دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

توصیف کانال‌های انتشار بی‌سیم ناهمسانگرد چند ورودی- چند خروجی (MIMO)

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات سیستم

علی رفیعی

اساتید راهنما

دکتر علی‌محمد دوست حسینی

دکتر ابوالقاسم زیدآبادی نژاد

۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

توصیف کانال‌های انتشار بی‌سیم ناهمسانگرد چند ورودی- چند خروجی (MIMO)

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات سیستم

علی رفیعی

اساتید راهنما

دکتر علی‌محمد دوست حسینی

دکتر ابوالقاسم زیدآبادی نژاد

۱۳۹۱

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق – مخابرات سیستم آقای علی رفیعی

تحت عنوان

توصیف کانال‌های انتشار بی‌سیم ناهمسانگرد چند ورودی – چند خروجی (MIMO)

در تاریخ ۹۱/۱۲/۲۷ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای اول پایان‌نامه — دکتر علی‌محمد دوست حسینی

۲- استاد راهنمای دوم پایان‌نامه — دکتر ابوالقاسم زیدآبادی نژاد

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده — دکتر مسعود عمومی

بر خود لازم می‌دانم که از توجه، راهنمایی و تشویق دوستانه و عالمانه استادان راهنمایم در این پایان‌نامه دکتر علی‌محمد دوست حسینی و دکتر ابوالقاسم زیدآبادی نژاد سپاسگزاری کنم.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به:

مادر و پدر عزیزم،

و...

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مروری بر کانال‌های بی‌سیم ۳

۱-۲ مبانی مخابرات بی‌سیم ۵

۱-۳ سیستم‌های MIMO ۶

۱-۴ مدل کردن کانال MIMO ۷

۱-۴-۱ مدل‌های کانال MIMO-CCF ۹

۱-۴-۲ برخی مدل‌های دیگر کانال‌های MIMO ۱۱

۱-۵ مفاهیم موجود در کانال‌های بی‌سیم ۱۲

۱-۶ انگیزه و بیان مسئله ۱۶

۱-۷ نگاه کلی به پایان‌نامه و کارهای انجام‌شده ۱۷

فصل دوم: مروری بر مدل‌های کانال MIMO

۲-۱ مقدمه ۲۰

۲-۲ مدل‌های کانال MIMO ۲۰

۲-۲-۱ مدل‌های کانال فیزیکی ۲۱

۲-۲-۲ مدل‌های کانال تحلیلی ۳۵

۲-۳ برخی از مدل‌های کانال MIMO محیط باز ۴۱

۲-۳-۱ مدل‌هایی با رویکرد پیشنهادی برای CCF ۴۱

۲-۳-۲ مدل‌هایی با رویکرد عملی- صنعتی ۴۴

۲-۳-۳ دیگر مدل‌های MIMO در محیط باز ۴۵

۲-۴ نتیجه‌گیری ۴۶

فصل سوم: توصیف کانال بی‌سیم MIMO

۳-۱ مقدمه ۴۷

۳-۲ معرفی تابع چگالی احتمال وون‌مایسس ۴۹

۳-۳ محیط انتشار ناهمسانگرد MIMO همراه با آنتن‌های جهت‌دار ۵۳

۳-۳-۱ تأخیر و بهره مسیر ۵۶

۳-۳-۲ پراکندگی محیط و آنتن‌ها ۵۷

۳-۴ تابع همبستگی متقابل فضا- زمان- فرکانس ۶۴

۳-۵ نتیجه‌گیری ۷۳

فصل چهارم: بررسی کانال MIMO

۴-۱ مقدمه ۷۵
۴-۲ بررسی جزئیات CCF ۷۶
۴-۳ بررسی CCF در حالت ایستان ۷۸
۴-۴ نتیجه‌گیری ۸۵

