M_t آنتن فرستنده و M_r ۳۴

شکل۴-۴: باندپایه سیستم OFDM با حامل‌های مجازی برای j آنتن فرستنده و i آنتن گیرنده ۳۴

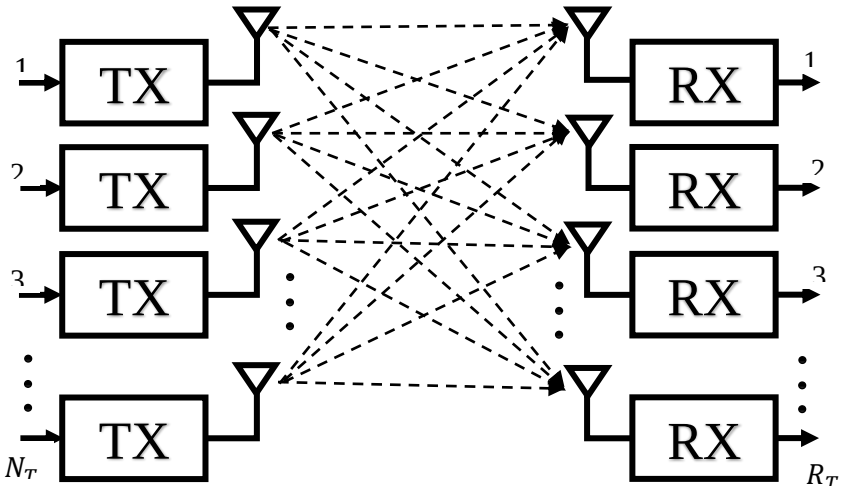
شکل ۴-۵: مقایسه عملکرد NRMSE با تعداد سمبل‌های مختلف OFDM در SNR=25..... ۴۱

شکل ۴-۶: مقایسه عملکرد NRMSE با SNRهای مختلف و تعداد سمبل‌های OFDM برابر با ۲۰۰۰..... ۴۱

فصل ۱– مقدمه

در عصر حاضر، با توجه به رشد روزافزون و چشم‌گیر تکنولوژی، مخابرات به بخش جدایی‌ناپذیری از زندگی بشر تبدیل شده است. امروزه انسان‌ها به طرق مختلف با یکدیگر در ارتباط هستند. سیستم های مخابراتی را به طور کلی می‌توان به سه بخش عمده تقسیم نمود. این بخش‌ها عبارتند از: فرستنده، کانال، گیرنده. فرستنده و گیرنده می‌توانند سیار یا ثابت باشند که در هردو صورت به وسیله کانال از هم جدا می‌شوند. کانال می‌تواند در دو نوع فیزیکی یا بی‌سیم باشد. کانال اثرات مخربی بر سیگنال ارسالی می‌گذارد این اثرات می‌توانند اعوجاج، تضعیف، تداخل با سیگنال‌های ارسالی دیگر موجود در کانال و یا نسخه‌های تاخیر یافته خود آن سیگنال و جمع شدن با نویز کانال باشند. کار گیرنده تخمین و بازسازی دقیق سیگنال اصلی ارسالی می‌باشد. برای انجام این کار ، در گیرنده از تکنیک‌های مختلفی جهت دریافت صحیح اطلاعات استفاده می‌کنند. از جمله این تکنیک‌ها میتوان به همسان‌سازی، تخمین کانال را نام برد.

امروزه تقاضا برای استفاده از سرویس‌های مخابراتی بی‌سیم رو به افزایش است. افزایش تقاضا و همچنین ارایه خدمات با کیفیت به کاربران، به دلیل کمبودهای موجود مانند محدود بودن طیف فرکانسی می‌تواند برای سیستم‌های مخابراتی ایجاد مشکل کند، از این رو ارایه روش‌هایی که با کمترین پهنای باند و مصرف انرژی بتواند خدمات بهتری به کاربران بدهد اجتناب ناپذیر است. از جمله این روش‌ها استفاده از سیستم‌های چند ورودی چند خروجی(MIMO[1]) به جای سیستم‌های تک ورودی تک خروجی(SISO)[2] می‌باشد. شکل ۱-۱ یک مدل کانال چند ورودی چند خروجی را نشان می‌دهد.

