دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد مخابرات میدان

طراحی و ساخت بخش RF گیرنده یک سیستم فرستنده گیرنده MIMO 4×4 بااستفاده از مدولاسیون تطبیقی

نگارش:

آرمین قرصی عنبران

اساتید راهنما:

دکتر عبدالعلی عبدی‌پور

دکتر عباس محمدی

تیرماه ۱۳۸۷

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی‌تکنیک تهران)

بسمه تعالی

فرم اطلاعات پایان‌نامه
کارشناسی- ارشد و دکترا

تاریخ:
شماره:

معاونت پژوهشی
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷

مشخصات دانشجو:

نام و نام خانوادگی:آرمین قرصی عنبران دانشجوی آزاد ● بورسیه ○ معادل ○
شماره دانشجوئی:۸۴۱۲۳۰۵۳ دانشکده:مهندسی برق رشته تحصیلی:مخابرات میدان گروه: مخابرات

مشخصات استاد راهنما:

نام و نام خانوادگی: دکتر عبدالعلی عبدی پور درجه و رتبه: استاد
نام و نام خانوادگی: دکتر عباس محمدی درجه و رتبه: دانشیار

مشخصات استاد مشاور:

نام و نام خانوادگی: - درجه و رتبه:
نام و نام خانوادگی: - درجه و رتبه:

عنوان پایان‌نامه به فارسی : بخش RF گیرنده یک سیستم فرستنده گیرنده MIMO ۴×۴ با استفاده از مدولاسیون تطبیقی

عنوان پایان‌نامه به انگلیسی: Design and implementation of receiver section of a 4×4 MIMO transceiver using adaptive modulation

نوع پروژه: کارشناسی○ ارشد ● دکتر ا ○ سال تحصیلی: ۸۶-۸۷
کاربردی ● بنیادی ○ توسعه‌ای ○ نظری ○

تاریخ شروع : مهر ۸۵ تاریخ خاتمه : تیر ۸۷ تعداد واحد : ۹ سازمان تأمین کننده اعتبار : مرکز تحقیقات مخابرات ایران

واژه‌های کلیدی به فارسی: چند ورودی/ چند خروجی – بستر تحقیقاتی – اندازه گیری – مدولاسیون تطبیقی
واژه‌های کلیدی به انگلیسی : Adaptive Modulation – Measurement – Testbed – MIMO

مشخصات ظاهری	تعداد صفحات ۱۶۹	تصویر○ جدول○ نمودار○ نقشه○ واژه‌نامه○		تعداد مراجع ۱۰۶	تعداد صفحات ضمائم -
زبان متن	فارسی ●	انگلیسی ○	چکیده	فارسی ●	انگلیسی ●
یادداشت					

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه

استاد:

دانشجو:

امضاء استاد راهنما: **تاریخ:**

نسخه۱: ارائه به معاونت پژوهشی به همراه یک نسخه الکترونیکی از پایان‌نامه و فرم اطلاعات پایان‌نامه بصورت PDF همراه چاپ چکیده (فارسی انگلیسی) و فرم اطلاعات پایان‌نامه

نسخه۲: -ارائه به کتابخانه دانشکده (به همراه نسخه الکترونیکی فرم و دو جلد پایان نامه و لوح فشرده طبق نمونه اعلام شده در صفحه خانگی کتابخانه مرکزی)

تقدیم به

مادر و پدر مهربانم،

که دلگرمی‌های صمیمانه‌شان

همواره پشتوانه من بوده است.

سپاسگذاری

بدین وسیله از مرکز تحقیقات مخابرات ایران (ITRC) که پشتیبانی مالی این پروژه را انجام داد، تشکر می‌کنم.

همچنین بر خود لازم می‌دانم از زحمات اساتید گرانقدر جناب آقای دکتر عبدی‌پور و جناب آقای دکتر محمدی به جهت راهنمایی‌ها و کمک‌های مؤثرشان تشکر کنم.

چکیده

سیستم‌های مخابراتی چند ورودی/چند خروجی (MIMO) به دلیل ارتقاء نرخ مبادله داده و همچنین افزایش قابلیت اطمینان سامانه‌های مخابراتی، در امور تجاری و نظامی کاربردهای زیادی پیدا کرده و به همین دلیل مورد تحقیق بسیاری از پژوهشگران دانشگاهی و صنعتی قرار گرفته است. با توجه به تلاش‌های انجام شده در این زمینه، هنوز یک بستر مناسب تحقیقاتی از این سیستم‌ها در اختیار دانش پژوهان قرار ندارد. در این پایان‌نامه، مفاهیم تئوریکی یک سیستم چند ورودی/چند خروجی با ۴ آنتن در فرستنده و ۴ آنتن در گیرنده در باند فرکانسی آزاد 2.45GHz، مورد بررسی واقع شده و یک نمونه تحقیقاتی تولید شده است. با استفاده از نمونه سیستم تولیدی می‌توان هر موضوعی را که در این زمینه مطرح می‌گردد به سرعت و به سهولت هر چه بیشتر به صورت عملی تست نموده و نتایج عملی را با تئوری مقایسه کرد تا بتوان از صحت محاسبات تئوری و مدلسازی انجام گرفته مطمئن شد.