فصل پنجم: نتیجه‌گیری

۵-۱ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۸۶
۵-۲ پیشنهادات ۸۸

پیوست‌ها

پیوست ۱- اختصارات ۸۹
پیوست ۲- واژه‌نامه فارسی به انگلیسی ۹۱
مراجع ۹۵

چکیده

در سال‌های اخیر، افزایش تقاضا برای نرخ داده بالا و محدودیت در پهنای‌باند قابل دسترس، محققین را به بررسی و تحقیق درباره‌ی سیستم‌های بی‌سیم که به صورت مؤثر و کارآمد از فضا بهره‌برداری می‌کنند، سوق داده است. رویداد قابل توجه در مخابرات بی‌سیم که بسیار کارآمد نیز هست، به کار بردن آنتن‌های چندگانه در فرستنده و گیرنده می‌باشد. این رویکرد به سیستم‌های مخابراتی چند ورودی- چند خروجی (MIMO) انجامیده است. کاربرد آنتن‌های آرایه‌ای برای سیستم‌های سلولی بی‌سیم مورد توجه زیادی قرار گرفته است، زیرا از طریق مقابله با پدیده‌های محوشدگی و تداخل، پوشش و ظرفیت چنین سیستم‌هایی را بهبود می‌بخشند. همچنین با به کارگیری آنتن‌های آرایه‌ای در فرستنده و گیرنده، ظرفیت کانال‌های بی‌سیم به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. به منظور طراحی سیستم‌های بی‌سیم چند ورودی- چند خروجی (MIMO) با کارایی بالا و پیش‌بینی تأثیر انتشار چندمسیری تصادفی بر محوشدگی، داشتن مدل‌های دقیق و معتبر برای کانال MIMO ضروری است. در این پایان‌نامه یک تابع همبستگی متقابل بین توابع انتقال زمان- فرکانس- فضا برای دو زیرکانال محیط انتشار باز ناهمسانگرد همراه با آنتن‌های جهت‌دار با فرض موج صفحه‌ای، در حالی که گیرنده با سرعت ثابت در حرکت است، به دست آمده است. بیشتر مدل‌های کانال‌های MIMO برای توصیف انتشار ناهمسانگرد، از یک فضای هندسی مشخص برای پراکنده‌سازها در اطراف گیرنده استفاده نموده‌اند. اما در این پژوهش، با رویکرد آماری- تحلیلی و استفاده از یک توزیع مناسب موسوم به وون‌مایسس برای توصیف انتشار ناهمسانگرد به توصیف و شبیه‌سازی کانال پرداخته شده است و تابع همبستگی متقابل (CCF) که به فرم بسته و با سهولت به کارگیری ارائه شده است، تابعی از چندین پارامتر محیط انتشار و آنتن‌های آرایه‌ای می‌باشد. این تابع همبستگی متقابل از مجموع دو جمله تشکیل شده است که هر دو جمله تأثیر کانال بی‌سیم را در اطراف فرستنده، گیرنده و در طول کانال بر حسب زمان، فرکانس حامل و موقعیت عناصر آنتن آرایه‌ای نشان می‌دهند. به منظور بررسی توصیف مزبور و مشاهده تأثیرات محیط انتشار، آنتن‌های بکار رفته و حرکت گیرنده روی CCF ، در حوزه فرکانس تابع چگالی طیف توان کانال در حالت ایستان محاسبه شده و شبیه‌سازی شده است.

کلمات کلیدی: ۱- مدل‌های کانال MIMO ۲- تابع همبستگی متقابل (CCF) ۳- آنتن آرایه‌ای جهت‌دار ۴- تابع چگالی طیف توان ۵- تابع توزیع وون‌مایسس

فصل اول
مقدمه

یک سیستم مخابراتی دیجیتال از سه جزء اصلی فرستنده، کانال و گیرنده تشکیل شده است. از آنجا که هدف در این پایان‌نامه، توصیف و بررسی کانال می‌باشد، ابتدا مختصری از ساختار فرستنده و گیرنده بیان می‌کنیم و سپس به بحث اصلی خود یعنی کانال می‌پردازیم. به طورکلی ساختار فرستنده دیجیتال از چهار بلوک اصلی تشکیل می‌شود که عبارتند از:

- بلوک منبع: در این بلوک سمبل‌ها که به صورت قطاری از صفر و یک هستند، تولید می‌شوند.
- بلوک کدگذار منبع: این بلوک با حذف افزونگی‌های[1] موجود در دنباله‌ی سمبل‌های تولیدشده در بلوک منبع، تعداد صفر و یک‌های دنباله را کاهش می‌دهد.
- بلوک کدگذار کانال: به منظور مقابله با آثار تخریبی کانال، در این بلوک افزونگی‌های متناسب با آثار کانال به خروجی کدگذار منبع اضافه می‌شود. از اینرو در این مرحله تعداد صفر و یک‌ها افزایش یافته و در نتیجه نرخ ارسال اطلاعات کاهش می‌یابد.
- مدولاتور: در این بلوک بر حسب کیفیت کانال و عملکرد مورد نظر، سیگنال پیوسته- زمان مناسبی به دنباله‌ی ارقام خروجی کدگذار کانال نسبت داده می‌شود و این سیگنال آماده‌ی عبور از کانال مخابراتی به وسیله‌ی آنتن فرستنده می‌شود. این سیگنال بعد از عبور از کانال و تغییرات احتمالی کانال روی آن، به گیرنده می‌رسد.

---

[1] Redundancy

در گیرنده دیجیتال، این اعمال چهارگانه به صورت عکس روی سیگنال دریافتی انجام می‌شود و در پایان داده ارسالی تخمین زده می‌شود. در ادامه این فصل، به بررسی کانال‌های بی‌سیم و مفاهیم موجود در آن‌ها در بخش‌های جداگانه می‌پردازیم.

برای سهولت در مطالعه این پایان‌نامه، در انتهای آن تمام اختصارات به کاررفته و واژه‌نامه فارسی به انگلیسی به ترتیب در پیوست‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

۱-۱ مروری بر کانال‌های بی‌سیم

همانطور که بیان شد در فرستنده با یک سری داده‌ها با تنوع محدود سروکار داریم، که برای ارسال آن‌ها در عمل ابتدا به هر یک از این داده‌ها یک شکل موج پیوسته- زمان نسبت داده شده و این شکل موج‌ها ارسال می‌شوند. برای بررسی تحلیلی این ارسال، مجموعه‌ی محدود سیگنال‌های ارسالی را برحسب یک سری توابع پایه می‌نویسند که به آن نمایش فضای سیگنال اطلاق می‌شود. پس در این فضا به هر سیگنال به عنوان یک نقطه نگاه می‌شود. روشن است که بسته به تعداد داده‌های ورودی و نوع مدولاسیون به کاررفته، این نقاط می‌توانند نسبت به هم وضعیت‌های مختلفی در فضا پیدا کنند. به وضعیت و چیدمان این نقاط نسبت به هم در فضای سیگنال، تشکل[1] گفته می‌شود.