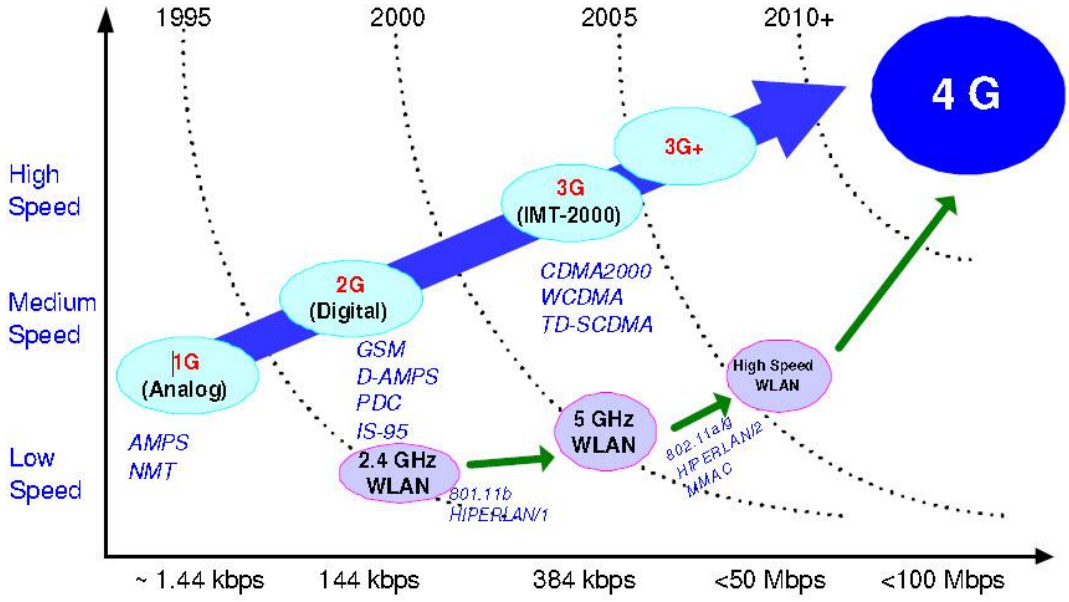


شکل ۱-۱: یک کانال چند ورودی چند خروجی

[1] Multiple-Input Multiple-Output

[2] Single-Input Single-Output

سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم به صورت نسل‌های متفاوت دسته‌بندی می‌شوند. شکل ۱-۲ سیر تحولی سیستم‌های مخابراتی را نشان می‌دهد. نسل اول (1G) شامل سیستم‌های دستیابی چندگانه‌ی تقسیم فرکانسی (FDMA[۱]) از قبیل NMT[۲] [۱] و AMPS[۳] [۲] می‌باشد. نسل دوم (2G) شامل اولین سیستم‌های مخابراتی دیجیتال سیار از قبیل GSM[۴] بر اساس دستیابی چندگانه‌ی تقسیم زمانی (TDMA[۵]) [۳]، D-AMPS [۱]، PDC[۶] [۲] و سیستم IS-95 بر اساس دستیابی چندگانه‌ی تقسیم کد (CDMA[۷]) [۴]، می‌باشد. در سال ۱۹۹۹ اتحادیه‌ی ارتباطات بین‌المللی (ITU[۸]) یک استاندارد صنعتی برای نسل سوم (3G) سیستم‌های ارتباطی سیار تصویب کرد. این استاندارد IMT-2000 نام دارد که سعی در مهیا کردن نرخ داده‌ی بالاتر نسبت به نسل موجود یعنی نسل دوم، داشت. سیستم‌های 2G معمولا برای خدمات مربوط به انتقال صدا طراحی شده‌اند، در صورتی که سیستم‌های 3G خدمات زیادی شامل دسترسی به اینترنت و ارتباط صوتی و تصویری را مهیا می‌کنند.



شکل ۱-۲: سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم کنونی و آتی[۴۰]

هم‌زمان با توسعه‌ی سیستم‌های نسل سوم، علاقه‌ی بسیاری به شبکه‌های نواحی محلی بی‌سیم (WLAN[۹]) با نرخ داده‌ی بالا، پدید آمد. سیستم‌های WLAN ناحیه‌ی تحت پوشش بسیار کمتری نسبت به سیستم‌های 3G دارند، اما آن‌ها نرخ داده‌ی بسیار بالاتری را پشتیبانی می‌کنند. از آغاز دهه‌ی ۱۹۹۰ سیستم‌های WLAN با

[1] Frequency Division Multiple Access
[2] Nordic Mobile Telephone
[3] Advanced Mobile Phone System
[4] Global System for Mobile communication
[5] Time Division Multiple Access
[6] Pacific Digital Cellular
[7] Code Division Multiple Access
[8] International Telecommunication Union
[9] Wireless Local Area Network

باندهای فرکانسی 900 MHz، 2.4 GHz و باندهای آزاد 5 GHz و با فناوری‌های متفاوت، در بازار موجود بودند [۵]. در ژوئن ۱۹۹۷ موسسه‌ی مهندسان برق و الکترونیک (IEEE) یک استاندارد قابل تعمیم بین‌المللی با نام IEEE 802.11 برای شبکه‌های WLAN تعریف کرد [۶]. در سال ۱۹۹۸، استاندارد خود را به IEEE 802.11b که نرخ داده‌ی بالاتری دارد، ارتقا داد. در این حین موسسه‌ی استانداردهای ارتباطی اروپا (ETSI) نیز استاندارد اروپایی WLAN خود را با نام HIPERLAN/1 که نرخ داده‌ی بین 1Mbps تا 20Mbps را پشتیبانی می‌کرد، ارائه داد. البته برخلاف IEEE 802.11 هیچ فرآورده‌ی تجاری‌که از HIPERLAN/1 استفاده کند، ساخته نشد.

به دلیل علاقه روزافزون به نرخ داده‌ی بالاتر، در سال ۲۰۰۰ موسسه‌ی IEEE استاندارد جدید خود با نام IEEE 802.11a را که بر اساس سیستم OFDM[1] در باند فرکانسی 5Ghz عمل می‌کند، معرفی کرد. این استاندارد نرخ داده‌ی بین 6Mbps تا 54Mbps را پشتیبانی می‌کند. برای دستیابی به نرخ داده‌های بالا در باند فرکانسی 2.4GHz، این موسسه استاندارد جدیدی به نام IEEE 802.11g در سال ۲۰۰۳ ارائه داد. هم‌زمان با این استانداردها، استانداردهای دیگری برای سیستم‌های WLAN در اروپا به نام HIPERLAN/2 و در ژاپن به نام MMAC ارائه گردیدند که از سیستم‌های OFDM بهره می‌گیرند.