تمام بخش‌های مختلف این بستر تحقیقاتی توسط یک تیم سه نفره و در غالب سه پروژه کارشناسی ارشد، طراحی و پیاده‌سازی شده است. در هر پایان‌نامه به طور خاص به یکی از موضوعات به صورت تئوری پرداخته شده است و کلیه بخش‌های طراحی و پیاده‌سازی به صورت مشترک در هر سه پایان‌نامه آورده شده است. در این پایان‌نامه به طور خاص به انواع گیرنده‌ها پرداخته شده و کلیه فعالیت‌های تئوری که تا به حال در این خصوص مطرح شده بود، گردآوری شده است.

طراحی و پیاده‌سازی بخش‌های مختلف اعم از مدارات دیجیتال، مدارات RF، و قسمت باند پایه که از بخش‌های مشترک هر سه پایان‌نامه می‌باشد نیز به تفصیل مطرح، و در هر بخش نتایج تست و اندازه‌گیری با مقادیر تئوری و طراحی مقایسه شده است. پیاده‌سازی اکثر قسمت‌های باند پایه مانند ساخت و ردگیری ابتدای فریم، سنکرون‌سازی‌ها، تخمین کانال و آشکارسازی نهایی در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. زیرا این نرم-افزار قابلیت تغییر ساده و سریع را برای هر محققی ایجاد می‌کند. در بیشتر موارد چندین روش مختلف پیاده‌سازی شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده و بهترین روش در ادامه برای تست کلی سیستم مورد استفاده قرار گرفته است.

نتایج اندازه‌گیری کلی بستر تحقیقاتی که در بخش جداگانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است، قابلیت بالای بستر تحقیقاتی ساخته شده را برای به کارگیری آن در تحقیقات نشان می‌دهد. البته پس از اطمینان از صحت عملکرد بستر تحقیقاتی ساخته شده چند اندازه‌گیری نیز برای تحقیق در زمینه خواص کانال‌های MIMO به عنوان نمونه انجام شده و قابلیت افزایش ظرفیت کانال در سیستم MIMO در یک محیط داخلی (Indoor) نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: چند ورودی/چند خروجی (MIMO)، بستر تحقیقاتی (Testbed)، اندازه‌گیری (Measurement)، مدولاسیون تطبیقی (Adaptive Modulation)، سیستم‌های مدرن مخابراتی (Modern Communication Systems).

فهرست مطالب

۱- مقدمه ۱

۱-۱- مروری بر فعالیتهای گذشته ۲

۱-۲- هدف پروژه ۲

۱-۳- نظم پایان نامه ۳

۲- مفاهیم کلی MIMO ۶

۲-۱- اصول سیستمهای فضا-زمان (MIMO) ۷

۲-۲- تئوری اطلاعات MIMO ۱۱

۲-۲-۱- نتایج پایه ۱۱

۲-۳- ارسال در سیستمهای MIMO ۱۹

۲-۳-۱- اصول کلی ۱۹

۲-۳-۲- ماکزیمم کردن Diversity با STTC ۲۱

۲-۳-۳- ماکزیمم کردن Diversity با STBC ۲۲

۲-۳-۴- ماکزیمم کردن نرخ ارسال با استفاده از مالتی پلکس فضایی ۲۸

۲-۳-۵- سیستمهای MIMO با فیدبک ۳۱

۲-۴- مدل کردن کانال MIMO ۳۲

۲-۴-۱- کانال MIMO با پهنای باند کم ۳۲

۲-۴-۲- کانالهای متغیر با زمان MIMO با پهنای باند وسیع ۳۳

۳- معرفی ساختار گیرنده های RF و گیرنده دیجیتال ۳۴

۳-۱- گیرنده های دیجیتال ۳۴

۳-۱-۱- بلوک دیاگرام بنیادی گیرنده دیجیتال ۳۵

۳-۱-۲- الگوریتمهای همزمانی ۴۶
۳-۱-۳- درونیابی دیجیتال ۴۶
۳-۱-۴- کنترل درون یاب ۵۲
۳-۲- گیرنده های RF ۵۹
۳-۲-۱- گیرنده های هترودایِن ۵۹
۳-۲-۲- گیرنده های IF دوگانه ۶۰
۳-۲-۳- گیرنده های تبدیل مستقیم ۶۱
۳-۲-۴- گیرنده های حذف تصویر ۶۴
۴- طراحی و ساخت بستر تحقیقاتی ۶۵
۴-۱- توضیحات کلی درباره بستر تحقیقاتی ۶۶
۴-۲- سخت افزار ۶۹
۴-۲-۱- بخش پردازشی ۶۹
۴-۲-۲- فرستنده ۷۵
۴-۲-۳- گیرنده ۷۹
۴-۳- بخش سیستم ۸۲
۴-۳-۱- فرستنده ۸۳
۴-۳-۲- گیرنده ۸۹
۴-۴- بخش RF ۱۰۳
۴-۴-۱- فرستنده ۱۰۳
۴-۴-۲- گیرنده ۱۱۵
۴-۴-۳- اسیلاتورهای محلی ۱۲۹
۵- نتایج اندازه گیری ۱۴۱