هنگامی که یک سیگنالینگ در یک تشکل از یک کانال غیرایده‌ال عبور می‌کند، کانال علاوه بر جمع کردن نویز با سیگنال ارسالی، ممکن است موجب تغییرات گوناگونی روی آن نیز شود. مثلاً ممکن است تضعیف رخ دهد که رفتاری خطی است و یا کانال رفتارهای غیرخطی از خود نشان دهد که این رفتارها معادل چرخش و برهم زدن چیدمان نقاط در تشکل و به عبارتی ایجاد اعوجاج[2] در کانال می‌باشند. اگر در کانال مخابراتی تنها نویز جمع‌شونده[3] وجود داشته باشد تأثیر آن به این صورت است که مثلاً اگر به دفعات زیاد یک سیگنال که معادل یک نقطه در تشکل است ارسال شود، می‌توان تصور کرد که در گیرنده در اطراف هر نقطه تعداد زیادی نقطه دریافت می‌شوند که مانند این است که ابری اطراف هر نقطه در تشکل را احاطه کرده باشد. بسته به توان و واریانس نویز، این ابر می‌تواند بزرگ و یا کوچک باشد ولی تغییرات دیگر رخ نمی‌دهد. اما در عمل علاوه بر این حالت، حالت دیگری نیز وجود دارد و آن تغییر تصادفی و ناشناخته‌ی نقاط در تشکل است.

در کانال بی‌سیم علاوه بر وجود نویز جمع‌شونده که در صورت بالا بودن نسبت سیگنال به نویز[4] (SNR) در گیرنده می‌توان به آشکارسازی نسبتاً دقیقی از داده ارسالی دست یافت، دو مشکل اساسی دیگر نیز وجود دارد: مشکل اول، پدیده‌ی چندمسیری[5] و دیگری اثر داپلر[6] است. پدیده‌ی چندمسیری این گونه رخ می‌دهد که سیگنال ارسالی از فرستنده در حین عبور ازکانال با برخورد به موانع مختلف مانند دیوار، درختان و غیره چند شعاعی شده و به گیرنده می‌رسد. به عبارتی، در گیرنده به جای دریافت یک سیگنال ارسالی، چندین سیگنال دریافت می‌شود که می‌توان گفت

---

1 Constellation
2 Distortion
3 Additive noise
4 Signal to Noise Ratio
5 Multipath
6 Doppler effect

این چندین سیگنال، نسخه‌های شیفت‌یافته‌ی سیگنال ارسالی هستند. حرکت آنتن‌های گیرنده و فرستنده نسبت به هم و یا عبور اجسام متحرک مانند کامیون مابین آنها، باعث به وجود آمدن پدیده‌ی داپلر می‌شود. بررسی این دو پدیده هم در حوزه‌ی زمان و هم در حوزه‌ی فرکانس میسّر می‌باشد. پدیده‌ی چندمسیری در حوزه‌ی زمان منجر به تداخل بین سمبلی[۱] یا ISI می‌شود و در حوزه‌ی فرکانس، کانال را فرکانس انتخابگر[۲] می‌کند یعنی همانطور که از نام آن بر می‌آید، رفتار کانال مخابراتی در فرکانس‌های مختلف، متفاوت است. اثر داپلر نیز در حوزه‌ی زمان کانال را زمان انتخابی[۳] می‌کند، یعنی آنکه کانال در بعضی از زمان‌ها سیگنال را خوب عبور داده و در برخی دیگر از زمان‌ها عبور سیگنال با کیفیت مطلوب صورت نمی‌گیرد. در حوزه‌ی فرکانس این پدیده منجر به گستره‌ی داپلر[۴] یا تداخل بین حاملی[۵] (ICI) می‌شود. بروز اینگونه پدیده‌ها باعث فاصله گرفتن کانال مخابراتی از کانال ایده‌ال می‌شوند و در نتیجه کانال در حین عبور سیگنال، از خود رفتار غیرخطی نشان می‌دهد.

در گیرنده برای آشکارسازی درست سیگنال ارسالی لازم است که به نحوی تغییرات کانال جبران شود. این کار در گیرنده توسط بلوکی به نام همسان‌ساز[۶] صورت می‌گیرد. پس با فرض شناخته شدن تبدیلی که کانال روی سیگنال ارسالی اعمال می‌کند، همسان‌ساز با انجام دادن تبدیل معکوس، تأثیر کانال را جبران می‌کند. از دو دید، کار همسان‌ساز قابل بررسی است: دید زمانی و دید فرکانسی. از دیدگاه اول، باید بیان کرد پاسخ کانال در حوزه زمان با تغییرات پیش‌گفته از حالت ایده‌ال که یک ضربه است خارج شده، بلکه به صورت ترکیب خطی از چندین ضربه شیفت‌یافته در می‌آید. همسان‌ساز با شناخت این پاسخ ضربه از خود پاسخ ضربه‌ای نشان می‌دهد که ترکیب آن دو، یک تابع ضربه (در عمل نزدیک تابع ضربه) شود. از دید فرکانسی وجود چندین ضربه در پاسخ ضربه کانال، معادل با ثابت نبودن و اعوجاجی شدن پاسخ فرکانسی آن است (کانال فرکانس انتخابگر). کار بلوک همسان‌ساز از این دید، صاف کردن پاسخ فرکانسی ترکیب کانال و همسان‌ساز است. حال سوالی که مطرح می‌شود این است که از کجا به رفتار کانال و یا به عبارتی پاسخ ضربه کانال پی ببریم؟ روشن است که قدم اول برای همسان‌سازی، شناخت کانال (پاسخ ضربه یا پاسخ فرکانسی) می‌باشد. این کار از طریق تخمین[۷] زدن کانال مخابراتی به روش‌های مختلف صورت می‌گیرد. پس در گیرنده ابتدا کانال تخمین زده می‌شود و سپس اطلاعات حاصل به همسان‌ساز داده می‌شود.