هم‌زمان با گسترش سیستم‌های نسل سوم، فعالیت‌های تحقیقاتی در رابطه با سیستم‌های نسل چهار آغاز شده بود [۷]-[۸]. به دلیل تقاضا برای ترافیک داده‌ی بالا به صورت بی‌سیم، هدف از توسعه نسل‌های آینده‌ی مخابرات بی‌سیم باید نرخ بیت و ظرفیت سیستمی بالاتر باشد. نهایتا سیستم‌های نسل چهار طوری طراحی شده‌اند که شامل خدمات باند وسیع از قبیل HDTV (4-20Mbps) و کاربردهای مربوط به شبکه‌های کامپیوتری (1-100Mbps) نیز باشند. بنابراین سیستم‌های نسل چهار می‌توانند به جای سیستم‌های WLAN نیز به کار روند. در واقع هدف اصلی آن‌ها ترکیب سیستم‌های WLAN با نرخ داده‌ی بالا و سیستم‌های سلولی با نواحی تحت پوشش وسیع می‌باشد. از طرف دیگر هزینه‌های خدمات، تا حد امکان نسبت به سیستم‌های نسل سوم پایین آورده شده است. و بازده طیفی در سیستم‌های جدید بهبود یافته است.

[1] Orthogonal Frequency Division Multiplexing

فصل ۲– اهمیت و ضرورت تخمین کور کانال و ابزار استفاده شده در تخمین

در این فصل به اهمیت موضوع بحث تخمین کانال و همچنین انواع روش‌های تخمین کانال مورد استفاده در سیستم‌های مخابراتی می‌پردازیم. همچنین به محاسن و معایب هرکدام از این روش‌ها اشاره می‌کنیم. در ادامه ابزارهای لازم جهت استفاده در این پایان‌نامه با توضیحات آورده شده است.

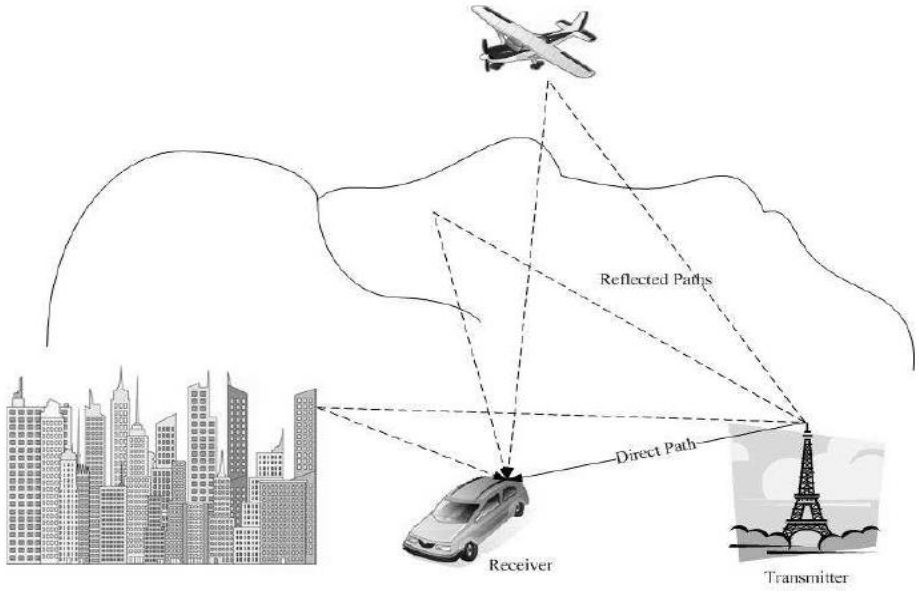
۲–۱– کانال‌های مخابراتی بی‌سیم

هر چیزی بین مبدأ و مقصد یک سیگنال رادیویی کانال می‌گویند. این محیط شامل فضایی است که سیگنال از میان آن انتشار می‌یابد. از آنجا که کانال می‌تواند فیزیکی باشد(مانند فیبر نوری، سیم و ...) لذا در سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم منظور از کانال، فضای آزاد می‌باشد. در این پایان‌نامه نیز منظور از کلمه کانال همان فضای آزاد بین فرستنده و گیرنده می‌باشد.

تاثیراتی که کانال بر روی سیگنال ارسالی ایجاد می‌کند می‌تواند تداخل بین سمبلی(ISI) ، افزودن نویز ، ایجاد اعوجاج در فاز و فرکانس باشد که این تاثیرات ناشی از ویژگی‌های فیزیکی کانال می‌باشد.

در کانال بین فرستنده و گیرنده، همیشه بازتاب از موانع بزرگ، پراش امواج الکترومغناطیسی در اطراف موانع و همچنین پراکندگی سیگنال وجود دارد. اثرات کلی این فعل و انفعالات منجر به ایجاد نسخه‌های بسیاری از سیگنال، با تضعیف‌ها، اعوجاج‌ها، تاخیرها و تغییر فازهای مختلف می‌شود.