۵-۱- اندازه گیریهای SISO ۱۴۲
۵-۱-۱- کانال AWGN ۱۴۲
۵-۱-۲- مدولاسیون تطبیقی QAM ۱۴۵
۵-۲- اندازه گیری MIMO ۱۴۷
۵-۲-۱- اندازه گیری نرخ خطا برای یک کانال ثابت هوایی ۱۴۷
۵-۲-۲- بررسی ماتریس کانال ۱۴۹
۵-۳- مدولاسیون تطبیقی ۱۵۴
۶- نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۵۸
۶-۱- جمع بندی ۱۵۸
۶-۲- پیشنهادهایی برای ادامه پروژه ۱۵۹
۷- مراجع ۱۶۱

۱– مقدمه

سیستم‌های مخابراتی چند آنتنه به دلیل بالا بردن نرخ داده و همچنین افزایش قابلیت اطمینان سیستم مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته‌اند. هرچند که نتایج تئوری نشان می‌دهد که این سیستم‌ها در شرایط ایده‌آل گین‌های مورد نظر را برآورده می‌کنند، وجود بسترهای تحقیقاتی که این گین‌ها را در شرایط کانال‌های واقعی و با وجود نواقص عملی در سیستم، مورد بررسی قرار دهد بسیار ضروری و لازم به نظر می‌رسد. علاوه بر این، مدل کردن دقیق کانال‌های MIMO بدون سیستم عملی و تست در شرایط واقعی امکان‌پذیر نیست. همچنین نواقصی که به دلیل زیر سیستم‌های RF به سیستم تحمیل می‌شود مانند غیر خطی شدن، نویز فاز، عدم توازن DC و عدم توازن I و Q نیز جنبه‌های عملی سیستم‌های مخابراتی هستند که باید اثر آنها در سیستم-های چند آنتنه با دقت بررسی شود.

بسترهای تحقیقاتی همچنین نقش مهمی در آموزش‌های آکادمیک و صنعتی به عهده دارند. این بسترهای تحقیقاتی بینش بیشتری نسبت به جنبه‌های مختلف طراحی یک سیستم مخابراتی ایجاد می‌کنند و شرایط آسانی را برای تجربه سیستم‌های واقعی در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهند. این سیستم‌ها همچنین زمینه لازم را برای کار گروهی در زمینه‌های مختلف طراحی یک سیستم بدون سیم فراهم می‌آورند.

در طراحی بسترهای تحقیقاتی باید نکات بسیاری در نظر گرفته شود. یکی از نکات مهمی که در طرح‌های مدرن مد نظر قرار می‌گیرد، رادیو نرم‌افزاری طرح و قابلیت انعطاف سیستم است. سیستم باید به گونه‌ای طراحی شود که تقریباً بیشتر سیستم‌های مخابراتی را بتوان توسط آن

تست نمود که لازمه آن این است که قسمت عمده سیستم به صورت نرم‌افزاری طراحی شود. نکته دیگر دقت و کیفیت بستر تحقیقاتی می‌باشد. به دلیل اینکه این سیستم‌ها به عنوان مرجع برای تست سیستم‌ها و الگوریتم‌های جدید بکار روند باید از دقت بسیار بالایی برخوردار باشند. تکرارپذیری تست‌های انجام شده از نکات کلیدی در طراحی سیستم است. دقت و تکرار پذیری سیستم را می‌توان با افزایش بخش‌های دیجیتال بالا برد. هر چه بستر تحقیقاتی دارای بخش‌های آنالوگ کمتری باشد، از دقت و تکرارپذیری بالاتری برخوردار است.

۱-۱- مروری بر فعالیتهای گذشته

اولین سیستم عملی MIMO در سال ۱۹۹۸ با پهنای باند باریک در آزمایشگاه BELL ساخته شد که از معماری V-BLAST[1] استفاده می‌کرد[1]. پس از آن بسترهای تحقیقاتی متعددی ساخته و تست شدند که در مقالات مختلف گزارش شده‌اند[8]-[2]. بعضی از این بسترهای تحقیقاتی به منظور بررسی سیستم خاصی طراحی و پیاده‌سازی شده‌اند و بعضی دیگر نیز به صورت نرم‌افزاری و قابل انعطاف طراحی شده‌اند تا بیشتر انواع سیستم‌ها را بتوان به وسیله آن‌ها تست نمود. یک خصوصیت عمده بیشتر بسترهای تحقیقاتی گزارش شده، استفاده آنها از تجهیزات و دستگاه‌های اندازه‌گیری آماده در بخش RF می‌باشد. به طور مثال، بیشتر آنها از منبع سیگنال برای تولید سیگنال LO[2] استفاده می‌کنند و برای بالا بردن و پایین آوردن فرکانس نیز به طور مشابه از دستگاه‌های آماده استفاده می‌کنند. این عمل در ازای کیفیت بالایی که به سیستم می‌دهد هزینه کلی سیستم را بسیار بالا می‌برد و همچنین این بسترهای تحقیقاتی را به سیستم‌هایی بزرگ مبدل می‌کند که حمل نقل آنها برای اندازه‌گیری در محیط‌های مختلف را بسیار مشکل می‌کند.