معمولاً برای تخمین کانال از مدل‌های از پیش تعیین‌شده که به صورت بلوک دیاگرام هستند، استفاده می‌شود. بدین صورت که این مدل‌ها دارای پارامترهایی هستند که باید تخمین زده شوند. در نتیجه در این حالت مسأله‌ی تخمین کانال به مسأله‌ی تخمین این پارامترها تبدیل می‌شود. بنابراین در گیرنده نیاز به مدل کانال داریم تا با استفاده از آن، کانال تخمین زده شود و اطلاعات حاصل در اختیار همسان‌ساز قرار گیرد. در این حالت صرفنظر از نویز، ورودی کانال با خروجی همسان‌ساز در هر لحظه تقریباً یکسان بوده و می‌توان به آشکارسازی سیگنال دریافتی پرداخت. به عنوان یک

---

1 InterSymbol Interference
2 Frequency selectivity
3 Time selectivity
4 Doppler spread
5 InterCarrier Interference
8 Equalizer
9 Estimation

نکته جانبی باید بیان کرد که مدل کردن کانال علاوه بر این که برای تخمین کانال مورد استفاده قرار می‌گیرد، برای شبیه‌سازی کانال و پیاده‌سازی این شبیه‌سازی به صورت عملی نیز کاربرد دارد.

پاسخ فرکانسی یک سیستم خطی بیانگر تمام خصوصیات آن سیستم است، درنتیجه برای بررسی سیستم‌های مختلف به محاسبه‌ی این پاسخ می‌پردازند و برای معرفی یک سیستم نیز آن را در حوزه‌ی زمان و یا فرکانس بیان می‌کنند. از آنجا که می‌توان کانال مخابراتی را نیز یک سیستم در نظر گرفت، در نتیجه در بررسی‌ها به محاسبه‌ی پاسخ ضربه کانال و یا فرم حوزه‌ی فرکانس آن که تابع انتقال[1] نام دارد، می‌پردازند. بر حسب آنکه در یک سیستم مخابراتی حرکت گیرنده و فرستنده نسبت به هم وجود داشته باشد یا خیر، پاسخ ضربه یک کانال می‌تواند با زمان تغییر کند و یا ثابت بماند که در آن صورت کانال را به ترتیب تغییرپذیر با زمان[2] و یا تغییرناپذیر با زمان می‌نامند. برای تخمین درست کانال تغییرپذیر با زمان باید برحسب آنکه این تغییرات با زمان چگونه است به بررسی و تخمین بپردازیم. برای تفصیل این بیان مختصر از مبانی کانال بی‌سیم، می‌توان به [۱] مراجعه کرد.

۱-۲ مبانی مخابرات بی‌سیم

با به وجود آمدن نسل اول شبکه‌های بی‌سیم سلولی و شکل‌گیری پدیده‌ی ارسال بی‌سیم، افزایش درخواست‌ها برای نرخ‌های داده بالا و کیفیت بهتر سرویس‌ها گسترش یافت. این افزایش در نرخ‌های داده بالا، خود به خود باعث افزایش تعداد کاربران و به وجود آمدن سرویس‌ها و کاربردهای جدیدتر در سیستم‌های بی‌سیم شده است [۲].

متأسفانه کارایی سیستم‌های بی‌سیم متداول، به وسیله‌ی پدیده‌ی تداخل و پراکندگی[3] ذاتی کانال بی‌سیم، محدود شده است. در کانال‌های بی‌سیم چندین نسخه از سیگنال ارسال‌شده از فرستنده، با فازها و دامنه‌های مختلف به گیرنده می‌رسند. گیرنده، این نسخه‌های دریافت‌شده را بسته به فاز آن‌ها به صورت مخرب[4] و یا سازنده[5] جمع می‌کند که باعث نوسانی شدن توان سیگنال دریافت‌شده می‌شود. این پدیده که به محوشدگی چندمسیری[6] موسوم است را می‌توان به عنوان اصلی‌ترین مانعی در نظر گرفت که امر ارسال نرخ‌های داده بالا روی کانال‌های بی‌سیم را محدود می‌کند [۳].