شکل ۲-۱ یک نوع کانال ارتباطی بی‌سیم با اثر چندمسیرگی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱: انتشار چندمسیرگی در کانال مخابراتی بی‌سیم

همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، انتشار چندمسیرگی از مهم‌ترین مشکلات در سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم می‌باشد. به منظور بازیابی سیگنال ارسالی در گیرنده، دانش اطلاعات دقیق حالت کانال ضروری است. حذف اثر کانال، همسان‌سازی نام دارد. ساخت همسان‌ساز به طور مستقیم و بدون استفاده از تخمین‌گر کانال نیز ممکن می‌باشد، همچنین می‌توان ابتدا کانال را تخمین زد و سپس اثر کانال را با همسان‌سازی حذف کرد. الگوریتم‌های تخمین کانال به گیرنده اجازه می‌دهند تا پاسخ ضربه‌ی کانال را برای تشریح رفتار آن تقریب بزنند.

یکی از مزایای مهم تخمین کانال این است که پیاده‌سازی دمدولاسیون همدوس ممکن می‌شود. دمدولاسیون همدوس، نیاز به اطلاعات فاز سیگنال دارد. که این می‌تواند با استفاده از تکنیک‌های تخمین کانال به دست آید.

۲-۲- روش‌های تخمین کانال

تخمین کانال ، استفاده از روش‌هایی است که به وسیله آنها پاسخ ضربه و یا پاسخ فرکانسی کانال به منظور بازیابی درست سیگنال برای گیرنده شناخته شده شود. در عمل استفاده از روش‌هایی که خطای تخمین کمتری دارند و در عین حال ساده تر نیز می‌باشند مورد توجه می‌باشد. تخمین‌گر کانال یکی از بخش‌های مهم در سیستم-های مخابراتی می‌باشد که می‌تواند گیرنده را برای بازیابی سیگنال دریافتی با دقت بالا یاری کند. الگوریتم‌های تخمین کانال به سه دسته تقسیم می‌شوند.

۱- روش‌های تخمین کانال بر اساس دنباله‌های آموزشی

۲- روش‌های تخمین کانال کور

۳- روش‌های تخمین کانال نیمه کور

در روش تخمین کانال بر اساس داده‌های آموزشی، تخمین کانال از طریق ارسال داده‌های آموزشی معلوم انجام می‌شود. در اکثر موارد استفاده از تخمین کانال با داده‌های آموزشی فرض بر این می‌باشد که شرایط کانال در حین ارسال داده‌های آموزشی تغییر نکند، یعنی این که کانال در طول هر بلوک داده‌ی ارسالی تقریباً ثابت است. در عمل کانال‌هایMIMO، با استفاده از رشته‌ی آموزشی موجود در ابتدای بلوک، تخمین زده می‌شوند. شیوه‌های تخمین کانال مبتنی بر آموزش مذکور در گیرنده، برای کانال‌های با محو شوندگی شبه ایستا و یا کانال‌های با تغییرات کُند مناسب است. در کانال‌های با تغییرات تُند، داده‌های آموزشی را در طول هر بلوک داده ارسالی پخش می‌کنند[۹]. یک روش مفید، استفاده از مدل بسط‌پایه در این نوع کانال‌هاست [۱۰]. به طور مثال، در این روش کانال انتخاب زمانی- انتخاب فرکانسی به کانال انتخاب فرکانسی تبدیل می‌شود.

تخمین کانال به روش‌های کور، از اطلاعات نهفته در خواص آماری سیگنال دریافتی در گیرنده استفاده می‌کنند و داده آموزشی به کار نمی‌رود. تخمین کور کانال معمولاً با استفاده از آمارگان مرتبه‌ی دوم و یا بالاتر داده‌های دریافتی در گیرنده انجام می‌شود. در برخی کار از تخمین کور کانال بر اساس الگوریتم ML[1] نیز انجام می‌شود.

[1] Maximum Likelihood

در حالت کلی، روش‌های تخمین کور کانال شامل روش‌های آماری و یقینی می‌باشد که هر کدام نیز به روش‌های ممان و ML قابل تقسیم هستند. یکی از روش‌های تخمین کور کانال، فرض الفبای محدود منبع داده‌ها در فرستنده است. اما اگر تعداد الفبا زیاد باشد، این روش درگیر پیچیدگی محاسباتی بالایی می‌شود. روش دیگر تخمین کور کانال، استفاده از منابع رنگی است که بر اساس آمارگان مرتبه‌ی دوم داده‌های دریافتی انجام شده و فرض می‌شود آمارگان مرتبه‌ی دوم منابع سیگنال ارسالی معلوم باشد. یک روش دیگر، استفاده از داده‌های دریافتی گیرنده به صورت فرآیند تصادفی ایستای دوره‌ای است. بدین منظور در کارهای انجام شده از شیوه‌های پیش کد مانند پیش کد افزونه و پیش کد متناوب غیر افزونه استفاده شده است.