۱-۲- هدف پروژه

با توجه به مدت زمان اندکی که از مطرح شدن سیستم‌های MIMO می‌گذرد و علاقه-مندی بسیاری که در همین مدت زمان کم در بین پژوهشگران به وجود آمده است و همچنین با توجه به مزایای فراوان بسترهای تحقیقاتی نیاز روزافزونی به وجود چنین سیستمی با دقت و کیفیت بالا و همچنین قابلیت انعطاف بالا جهت تسهیل امر تحقیق در این زمینه مدرن، در دانشگاه‌های کشور احساس می‌شود. هدف اصلی از انجام این پروژه، طراحی و ساخت سیستمی است که با حداقل هزینه بیشترین کارآیی را داشته باشد. همان طور که گفته شد استفاده از

---

[1] Vertical Bell Laboratories Layered Space-Time (V-BLAST)
[2] Local Oscillator

تجهیزات آماده RF هزینه بالایی دارد و در ضمن سیستم را سنگین و جابجایی آن را مشکل می‌کند، در نتیجه طراحی و پیاده‌سازی کلیه بخش‌های RF یکی از اهداف اصلی این پروژه بوده است.

همچنین به این دلیل که سیستم باید کاربری آسانی داشته باشد تا همه دانشجویان و پژوهشگران بتوانند به راحتی از آن استفاده کنند، پیاده‌سازی کلیه بخش‌های پردازشی قسمت سیستم به صورت نرم‌افزاری و ایجاد یک کتابخانه از این توابع، از دیگر اهداف پروژه قرار داده شد. از جمله این توابع می‌توان به پیاده‌سازی الگوریتم‌های همزمانی مانند بازیابی زمان سمبل‌ها، بازیابی فرکانس کاریر و آشکار سازی فریم اشاره کرد که با استفاده از این کتابخانه می‌توان به سادگی تأثیر خطاهایی که به واسطه استفاده از الگوریتم‌های غیر ایده‌آل همزمانی به وجود می‌آید را با کارآیی سیستم با همزمانی ایده‌آل مقایسه کرد. همچنین با توجه به قابلیت‌های فراوان سیستم‌های MIMO با مدولاسیون تطبیقی، تست‌های اولیه جهت نشان دادن کارآیی این سیستم‌ها توسط بستر تحقیقاتی نیز از اهداف این پروژه است.

این پروژه به ۳ قسمت فرستنده، گیرنده و مدولاسیون تطبیقی تقسیم شده و هر قسمت به صورت یک پروژه کارشناسی ارشد تعریف شده است. در این پایان‌نامه هدف ساخت بخش فرستنده این سیستم بوده است به نحوی که تمامی اهداف بالا را پوشش دهد. به همین دلیل بخش باند پایه فرستنده در Matlab پیاده‌سازی شده است تا بتوان به سادگی تغییرات لازم را داد و از مزایای نمونه‌سازی سریع[1] بهره‌مند شد، در انتقال اطلاعات به بخش RF نیز از FPGA استفاده شده است تا بتوان در آینده سیستم را به صورت Real-time پیاده‌سازی نمود و الگوریتم‌های لازمه را در این نوع از سیستم‌ها نیز تست کرد، همچنین در بخش RF، پهنای باند به اندازه کافی زیاد (4 MHz) در نظر گرفته شده است تا بتوان سیستم‌های پهن‌باند و یا حتی MIMO-OFDM را پیاده‌سازی کرد.

۱-۳- نظم پایان نامه

در بخش ۲ این پایان‌نامه مفاهیم کلی MIMO مطرح شده است. هدف از این فصل بیان اصول و مفاهیم کلی MIMO، مدل سیستم استفاده شده، مقایسه‌ای بین مزایا و معایب روش‌های پیاده‌سازی مختلف و بیان دست‌آوردهایی است که با استفاده از این تکنولوژی می‌توان به آن دست پیدا کرد. در این فصل بیشتر جنبه تئوری بحث‌های MIMO پرداخته شده است هر چند که در بعضی موارد گزارشاتی از پیاده‌سازی‌های انجام شده نیز ارائه شده است. بنابراین نیاز به انجام

[1] Rapid Prototyping

آزمایشات مختلف عملی برای صحه‌گذاری این تئوری‌ها است. پس از بیان کلیات، اصول تئوری اطلاعات سیستم‌های SISO، SIMO، MISO و MIMO تشریح شده است و مزیت اصلی MIMO برای داشتن رشد خطی ظرفیت با تعداد مینیمم آنتن‌های فرستنده و گیرنده اثبات شده است. در نهایت نحوه مدل‌سازی کانال در سیستم‌های MIMO و انواع آن برای پهنای باندهای متفاوت توضیح داده شده است.