با این وجود، اگر پهنای‌باند کانال یا توان ارسالی فرستنده و یا هر دو افزایش یابند، سیستم‌های بی‌سیم متداول می‌توانند نرخ‌های داده بالا را تأمین کنند. البته اعمال این راه حل ساده تنها در حالت تئوری امکان‌پذیر است و اساساً به دو دلیل در عمل انجام این کار غیرممکن خواهد بود. دلیل اول آن است که توان ارسالی به دلیل محدودیت‌های ساختارهای فیزیکی سیستم‌ها نمی‌تواند از یک مقدار مشخص تجاوز کند و همچنین از لحاظ تکنیکی، ساختن گیرنده‌های خطی با هزینه‌های قابل قبول در توان‌های بالا سخت است. دلیل دوم، طیف فرکانسی است که در مخابرات به عنوان منبعی محدود و با ارزش به حساب می‌آید. به دلیل این محدودیت طیف نیز افزایش پهنای‌باند کانال پرهزینه و

---

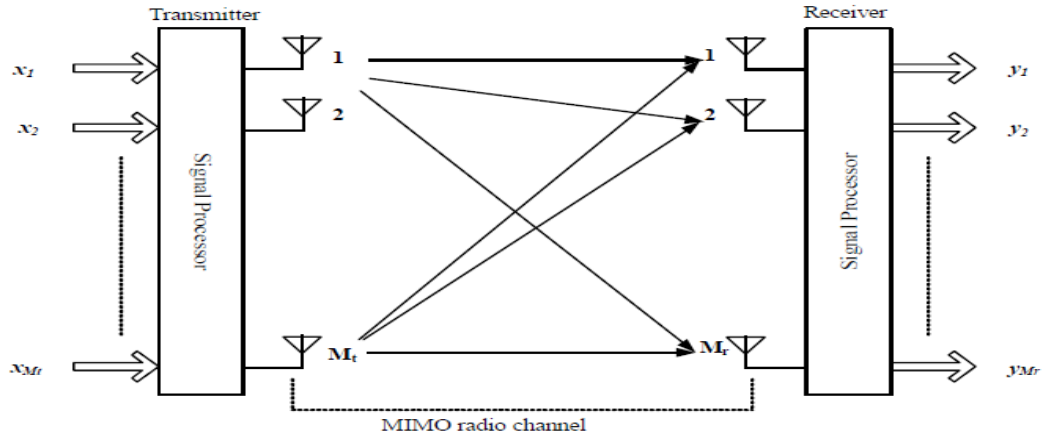
1 Transfer Function
2 Time varient
3 Scattering
4 Destructive
5 Constructive
6 Multipath Fading

سخت خواهد بود. پس به دلایل گفته‌شده، برای رسیدن به خواسته‌های سیستم‌های بی‌سیم جدید که روز به روز هم بیشتر می‌شوند باید از تکنیک‌های جدیدی استفاده کرد که هم از لحاظ هزینه قابل قبول باشند و هم از لحاظ سیستمی امکان پیاده‌سازی داشته باشند. استفاده از آنتن‌های چندگانه در فرستنده و گیرنده که به سیستم‌های چند ورودی- چند خروجی[۱] (MIMO) موسوم هستند، یکی از مهمترین تکنیک‌های نویدبخشی است که مسأله‌ی ظرفیت کانال و مسائل دیگر موجود در سیستم‌های بی‌سیم را بدون هدر دادن توان فرستاده‌شده و نیز طیف فرکانسی حل می‌کند [۲].

۱-۳ سیستم‌های MIMO

در سیستم‌های بی‌سیم متداول از قبیل سیستم‌های تک ورودی- تک خروجی[۲] (SISO) و سیستم‌های تک ورودی– چند خروجی[۳] (SIMO)، پدیده‌ی محوشدگی به عنوان مسأله‌ی نامطلوبی شناخته می‌شود که باید با آن مقابله کرد. اگر چه در این سیستم‌ها با استفاده از کم کردن تأثیرات محوشدگی و افزایش نسبت SNR در خروجی گیرنده با به کارگیری آنتن‌های چندگانه در آن، امکان دستیابی به بهره‌های قابل قبول وجود دارد، اما این بهره‌ها را می‌توان به بهبودی در کارایی نرخ خطای بیت[۴] (BER) و نه بهبودی در ظرفیت کانال (افزایش نرخ داده‌ی بالا در ارسال) تفسیر کرد. پس در این سیستم‌ها که آنتن‌های چندگانه تنها در یک طرف ارتباط بی‌سیم (گیرنده) به کار گرفته شده است، مسأله مذکور قابل حل نیست.

در دو دهه‌ی اخیر مطالعات تئوری [۴، ۵ و۶] نشان داده‌اند که استفاده از آنتن‌های چندگانه (آنتن آرایه‌ای[۵]) در هر دو طرف ارتباط بی‌سیم می‌تواند به شدت راندمان پهنای‌باند را جبران کرده و بهبود مطلوبی در قابلیت اطمینان سیستم‌های بی‌سیم ایجاد کند. بنابراین، درخواست‌ها برای کاربردهای بی‌سیم جدید می‌توانند بدون هدر رفتن طیف با ارزش و بدون مصرف کردن توان ارسالی زیاد در فرستنده، برآورده شوند. شکل ۱-۱ یک سیستم MIMO با M_t آنتن فرستنده و M_r آنتن گیرنده را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ - یک سیستم MIMO با M_t آنتن فرستنده و M_r آنتن گیرنده

---

[1] Multiple- Input Multiple- Output
[2] Single- Input Single- Output
[3] Single- Input- Multiple- Output
[4] Bit Error Rate
[5] Antenna Arrays