شیوه‌ی تخمین کور کانال به کمک آمارگان مرتبه‌ی دوم سیگنال دریافتی در مراجع مختلفی به کار رفته است. الگوریتم‌های SOS[1]، درگیر محاسبه‌ی آمارگان بلوک‌های دریافتی شده و همگرایی خیلی آهسته‌تری دارند. از طرفی برای کانال‌های TV (محو شوندگی تُند) لازم است تخمین کانال طی بلوک‌های دریافتی کمی صورت گیرد، زیرا دنبال نمودن کانال طی بلوک‌های دریافتی زیاد میسر نیست. علاوه بر این، در تخمین کور کانال معمولاً ابهاماتی در حد یک عدد، یک بردار و یا یک ماتریس به وجود می‌آید که بایستی با شیوه‌های مشخصی رفع شود. یکی از روش‌های رفع ابهام، استفاده از سیگنال‌های آموزشی است که به روش نیمه کور معروف است. روش دیگر تعیین ماتریس(یا بردار یا عدد) مبهم بر اساس حداقل نمودن یک تابع هزینه مانند MSE[2] است و شیوه‌ی دیگر به‌کارگیری آمارگان مرتبه بالاتر سیگنال دریافتی برای تخمین کانال است. زیرا در این الگوریتم‌ها معمولاً ابهام وجود ندارد . اما الگوریتم‌های آماری مراتب بالاتر نیاز به ثبت داده‌های طولانی داشته و پیچیدگی بیشتری دارند . شیوه‌ی دیگر در تخمین کور کانال، بهره‌گیری از الگوریتم‌های ML است که شامل DML[3] (با فرض نمادهای یقینی) و SML[4] (با فرض نمادهای تصادفی) هستند. مثلاً یکی از الگوریتم‌های ML که با فرض نمادهای گوسی توصیف می‌شود معروف به GML[5] است .

دسته‌ی سوم، روش‌هایی هستند که در آن‌ها تخمین کانال به کمک رشته‌های آموزشی و اطلاعات صورت می‌گیرد و حضور اطلاعات موجب می‌شود که از به‌کارگیری رشته‌های آموزشی طولانی و هدر رفتن پهنای باند اجتناب شود. یکی از شیوه‌های تخمین کانال که پهنای باند را هدر نمی‌دهد، به‌کارگیری رشته‌های آموزشی افزوده‌ی متناوب است. در این روش، رشته‌های آموزشی در هر موقعیت با داده‌ها جمع می‌شوند و لذا زمان یا فرکانس خاصی را به خود اختصاص نمی‌دهند. اشکال عمده‌ی این شیوه در آشکار سازی داده‌هاست، زیرا در گیرنده جدا نمودن رشته‌های آموزشی از داده‌ها معمولاً کار سختی است. در این روش‌ها از یک الگوریتم تکراری استفاده می‌شود و در آن تخمین کانال و آشکار سازی داده به طور توأم انجام می‌شوند. در الگوریتم‌های مذکور، معمولاً

[1] Second Order Statistics
[2] Mean Square Error
[3] Deterministic Maximum Likelihood
[4] Stochastic Maximum Likelihood
[5] Gaussian Maximum Likelihood

آمارگان مرتبه‌ی اول داده‌ی دریافتی نیز استفاده می‌شود. نسبت به روش‌های آموزشی مرسوم، عملکرد این الگوریتم‌ها کمی پایین می‌آید. همچنین پیچیدگی با رشته‌های آموزشی افزوده زیاد است و تأخیر در پردازش آن چند برابر روش‌های آموزش مرسوم است. در کانال‌های تغییرپذیر با زمان، عملکرد این الگوریتم نسبت به رشته‌های آموزشی مرسوم (در SNR پایین) بهتر می‌شود.

برخی از الگوریتم‌های نیمه کور در طرفین سیگنال‌های آموزشی با طول کوتاه، داده‌هایی نیز قرار داده و به روشی مانند تکنیک توربو عمل می‌کنند. تخمین کانال اولیه به کمک سیگنال‌های آموزشی کوتاه و داده‌ها انجام می‌شود، سپس از کانال تخمین زده شده، برای آشکارسازی داده‌ها استفاده می‌شود. با داده‌های آشکارسازی شده و همان سیگنال آموزشی کوتاه، مجدداً تخمین کانال صورت می‌گیرد و این روش تکراری تا رسیدن به یک دقت مناسب ادامه می‌یابد . پیچیدگی محاسبات در الگوریتم مذکور با تعداد آنتن‌های فرستنده رابطه‌ی نمایی دارد، لذا برای حصول پیچیدگی کمتر، روش آشکار سازی مذکور هنوز خیلی مناسب نیست. الگوریتم‌های نیمه کور دیگری که عملکرد بهتری نشان می‌دهند دارای پیچیدگی بیشتری هستند. علاوه براین همگرایی روش‌های کور و نیمه کور نیز مسئله‌ی دیگری است که گاهی ممکن است ایجاد مشکل کند.

به دلیل پیچیدگی پایین و عملکرد بهتر، روش تخمین کانال مبتنی بر آموزش در کانال‌های با محو شوندگی کُند یا شبه ایستا مثلاً کانال‌های MIMO داخل ساختمان استفاده می‌شوند. اما در کانال‌های MIMO خارج ساختمان که کانال معمولاً دارای محو شوندگی تُند است، از الگوریتم‌های وفقی با فیلترهایی مانند LMS[1]، فیلتر کالمن، RLS[2]و... استفاده می‌شود. روش تخمین کانال مبتنی بر آموزش می‌تواند در ناحیه‌ی SNR بالا بهینه باشد.

۲-۳- محوشوندگی

کانال‌های مخابراتی بی‌سیم اثرات مخرب زیادی بر روی سیگنال دارند. این عوامل می‌توانند ناشی از حضور پراکنده‌گرهای[3] باشد و یا به دلیل حرکت کاربر یا پراکنده‌گرها ایجاد شود . در سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم، سیگنال ارسالی توسط فرستنده، به دلیل برخورد با اجسام مختلف، از چند مسیر به گیرنده می‌رسند . این پدیده را انتشار چندمسیرگی[4] می‌گویند . به علت تغییرات کانال در زمان، پدیده چندمسیرگی در طول زمان تغییر می‌کند. این آثار موجب نوسانات دامنه، فاز یا زاویه‌ی ورود سیگنال دریافتی می‌شوند .