بخش ۳ به دو زیر بخش کلی قابل تقسیم است: قسمت گیرنده دیجیتال و قسمت معرفی انواع گیرنده‌های RF. به دلیل اینکه در بستر تحقیقاتی هدف اصلی، طراحی سیستم به صورت رادیو نرم‌افزاری است و از آنجا که لازمه این کار پردازش سیگنال به صورت تمام دیجیتال می‌باشد، ساختار گیرنده دیجیتال به طور مفصل در این زیر بخش مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در مورد الگوریتم‌های همزمانی که در گیرنده دیجیتال مورد استفاده قرار می‌گیرد نیز مطالبی بیان شده است. در زیر بخش بعد انواع ساختارهای گیرنده‌های RF بررسی شده‌اند و طرح‌های مختلفی که می‌توان برای پیاده‌سازی در بستر تحقیقاتی انتخاب نمود، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در نهایت با توجه به مطالب بیان شده، طرح مناسب برای گیرنده بستر تحقیقاتی انتخاب شده است.

بخش ۴ به طراحی و پیاده‌سازی بستر تحقیقاتی تعلق دارد. در ابتدای این فصل مشخصات کلی بستر تحقیقاتی بیان شده است و در ادامه روند طراحی و اندازه‌گیری‌های زیر سیستم‌ها بیان شده است. این فصل به سه زیر بخش سخت‌افزار، سیستم و RF تقسیم شده است. در زیر بخش سخت‌افزار به توضیح مشخصات بورد پردازشی انتخاب شده و همچنین الگوریتم‌هایی که در FPGA پیاده‌سازی شده است پرداخته شده است. در زیر بخش سیستم، الگوریتم‌های همزمانی، روش‌های آشکارسازی، روش‌های تخمین کانال و افست فرکانسی و نحوه تشکیل فریم به تفصیل توضیح داده شده‌اند. در زیر بخش RF نیز به طراحی، پیاده‌سازی و تست زیر سیستم‌های RF پرداخته شده است و نتایج اندازه‌گیری آنها آمده است.

نتایج اندازه‌گیری‌های کلی که با بستر تحقیقاتی انجام شده است در بخش ۵ بیان شده است. اندازه‌گیری‌ها به طور کلی به دو دسته SISO و MIMO قابل تقسیم است. در تست‌های SISO منظور نشان دادن عملکرد صحیح سیستم و قابلیت‌های بستر تحقیقاتی ساخته شده است. به طور مثال تست‌های انجام شده در کانال AWGN بیشتر به منظور صحه گذاری بر عملکرد سیستم در نظر گرفته شده‌اند و تست سیستم SISO با مدولاسیون تطبیقی علاوه بر تست سیستم تطبیقی، نشانگر نحوه کنترل سیستم از طریق LAN می‌باشد. در تست‌های MIMO هدف بیشتر بررسی عملی گین‌هایی است که در تئوری وعده داده شده‌اند. این تست‌ها شامل اندازه‌گیری سیستم

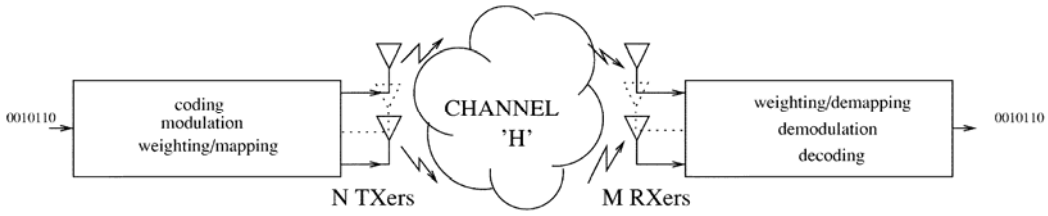
MIMO با کانال ثابت و همچنین بررسی کانال MIMO در چندین مکان متفاوت و ظرفیت قابل دسترس آن می‌باشد.

نهایتاً در فصل ۶ پیشنهادهایی برای ادامه کار بیان شده است. انتهای این فصل نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲– مفاهیم کلی MIMO

تکنولوژی سیستم‌های مخابرات بدون سیم که از چندین ورودی و چندین خروجی (MIMO[1]) استفاده می‌کند به عنوان یکی از مهمترین پیشرفت‌ها در مخابرات مدرن محسوب می‌گردد. این تکنولوژی نقشی بسیار برجسته جهت برطرف نمودن گلوگاه ظرفیت در شبکه‌های بدون سیم سریع آینده دارد. این فن‌آوری اخیراً به استانداردها و شبکه‌های تجاری مانند سیستم‌های دسترسی بدون سیم پهن باند، شبکه‌های محلی بدون سیم[2]، شبکه‌های نسل سوم وارد شده است.

در یک سیستم مخابراتی بدون سیم، لینکی را در نظر می‌گیریم که در آن فرستنده و گیرنده با چندین آنتن تجهیز شده‌اند. چنین سیستمی در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. ایده اصلی MIMO این است که سیگنال آنتن‌های فرستنده در طرف گیرنده به گونه‌ای ترکیب شوند که کیفیت (نرخ خطا[3]) یا نرخ داده، برای هر کاربر MIMO بهبود یابد.



شکل ۲-۱- دیاگرام سیستم بدون سیم MIMO

[1] Multi Input Multi Output (MIMO)
[2] Wireless LAN
[3] Bit Error Rate (BER)

ایده اساسی در سیستم‌های MIMO پردازش سیگنال فضا-زمان است که در آن بعد زمان با بعد فضا (که به طور ذاتی در استفاده از چندین آنتن وجود دارد) کامل می‌شود. سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی می‌توانند به صورت تعمیمی از آنتن‌های هوشمند[1] در نظر گرفته شوند که از چندین دهه قبل با استفاده از آرایه آنتن‌ها برای بهبود انتقال بدون سیم مورد استفاده قرار می-گرفته‌اند.