در محیط‌های با پراکندگی چندمسیری معتنابه[1] که به عنوان کانال‌های مستقل با توزیع یکسان[2] (i.i.d) شناخته می‌شوند، گیرنده بدون تداخل، می‌تواند چندین رشته‌ی ارسال‌شده از چندین فرستنده را از هم جدا کرده و تشخیص دهد. از اینرو ظرفیت سیستم MIMO به صورت خطی با افزایش تعداد جفت آنتن‌ها افزایش می‌یابد [۵،۶،۷و۸]. برخلاف سیستم‌های متداول، مزیت اصلی سیستم‌های MIMO، در نظر گرفتن پدیده‌ی محوشدگی به عنوان یک فرصت به جای تهدید برای افزایش ظرفیت کانال و بهبود کارایی BER است [۷]. استفاده از سیستم‌های MIMO، مزایای متعدد دیگری نیز دارد که برحسب کاربرد می‌توان به آن‌ها پرداخت.

ثابت شده است که به جای غلبه بر محوشدگی چندمسیری می‌توان از آن به عنوان یک فرصت برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم و افزایش ظرفیت کانال بهره جست. اگر فرستنده و گیرنده با آنتن‌های چندگانه مجهز شوند، در صورت وجود تعداد پراکنده‌سازهای زیاد، یا به عبارت دیگر، ناهمبستگی یا استقلال کانال‌های بین جفت آنتن‌های فرستنده و گیرنده، ظرفیت کانال به صورت خطی با افزایش تعداد جفت آنتن‌ها زیاد می‌شود [۵،۶و۸]. بنا به تعریف، زمانی که رشته‌های داده فرستاده‌شده هم زمان و با زاویه ورود مشابه به گیرنده برسند، کانال را همبسته[3] می‌نامند. این همبستگی می‌تواند به دلیل فاصله‌های ناکافی بین آنتن‌های مجاور در فرستنده، گیرنده و یا هر دو باشد. تعداد ناکافی از پراکنده‌سازها در کانال و وجود مؤلفه‌ی دیدمستقیم[4] (LOS) نیز می‌توانند از دلایل ایجاد همبستگی در کانال باشند. به علاوه، برخی حالت‌ها در آنتن‌های گیرنده و فرستنده وجود دارند که در آن‌ها آنتن‌ها از لحاظ فاصله‌بندی به خوبی جدا شده‌اند و بنابراین ناهمبسته هستند ولی ظرفیت کانال هنوز خیلی کم است. این نوع کانال‌ها به عنوان کانال‌های کیهول[5] شناخته می‌شوند [۹].

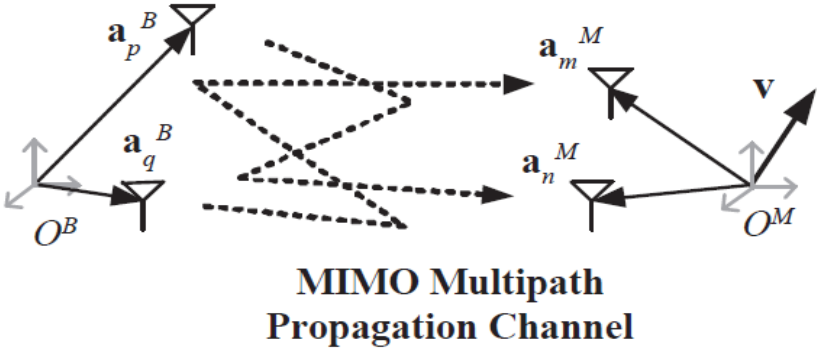
کاهش ظرفیت کانال با افزایش همبستگی در آن به ترتیبی است که اگر همبستگی کانال به کمال نزدیک شود، وضعیت ظرفیت آن به بدترین حالت خود می‌رسد. از اینرو کارایی کانال‌های MIMO شدیداً به خصوصیات آماری کانال موردنظر و همبستگی بین زیرکانال‌های[6] عناصر آنتن آرایه‌ای[7] در فرستنده و گیرنده وابسته است [۵، ۱۰و۱۱]. بنابراین برای طراحی مناسب و مؤثر سیستم‌های MIMO و همچنین داشتن یک آشکارساز مناسب در گیرنده لازم است که مدل‌های دقیق و ساده‌ای از کانال‌های بی‌سیم به‌دست آیند.

۱-٤ مدل کردن کانال MIMO

در شکل ۱-۲، شماتیکی از یک کانال انتشار بی‌سیم همراه با نمایش مسیرهای انتشار و با دو آنتن در فرستنده و دو آنتن در گیرنده، نشان داده شده است. در بررسی‌های فصل‌های بعد به این شکل ارجاع خواهد شد.

---

1 Rich Multipath Scattering
2 Independent Identically Distributed
3 Correlated
4 Line Of Sight
5 Keyhole
6 Subchannels
7 Arrray Antenna Elements



شکل ۱-۲ – نمایش کانال چند مسیری MIMO با دو آنتن در هر طرف و حرکت MS با سرعت ثابت v [۱۲]

روشن است که استفاده‌ی توأم از آنتن‌های آرایه‌ای در ایستگاه پایه[1] (BS) و ایستگاه متحرک[2] (MS) افزایش قابل توجهی در ظرفیت سیستم ایجاد می‌کند [۲،۴،۵،۶ و۱۳]. این چنین افزایشی به شرط آنکه مدل‌های معتبر کانال MIMO نیز در دسترس باشند، دست‌یافتنی است [۱۱].