به دلیل وجود پراکنده‌گرها که در مکان‌های تصادفی وجود دارند، سیگنال دریافتی از مسیرهای مختلف با طول‌های متفاوت به گیرنده می‌رسد در نتیجه سیگنال در طول زمان دچار کشیدگی می‌شود که به این پدیده گسترش تأخیر[5] می‌گویند. بنابراین یکی از مشخصه‌های محیط‌های چندمسیرگی، گستردگی زمانی[1] سیگنال است .

---

[1] Least Mean Square
[2] Recursive Least Square
[3] Scatterer
[4] Multi-path
[5] Delay Spread

مسیرهای مختلف انتشار تأخیرهای متفاوتی دارند، در نتیجه سیگنال سینوسی ارسالی به صورت یک شکل موج پهن شده در زمان دریافت می‌گردد. سیگنال‌های چندمسیرگی می‌توانند با یکدیگر تداخل سازنده یا مخرب داشته باشند. در حالتی که تداخل ویرانگر رخ می‌دهد، توان سیگنال می‌تواند به میزان قابل‌توجهی کاسته شود. این پدیده محو شوندگی[۲] نامیده می‌شود.

در صورت تداخل مخرب شدید، می‌گوییم کانال در محو شوندگی عمیق قرار دارد و ممکن است در نهایت به قطع موقت ارتباط به عنوان نتیجه‌ی افت شدید در نسبت سیگنال به نویز(SNR[۳]) منجر شود. در واقع، دو نوع محو شوندگی در کانال‌های ارتباطی بی‌سیم وجود دارد که شامل محو شوندگی در مقیاس بزرگ و محو شوندگی در مقیاس کوچک می‌باشند. محو شوندگی در مقیاس بزرگ مربوط به تضعیف توان متوسط سیگنال یا اتلاف توان در حالت حرکت در نواحی بزرگ است. محو شوندگی در مقیاس کوچک حاصل از تغییرات چشمگیر در دامنه و فاز سیگنال ارسالی است، که این نیز عمدتا می‌تواند ناشی از تغییرات اندک در فاصله‌ی فضایی بین گیرنده و فرستنده باشد. اگر در محو شوندگی مقیاس کوچک، هیچ خط دید مستقیمی از فرستنده به گیرنده نداشته باشیم، این محو شوندگی، محو شوندگی ریلی[۴] نامیده می‌شود زیرا پوش سیگنال دریافتی را می‌توان با تابع چگالی احتمال (pdf[۵]) ریلی توصیف کرد.

۲-۴- سیستم‌های MIMO

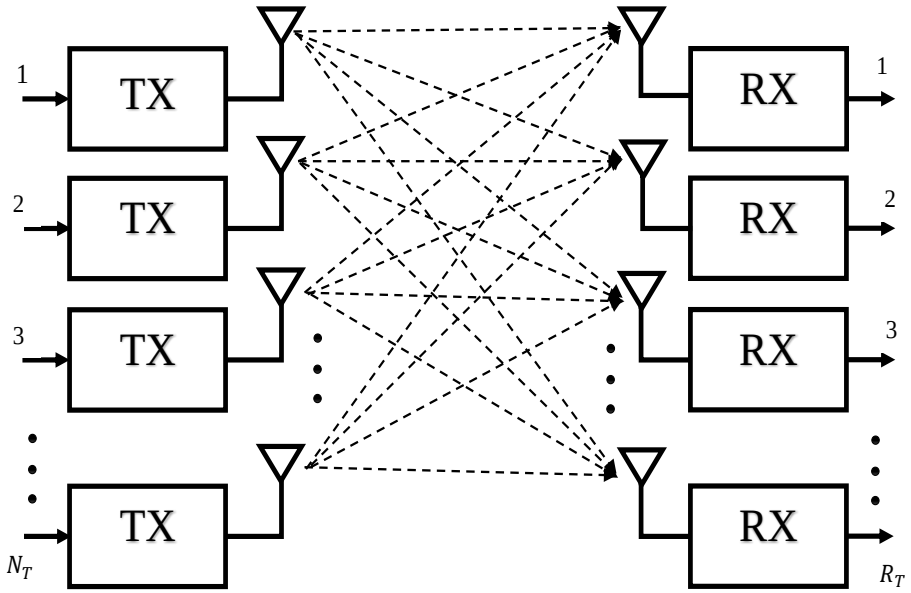
مطابق شکل (۲-۴) سیستمی که در فرستنده و گیرنده‌ی آن از چند آنتن استفاده شود، MIMO نامیده می‌شود . با توجه به کمیاب بودن طیف و شرایط مخرب ناشی از پدیده‌ی چندمسیرگی و تداخل با کاربران دیگر، دستیابی به نرخ داده‌ی بالا همراه با کیفیت سرویس‌دهی مناسب مشکل است. به‌کارگیری چند آنتن در هر دو سوی ارتباط MIMO، یک بهره‌ی اضافی یعنی بهره‌ی تسهیم فضایی ارائه می‌دهد و در نتیجه کارآیی طیفی افزایش می‌یابد. تسهیم فضایی موجب می‌شود که در مقایسه با سیستمی شامل یک آنتن در یک سو و یا در هر دو سوی ارتباط، ظرفیت به صورت خطی (بر حسب حداقل تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده) افزایش یابد و آن بدون مصرف توان و یا پهنای باند اضافی حاصل می‌شود.