خصوصیت مهم و برجسته سیستم‌های MIMO قابلیت استفاده از انتشار چند مسیره[2] به نفع کاربر است که به طور سنتی عاملی محدود کننده برای انتقال دیجیتال به حساب می‌آیند. MIMO به طور مؤثری از محوشدگی تصادفی[3] استفاده می‌کند [10]-[12] و در صورتی که تأخیر پخشی چند مسیری[4] وجود داشته باشد، از آن برای چند برابر کردن نرخ انتقال بهره می‌برد [13]، [14]. با استفاده از MIMO به عنوان یک موضوع جدید تحقیقاتی می‌توان چندین مرتبه بهبود در کارآیی سیستم مخابرات بدون سیم را بدون افزایش طیف تخصیص یافته (تنها افزایش سخت افزار و پیچیدگی) انتظار داشت. در این بخش سعی شده است ایده‌های بنیادی‌تری که در سال‌های اخیر در این زمینه ارائه شده و همچنین بعضی از پیشرفت‌های بسیار جدید در این زمینه بیان شود.

۲-۱- اصول سیستمهای فضا-زمان (MIMO)

دیاگرام سیستم چند آنتنه در شکل ۲-۱ را در نظر بگیرید. یک منبع دیجیتال به صورت رشته داده باینری، به بلوک فرستنده‌ای که شامل توابع کدینگ کنترل خطا و نگاشت به سمبل‌های مدولاسیون مختلط (QPSK، M-QAM و غیره) می‌باشد، وارد می‌شود. این عمل چندین رشته مجزا از سمبل‌ها را تولید می‌کند که ممکن است مستقل باشند یا مقداری اطلاعات اضافی به منظور انجام کدینگ در آنها وجود داشته باشد. سپس هر کدام از آنها به یک آنتن فرستنده نگاشته می-شود. بعد از بالا بردن فرکانس، فیلتر کردن و تقویت کردن، سیگنال‌ها از طریق کانال بدون سیم ارسال می‌شوند. در گیرنده، سیگنال‌ها به وسیله چند آنتن دریافت شده و دمدولاسیون و عکس عمل نگاشت انجام شده در فرستنده برای بازیابی پیام انجام می‌شود. بسته به کاربرد مرتبه

---

[1] Smart Antenna
[2] Multi path Propagation
[3] Random Fading
[4] Multipath Delay Spread

هوشمندی، پیچیدگی، و آگاهی اولیه از کانال[1] برای انتخاب کدینگ و الگوریتم‌های نگاشت آنتن‌ها می‌تواند تغییر کند. این موارد، کلاس و کارآیی سیستم چند آنتنه پیاده‌سازی شده را معین می‌کند.

در تکنولوژی آنتن‌های هوشمند، تنها فرستنده یا گیرنده به بیش از یک آنتن تجهیز می‌شود، که معمولاً ایستگاه پایه[2] است، به دلیل اینکه در آن تأمین هزینه و فضا نسبت به یک گوشی کوچک تلفن همراه بسیار راحت‌تر است. به طور سنتی، هوشمندی در سیستم‌های چند آنتنه در الگوریتم انتخاب وزن قرار دارد نه در کدینگ، هرچند که توسعه کدهای فضا-زمان[3] در حال تغییر این دیدگاه است.

ترکیب ساده آرایه آنتن‌های خطی می‌تواند لینک مخابراتی با قابلیت اطمینان بیشتری را در شرایط انتشاری نامساعد، مانند محو شدگی چند مسیری و تداخل ارائه کند. مفهوم کلیدی در آنتن‌های هوشمند استفاده از شکل‌دهی پرتو[4] است که به وسیله آن متوسط سیگنال به نویز با متمرکز کردن انرژی در جهت‌های دلخواه، در فرستنده یا گیرنده، افزایش می‌یابد. اگر پاسخ هر آنتن به سیگنال مطلوب و یا سیگنال‌های تداخل تخمین زده شود، می‌توان المان‌ها را با وزن‌هایی بهینه ترکیب نمود تا مقدار متوسط سیگنال مطلوب را ماکزیمم و یا مقدار مؤلفه‌های دیگر مانند نویز و یا تداخل بین کانالی را مینیمم کرد.

خاصیت مهم دیگر آنتن‌های هوشمند در مفهوم Diversity فضایی[5] نهفته است. با وجود محو شدگی تصادفی ناشی از چند مسیری، احتمال از دست دادن سیگنال با افزایش تعداد المان‌های آنتن غیر همبسته، به صورت نمایی کاهش می‌یابد. مفهوم کلیدی در اینجا مرتبه Diversity[6] است که با تعداد شاخه‌های فضایی غیر همبسته موجود در فرستنده یا گیرنده، تعریف می‌شود. نشان داده می‌شود هنگامی که این دو با هم ترکیب شوند، کارآیی آنتن‌های هوشمند با مصالحه‌ای بین بهبود محدوده پوشش در مقابل کیفیت، در اختیار کاربر شبکه قرار داده می‌شود [15].