دقت مدل کانال برای طراحی‌های کارآمد سیستم‌های بی‌سیم MIMO تعیین‌کننده است. بیش از پنجاه سال قبل، مدل‌های انتشار بر اساس نیازهای صنعت پدید می‌آمدند. در مدل‌های انتشار اولیه تنها توصیفات توان و داپلر سیگنال رادیویی در نظر گرفته می‌شدند. دسته‌ای دیگر از مدل‌ها با در نظر گرفتن پارامتر زمان در کانال رادیویی، برای استفاده در سیستم‌های پهن‌باند[3] توسعه یافته‌اند. از اینرو این دسته از مدل‌ها، توصیفات داپلر را توأم با پروفایل تأخیر[4] (DP) توان بیان می‌کنند. در مدل‌هایی که اخیراً در حال پدیدار شدن هستند، بیشتر به استفاده کارآمد از فضا توجه شده است. از اینرو تقاضاها برای مدل‌های جدید که در توصیف توأم رفتار فضایی و زمانی کانال‌های بی‌سیم مخابراتی MIMO مفید باشند، در حال افزایش است [۹،۱۲،۱۴،۱۵،۱۶،۱۷،۱۸،۱۹،۲۰و۲۱].

با ظهور کارایی بالای سیستم‌های مخابراتی MIMO، مدل‌های کانال MIMO مناسب باید توانایی ارزیابی کارایی و درک رفتار این سیستم‌ها را داشته باشند. کانال بی‌سیم به شدت به محیط انتشار و تغییرات آن وابسته است. مدل کردن کانال زمانی چالش برانگیز می‌شود که به توصیف محیط‌های انتشار متفاوت در حضور تغییرات مختلف ناشی از حرکت MS، نیاز داشته باشد. مدل‌های کانال برای داشتن دقت بالا پیچیده می‌شوند، به گونه‌ای که استفاده از آن‌ها برای اهداف تحلیل و شبیه‌سازی مقرون به صرفه نیست. از طرف دیگر، مدل‌های ساده با در نظر گرفتن توصیفات معینی به روش ساده برای کانال، کار می‌کنند. این مدل‌ها علیرغم فقدان دقت مدل‌های پیچیده، امکان و بینشی ایجاد می‌کنند که هم در تحلیل و هم در طراحی سیستم مفید هستند.

---

1 Base Station
2 Mobile Station
3 Wideband
4 Delay Profile

کانال‌های MIMO به روش‌های مختلفی دسته‌بندی می‌شوند. برای نمونه کانال‌ها با محوشدگی فرکانس انتخابی در مقابل تخت[۱]، پهن‌باند در مقابل باندباریک[۲]، محیط باز[۳] در مقابل محیط بسته[۴]، با محوشدگی آرام در مقابل محوشدگی سریع و کانال ابرسلولی[۵] در مقابل ریزسلولی[۶]. بنابراین مهندسین باید روش‌های درخور و مناسب متفاوتی را برای مدل کردن و اندازه‌گیری کانال‌های MIMO متناظر به کار گیرند.

تاکنون مدل‌های زیاد و متنوعی برای کانال‌های MIMO پیشنهاد شده‌اند. برخی از این مدل‌ها که به مدل‌های فیزیکی[۷] مشهور هستند، کانال را با استفاده از نمایش انتشار چندمسیری دوجهته بین آنتن‌های آرایه‌ای گیرنده و فرستنده و بر اساس انتشار موج الکترومغناطیسی توصیف می‌کنند. این مدل‌ها دقیق و مؤثر هستند ولی در عوض از لحاظ محاسباتی پیچیده‌اند [۲۲و۲۳]. در مقابل مدل‌هایی تحت عنوان مدل‌های تحلیلی بر مبنای همبستگی[۸] وجود دارند که ماتریس کانال MIMO را به صورت آماری بر حسب همبستگی‌های بین درایه‌های این ماتریس توصیف می‌کنند. این رویکرد، پیچیدگی محاسبات را کمتر کرده و بنابراین این مدل‌ها را برای فرایند شبیه‌سازی سیستم‌های بزرگ، مناسب می‌سازد. مشهورترین و ساده‌ترین مدل در این دسته، مدل کانال کرونکر[۹] است که در فصل دوم معرفی خواهد شد [۱۱و۲۴].

البته هر کدام از این مدل‌های فیزیکی و تحلیلی نیز بسته به روشی که به کار می‌برند به دسته‌های کوچکتری تقسیم‌بندی می‌شوند که به صورت مفصل به آن‌ها خواهیم پرداخت. با توجه به کثرت مدل‌های ارائه‌شده، در فصل دوم با تقسیم‌بندی این مدل‌ها، به بررسی برخی از مهمترین آن‌ها پرداخته می‌شود.

در ادامه در دو زیربخش جداگانه این مدل‌ها با این نگاه که از چه روشی برای مدل کردن استفاده می‌کنند، دسته‌بندی و به صورت مختصر معرفی می‌گردند.