در مقایسه با سیستم‌های مخابراتی SISO، سیستم‌های MIMO، به دلیل ارائه‌ی ظرفیت بالاتر و بهبود قابل‌توجه کارآیی، در سال‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. وقتی که ماتریس کانال دارای رتبه‌ی کامل و دانش محو شوندگی کانال در دسترس باشد، بهره‌ی چندگانگی فضایی در این کانال‌ها برابر با حاصل‌ضرب تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده می‌شود. اگر CSI فقط در گیرنده به طور کامل معلوم باشد، ظرفیت کانال

---

[1] Time Spreading
[2] Fading
[3] Signal to Noise Ratio
[4] Rayleigh
[5] Probability Density Functions

MIMO با محو شوندگی تخت رایلی، تقریبا با حداقل تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده، به طور خطی افزایش می‌یابد. در کانال‌های MIMO به منظور افزایش نرخ داده از بهره‌ی تسهیم فضایی بهره‌برداری می‌شود و به منظور افزایش اعتماد پذیری ارتباط (کاهش نرخ خطا) از بهره‌ی چندگانگی آن استفاده می‌شود .



شکل ۲-۲: یک سیستم MIMO

۲-۴-۱- محو شوندگی در کانال‌های MIMO

مشکلات موجود در کانال‌های SISO و نیز دسته‌بندی کانال‌ها بر اساس نوع محو شوندگی، در کانال‌های MISO، SIMO، MIMO نیز صادق است. علاوه بر آن، در کانال‌های MIMO، سیگنال ارسالی از هر آنتن فرستنده توسط تمام آنتن‌های گیرنده دریافت می‌شود (تداخل متقابل ناشی از آنتن‌های فرستنده‌ی مختلف). در واقع یک سیستم MIMO با تعداد M_t آنتن فرستنده و M_r آنتن گیرنده معادل با تعداد M_tM_r کانال SISO است که بین هر جفت آنتن فرستنده و گیرنده می‌توان تصور کرد. سیگنال ارسالی توسط هر آنتن فرستنده از طریق تعداد M_r کانال مختلف عبور کرده و توسط تعداد M_r آنتن در گیرنده دریافت می‌شود. این کانال‌ها مستقل از هم نبوده و در نتیجه آشکار سازی سیگنال‌های مجزای ارسالی از آنتن‌های فرستنده‌ی مختلف در گیرنده راحت نیست. در عمل، با ارسال سیگنال‌های آموزشی توسط فرستنده، این کانال‌ها تخمین زده شده و در نتیجه عمل آشکارسازی بعد از تخمین کانال راحت‌تر خواهد شد.

در مدل‌سازی یک کانال SISO با محو شوندگی تخت می‌توان آن را توسط ضریب h توصیف نمود که به صورت یک متغیر تصادفی مختلط دارای توزیع گوسی با متوسط و واریانس مشخص است. اگر متوسط h صفر فرض شود، دامنه‌ی آن دارای توزیع رایلی است و اگر متوسط h مخالف با صفر فرض شود، دامنه‌ی آن دارای توزیع رایسی است. در صورتی که محو شوندگی کانال به صورت انتخاب فرکانسی باشد، بردار $h = [h_0, h_1, \ldots, h_{L-1}]$ به طول L، کانال را توصیف می‌کند. در واقع کانال به صورت فیلتر FIR با طول پاسخ ضربه‌ی L تصور می‌شود و

$h_0, h_1, \ldots, h_{L-1}$ ضریب‌های این فیلتر هستند که هر کدام دارای توزیع گوسی مختلط با متوسط و واریانس مشخص فرض می‌شوند.

در کانال‌های MIMO هر یک از زیر کانال‌ها (بین یک جفت آنتن فرستنده و گیرنده) به طور جداگانه توصیف می‌شوند. برای توصیف یک کانال MIMO با تعداد M_t آنتن فرستنده و M_r آنتن گیرنده که دارای محو شوندگی تخت است، ماتریس **H** (با ابعاد $M_r \times M_t$) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1M_t} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2M_t} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ h_{M_r1} & h_{M_r2} & \cdots & h_{M_rM_t} \end{bmatrix} \qquad (۱-۲)$$

عنصر h_{ij}، زیر کانال بین i اُمین آنتن گیرنده و j اُمین آنتن فرستنده را توصیف می‌کند. در تخمین کانال بسته به نوع تخمین‌گر مورد استفاده، عناصر ماتریس مذکور ممکن است به صورت یقینی مجهول و یا تصادفی گوسی مختلط فرض شوند. در کانال‌های دارای محو شوندگی انتخاب فرکانسی تعداد ستون‌های این ماتریس با ضریب L افزایش می‌یابد؛ زیرا هر زیر کانال با تعداد L عنصر توصیف می‌شود. در کانال‌های با محو شوندگی کند[1] این ضرایب در طول یک بلوک ارسالی ثابت بوده و ممکن است بین بلوک‌های متوالی تغییر کنند. در کانال‌های دارای محو شوندگی تُند، تغییرات ضرایب مذکور سریع‌تر خواهد بود.