سیستم‌های MIMO می‌توانند گین Diversity را به طور هم زمان در ارسال و دریافت و همچنین گین آرایه را با فرض تخمین اولیه کانال میسر سازند. در حقیقت مزایای MIMO خیلی فراتر از گین آرایه و Diversity است. مدل ریاضی MIMO که داده به جای یک کانال برداری روی یک ماتریس فرستاده می‌شود، فرصت‌های بزرگ و جدیدی علاوه بر Diversity و گین آرایه

---

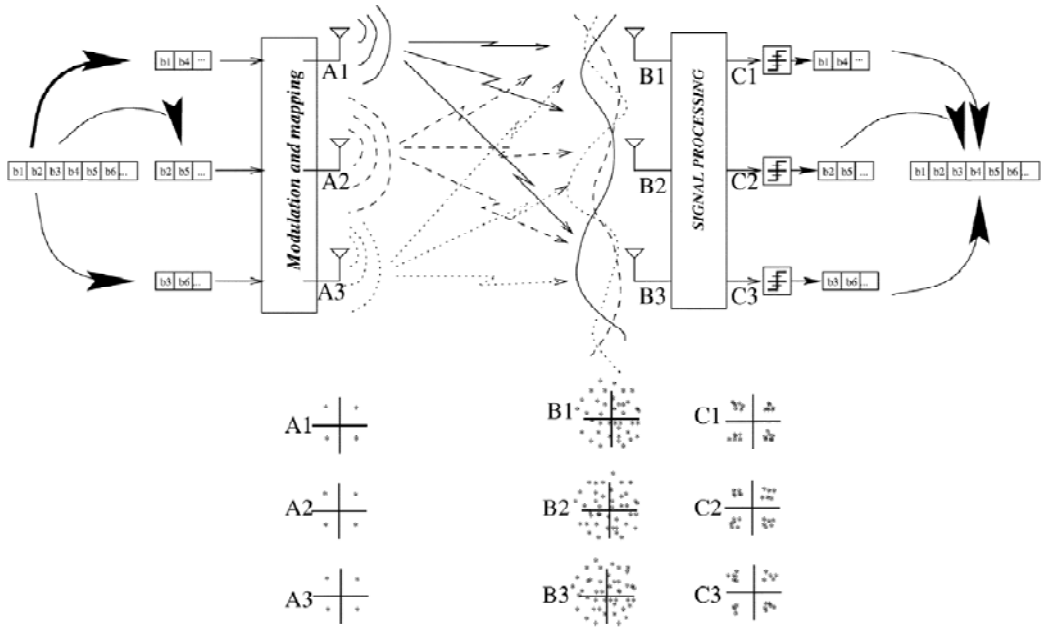
[1] A priori channel knowledge
[2] Base Station (BTS)
[3] Space Time Codes (STCs)
[4] Beam
[5] Spatial Diversity
[6] Diversity Order

ایجاد می‌کند. در [11] نشان داده شده که چگونه ممکن است تحت شرایط خاصی به اندازه مینیمم (M,N)، داده‌های مستقل را به طور همزمان روی مودهای ویژه[1] ماتریس کانال که با N آنتن فرستنده و M آنتن گیرنده ایجاد می‌شود، ارسال کرد. این گین‌ها را می‌توان با استفاده از تئوری اطلاعات اثبات کرد. هر چند مثال ساده‌ای از این الگوریتم ارسال MIMO که معمولاً در مقالات V-Blast نامیده می‌شود [17]، [18] (یا به طور کلی‌تر آنچه در اینجا مالتی پلکس فضایی[2] خوانده می‌شود) درک بهتری ایجاد می‌کند.

در شکل ۲-۲ یک رشته با نرخ بیت بالا (چپ) به سه رشته با نرخ بیت یک سوم تجزیه شده است که به وسیله چندین آنتن به طور همزمان فرستاده می‌شوند، بنابراین یک سوم طیف اسمی را استفاده می‌کنند. سیگنال‌ها طبیعتاً در کانال بدون سیم به دلیل استفاده از طیف یکسان با یکدیگر ترکیب می‌شوند. در گیرنده، بعد از مشخص شدن ماتریس کانال به وسیله سمبل‌های آموزشی[3]، رشته‌های مجزای اطلاعات از یکدیگر جدا شده و تخمین زده می‌شوند. این کار مانند پیدا کردن سه مجهول از سه معادله خطی صورت می‌گیرد. فرض شده است که هر جفت آنتن فرستنده-گیرنده یک ضریب کانال اسکالر دارند و محو شدگی تخت[4] وجود دارد. هرچند تعمیم به موارد وابسته به فرکانس[5]، نیز با استفاده از OFDM در حوزه فرکانس یا با ترکیب آشکارساز فضا-زمان MIMO با یک یکسان ساز[6] [19]-[21] در حوزه زمان، امکان پذیر است. جداسازی تنها در حالتی ممکن است که معادلات مستقل باشند که تفسیر آن نیز این است که هر آنتن به اندازه کافی کانال متمایزی را ببیند. تنها در این صورت رشته بیت‌های اولیه می‌توانند آشکارسازی و کنار هم قرار داده شوند تا سیگنال اولیه با نرخ بالا بدست آید.