۱-٤-۱ مدل‌های کانال MIMO-CCF

در بیشتر مدل‌های موجود (اعم از باندباریک و پهن‌باند)، کانال‌های MIMO با مطالعه‌ی رفتار آماری تابع انتقال کانال(CTF) توصیف شده‌اند. از طرفی در بیشتر محیط‌های باز پاسخ کانال، از مجموع پاسخ‌های تعداد زیادی از مسیرهای انتشار، بدست می‌آید. در نتیجه قضیه حد مرکزی[۱۰] به صورت مجانبی برای تابع انتقال (TF) کانال یک فرایند تصادفی گوسی مختلط[۱۱] با میانگین صفر پیشنهاد می‌کند که به عنوان کانال رایلی[۱۲] شناخته می‌شود. بنابراین فرایند

---

1 Flat
2 Narrowband
3 Outdoor
4 Indoor
5 Macrocell
6 Microcell
7 Physical models
8 Analytical correlation-based models
9 Kronecker
10 Central limit theorem
11 Gaussian random process
12 Rayleigh channel

تصادفی مذکور توسط آمارگان مرتبه‌ی دو یعنی تابع همبستگی متقابل[1] (CCF) قابل توصیف کامل است. مدل‌های CCF دید قابل قبولی درباره‌ی کانال می‌دهند [۹،۱۱،۲۵،۲۶،۲۷،۲۸و۲۹]. یک رویکرد در مدل کردن کانال MIMO محیط باز در حالت محوشدگی رایلی، محاسبه تابع همبستگی متقابل(CCF) بین مؤلفه‌های سیگنال‌های فرستاده‌شده در زمان، فضا و فرکانس است [۹،۱۱،۲۵،۲۶،۲۷و۲۸]. به مدل‌هایی که در آن‌ها به محاسبه‌ی تابع همبستگی متقابل (CCF) پرداخته می‌شود، مدل‌های کانال MIMO-CCF اطلاق می‌شود. بیشتر این مدل‌ها یک فضای هندسی معین برای پراکنده‌سازهای توزیع‌شده در فضا فرض می‌کنند و برای MS حرکتی با سرعت خطی ثابت در یک جهت خاص روی صفحه در نظر می‌گیرند. چنین فضاهای هندسی قید و شرط‌های معینی به این مدل‌ها تحمیل و قدرت آن‌ها را به محیط‌های مشابه فضای هندسی مفروض، محدود می‌کنند. مدل‌های CCF دید توصیفی قابل قبولی درباره کانال می‌دهند. ما نیز در فصل سوم با رویکرد آماری- تحلیلی، یک مدل برای کانال MIMO در محیط باز ارائه خواهیم کرد. در ادامه این زیربخش برخی از مهمترین مدل‌های MIMO-CCF محیط باز که از یک حلقه‌ی هندسی (مدل‌های تک‌حلقه[2]) برای پراکنده‌سازهای اطراف MS استفاده می‌کنند، شرح داده می‌شوند.

مدل سنتی تک‌حلقه در ابتدا توسط کلارک[3] [۳۰] به کار برده شد. این مدل مدت‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفت و البته هنوز نیز استفاده می‌شود. فرض‌های به کاررفته در این مدل بسیار ساده هستند. در [۳۱] به این موضوع پرداخته شده است که تا چه زمانی مدل کلارک برای استفاده اعتبار دارد. سرانجام این مدل توسط دیگران توسعه داده شد. یکی از این مدل‌های بسط داده‌شده در [۱۱] آورده شده است که برای محوشدگی رایلی باند باریک در سیستم‌های بی‌سیم ثابت، مناسب است. در این مدل، یک محیط ابرسلولی شهری در نظر گرفته شده که در آن BS در یک مکان قرار گرفته و پراکنده‌سازهای محلی[4] آن را با تراکم کم احاطه کرده‌اند. پارامترها در این مدل عبارت از فاصله‌ی بین BS و MS، شعاع دایره‌ی پراکنده‌سازها، جهت ورود[5] (DOA) در BS و مکان هندسی آنتن‌ها می‌باشند. در [۲۵] فرض شده است که پراکنده‌سازها به صورت یکنواخت روی دایره‌ای توزیع شده‌اند. هر پراکنده‌ساز دارای یک فاز اولیه با توزیع یکنواخت روی $[-\pi,\pi)$ و مستقل است. CCF بدست‌آمده در این مدل به صورت آماری حالات گوناگون مربوط به شکل‌بندی‌های مختلف BS (فاصله‌بندی آنتن[6]) را پوشش می‌دهد. عبدی و کاوه نیز در [۲۶] یک مدل MIMO تک‌حلقه برای محیط باز معرفی کرده‌اند. برای محیط‌های با محوشدگی تخت، اسزتلی[7] و همکاران در [۲۷] با در نظر گرفتن بعد فضایی و پراکندگی محلی، یک مدل آرایه‌ای تعمیم‌یافته ارائه کرده‌اند. سالز و وینترز[8] در [۲۸] یک مدل فضا- زمان (ST) برای کانال‌های با محوشدگی رایلی پیشنهاد کرده‌اند. در این مدل، یک حلقه از پراکنده‌سازها به صورت تابعی از جهت ورود (DOA) با توزیع یکنواخت و فاصله‌بندی آنتن در آرایه آنتن خطی،

---

1 Cross-Correlation Function
2 One Ring
3 Clarke
4 Local scatterers
5 Direction Of Arrival
6 Antenna spacing
7 Asztely
8 Salz and Winters