۲-۵- تسهیم تقسیم فرکانسی متعامد (OFDM)

خصوصیت اصلی که برای سیستم‌های مخابراتی نسل آینده در نظر گرفته شده است، دستیابی به نرخ ارسال بالا می‌باشد. اما به دلیل غیر قابل پیش بینی بودن کانال، دستیابی به این امر بسیار مشکل خواهد بود. در چند سال اخیر به منظور مقابله با شرایط بد کانال و افزایش نرخ ارسال ایده‌ی چند حاملگی در ارسال مورد توجه فراوان قرار گرفته است. تسهیم تقسیم فرکانسی متعامد (OFDM)[2] یک حالت خاص از چند حاملگی در ارسال می‌باشدکه در آن زیر حامل‌ها بر هم عمود هستند. تکنولوژی OFDM می‌تواند با دقت بالا و پیچیدگی کم نرخ ارسال را به طور قابل توجهی افزایش دهد.

در نرخ‌های ارسال بالا تخریب داده توسط کانال بسیار مهم است و بازیابی داده ارسال شده توسط گیرنده‌های ساده غیر ممکن خواهد بود. استفاده از گیرنده‌های با ساختارهای پیچیده نیازمند همسان سازها و الگوریتم-های تخمین کانال با محاسبات سنگین به منظور تخمین صحیح کانال می‌باشد. این اطلاعات برای به دست آوردن داده‌های ارسالی در گیرنده مورد استفاده قرار می‌گیرد. تکنولوژی OFDM با ایده‌ای کاملا ساده کانال انتخابگر-فرکانسی[3] را به کانال صاف[1] تبدیل می‌کند و از این طریق مشکل همسان سازی را حل می‌نماید. بنابراین با داشتن یک همسان ساز ساده می‌توان داده‌ی ارسالی را بازیابی نمود.

---

[1] Slow fading

[2] Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

[3] Frequency- Selective Channel

هرچند OFDM در سال‌های اخیر مورد توجه صنعت قرار گرفته شده است اما دارای تاریخچه‌ی طولانی می-باشد. در جنگ جهانی دوم ایالات متحده آمریکا در سیستم‌های نظامی فرکانس بالا از تکنولوژی OFDM استفاده نموده است. انتشار صوت دیجیتال (DAB)[۲] اولین سیستم تجاری بود که از تکنولوژی OFDM استفاده نموده است. در سال ۱۹۸۷ ، DAB گسترش بیشتری پیدا کرد و در سال ۱۹۹۴ به صورت یک استاندارد فرمول نویسی شد و در سال ۱۹۹۵ در دو کشور انگلستان و سوئد به صورت واقعی و عملی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین تحقیقات در انتشار ویدئو دیجیتال (DVB)[۳] در سال ۱۹۹۳ آغاز شد و در سال ۱۹۹۵ در تلویزیون با مشخصات بالا (HDTV)[۴] مورد استفاده قرار گرفت. همچنین در حداقل ۲۰ کشور، در لایه‌ی فیزیکی چندین استاندارد (WLAN)[۵]، از تکنولوژی OFDM استفاده شده است. به احتمال خیلی زیاد در سیستم‌های نسل چهار مانند IMT-A که در آینده معرفی می‌شود نیز استفاده می‌شود.

۲-۵-۱- مزیت استفاده از سیستم چند حامله

تفرق زمانی۶ به صورت گسترش سمبل‌های مدولاسیون در زمان بر روی سمبل‌های ارسالی تاثیر می‌گذارد که به آن گسترش تاخیر۷ گویند. این پدیده را تداخل بین سمبل (ISI)۸ گویند. تفرق زمانی با توجه به رابطه‌ی معکوس بین زمان گسترش تاخیر و پهنای باند همدوسی۹ در فرکانس، می‌تواند در فرکانس نیز تاثیر گذار باشد (بالا بودن گسترش تاخیر بیان کننده کم بودن پهنای باند همدوسی کانال بوده و در نتیجه بالا بودن انتخابگر بودن کانال است). برای ارتباط‌های چند رسانه‌ای باند گسترده، باند همدوسی کانال همیشه کوچکتر از باند مدولاسیون است. در این شرایط انتخابگر بودن فرکانسی حتما اتفاق می‌افتد و یک الگوی تصادفی را در زمان به وجود می‌آورد. وقتی که کانال باعث تفرق زمانی می‌شود و گسترش تاخیر از طول سمبل بزرگتر می‌شود، این محو شوندگی ایجاد می‌شود. اگر تفرق زمانی وجود نداشته باشد و گسترش تاخیر از دوره‌ی سمبل کوچکتر باشد، محو شوندگی صاف بوده و بنابراین تاثیر آن در کل فرکانس ثابت می‌باشد. در حالت عملی محو شوندگی صاف به راحتی تخمین زده می‌شود و توسط یک همسان سازی ساده جبران می‌شود.

همان طور که گفته شد در یک سیستم تک حامله با افزایش نرخ ارسال به دلیل $\delta_{max} > T_{sym}$، مشکل ISI به وجود می‌آید. اما انتقال در چند کانال این مشکل را حل می‌کند. ایده‌ی اصلی به این صورت است که با افزایش

---

[1] Flat Channel
[2] Digital Audio Broadcasting
[3] Digital Video Broadcasting
[4] High-Definition Television
[5] Wireless Local Area Network
[6] Time Dispersion
[7] Delay Spread
[8] Inter Symbol Interference
[9] Coherence Bandwith