---

[1] Eigen Modes
[2] Spatial Multiplexing
[3] Training Symbols
[4] Flat Fading Condition
[5] Frequency Selective
[6] Equalizer



شکل ۲-۲- طرح پایه مالتی پلکس فضایی (SM) با سه آنتن گیرنده و سه آنتن فرستنده

MIMO به طور مؤثری از چند مسیری بهره می‌برد. در مقابل، آنتن‌های هوشمند مبتنی بر شکل دادن بیم بر مبنای حذف تداخل، در دید مستقیم[۱] یا شرایط نزدیک به آن بهتر عمل می‌کنند. مخصوصاً هنگامی که ملاک بهینه‌سازی مستقیماً به زاویه ورود و خروج بستگی دارد، این موضوع بیشتر صحت دارد. از سوی دیگر آنتن‌های هوشمند مبتنی بر Diversity، در شرایط دید غیر مستقیم خوب عمل می‌کنند، اما در حقیقت آنها می‌کوشند تا چند مسیری را کاهش دهند نه از آن بهره ببرند.

در حالت کلی رتبه[۲] کانال MIMO، به اندازه تعداد معادلات مستقل سیستم خطی ذکر شده، تعریف می‌گردد که با رتبه جبری ماتریس MxN کانال برابر است. واضح است که رتبه همیشه از تعداد هر یک از آنتن‌های فرستنده و گیرنده کمتر است. در مقابل با استفاده از جبر خطی، تعداد سیگنال‌های مستقل که انتظار می‌رود به طور امن توسط سیستم MIMO ارسال شود، حداکثر برابر رتبه ماتریس کانال است. در مثال بالا رتبه سیستم کامل فرض شده است (برابر ۳) و سیستم راندمان طیف اسمی سه را بدون کدینگ نشان می‌دهد. هر چند که در واقع تعداد رشته‌های فرستاده شده و سطح BER در هر رشته (Goodput[۳] در هر آنتن فرستنده، ضرب در

[1] Line Of Sight (LOS)
[2] Rank
[۳] Goodput به عنوان قسمت بدون خطای Throughput لایه فیزیکی معمول، تعریف می‌شود.

تعداد آنتن‌ها)، بازده لینک را تعیین می‌کند نه فقط تعداد رشته‌های ورودی مستقل. از آنجا که استفاده از کدینگ در سیگنال‌های چند آنتنه (کدینگ فضا- زمان) تأثیر زیادی روی BER دارد، کدینگ عنصر مهمی در طراحی MIMO محسوب می‌شود. چگونگی مصالحه بین کدینگ و مالتی پلکس کردن موضوع کلیدیی است، که درباره آن با جزئیات بیشتر در ادامه بحث شده است.

۲-۲- تئوری اطلاعات MIMO

همانطور که گفته شد، سیستم‌های MIMO می‌توانند بهبودهای قابل توجهی را نسبت به آنتن‌های هوشمند در کیفیت خدمات[1] و یا نرخ ارسال ارائه کنند که مبنای آن مالتی پلکس فضایی و Diversity است. در این بخش، مزایایی را که MIMO ارائه می‌کند بر حسب حدود ظرفیت کانال بیان می‌کنیم. ابتدا ظرفیت را در حالت یک ورودی-یک خروجی[2]، یک ورودی- چند خروجی[3] و چند ورودی-چند خروجی[4] با هم مقایسه می‌کنیم. سپس به حالت‌های کلی‌تری می‌رویم که آگاهی اولیه از کانال را به حساب می‌آورد. نهایتاً نتایج حدی را بر حسب تعداد آنتن‌ها یا SNR بیان می-کنیم. البته باید توجه داشت که در اینجا تمرکز ما بر روی ظرفیت کانال برای یک کاربر می‌باشد.

۲-۲-۱- نتایج پایه

برای یک سیستم بدون حافظه 1x1 (SISO) ظرفیت عبارت است از:

$$C = \log_2(1 + \rho|h|^2)\ b/s/Hz \qquad (۱-۲)$$

که h گین مختلط نرمالیزه شده کانال بدون سیم ثابت یا تحقق ویژه یک کانال تصادفی است. در رابطه (۲-۱)،ρ مقدار SNR در آنتن گیرنده است. با افزایش تعداد آنتن‌های گیرنده آمار ظرفیت بهبود می‌یابد و با M آنتن گیرنده، یک سیستم SIMO داریم که ظرفیت آن عبارت است از [9]

$$C = \log_2(1 + \rho \sum_{i=1}^{M}|h_i|^2)b/s/Hz \qquad (۲-۲)$$

که h_i گین کانال برای گیرنده iام است. قابل ذکر است که خاصیت بد (۲-۲) این است که افزایش M، ظرفیت متوسط را تنها به صورت لگاریتمی افزایش می‌دهد. به طور مشابه اگر

---

[1] Quality Of Service (QOS)
[2] Single Input-Single Output (SISO)
[3] Single Input-Multiple Output (SIMO)
[4] Multiple Input-Multiple Output (MIMO)