بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی

عنوان پایان نامه

روش‌های آشکارسازی در سیستم‌های مخابرات MIMO باند باریک

به کوشش

مهدی مایلی

استاد راهنما:

دکتر مهرزاد بیغش

دکتر علیرضا ذوالقدر اصلی

بهمن ۱۳۹۰

به نام خدا

اظهارنامه

اینجانب مهدی مایلی دانشجوی رشته‌ی مهندسی برق- مخابرات گرایش سیستم دانشکده‌ی واحد بین الملل اظهارمی‌کنم که این پایان نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده‌ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته‌ام .همچنین اظهارمی‌کنم که تحقیق و موضوع پایان‌نامه‌ام تکراری نیست و تعهد می‌نمایم که بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آیین نامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

نام ونام خانوادگی:

تاریخ و امضا:

به نام خدا

روش‌های آشکارسازی در سیستم‌های مخابرات MIMO باند باریک

به وسیله‌ی:

مهدی مایلی

پایان نامه:

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی
از فعالیت های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته:

مهندسی برق-مخابرات

از دانشگاه شیراز

واحد بین الملل

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیته‌ی پایان نامه با درجه: **عالی**

دکتر مهرزاد بیغش، دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر(رئیس کمیته).....

دکتر علیرضا ذوالقدر اصلی، دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر(رئیس کمیته).....

دکتر مصطفی درختیان، استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر .....

دکتر عزیزالله جمشیدی، استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر .....

بهمن ۱۳۹۰

تقدیم به

همسر، پدر و مادرم

سپاس‌گزاری

در ابتدا خداوند متعال را شاکرم که به من توفیق انجام این پروژه به بهترین نحو ممکن را عطا فرمود و سپس برخود لازم می دانم از کلیه افرادی که مرا در انجام این پایان نامه یاری رساندند، تشکر و قدردانی نمایم. به خصوص اساتید گرامی، جناب آقای دکتر مهرزاد بیغش و دکتر علیرضا ذوالقدر اصلی که با کمک‌ها و راهنمایی‌های بی‌دریغ خود, مرا در انجام این پایان نامه همراهی کردند و همچنین آقایان دکتر مصطفی درختیان و دکتر عزیزالله جمشیدی که راهنما و مشوق من بودند. در نهایت از خانواده و تمامی دوستانی که در طول انجام این پایان نامه همراه، راهنما و مشوق من بودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده

روش‌های آشکارسازی در سیستم‌های مخابرات MIMO باند باریک

توسط:

مهدی مایلی

در این پایان نامه، هدف اصلی بحث درباره نقش الگوریتم‌های مختلف آشکارسازی در عملکرد سیستم های مخابراتی*MIMO* [1] است. بنابراین، در ابتدا مدل عمومی و کلی این سیستم ها معرفی شده است و سپس مزایای به‌کارگیری آن‌ها در مخابرات بی‌سیم بیان گردیده است. تمرکز اصلی این پایان نامه بر روی الگوریتم‌های آشکارسازی است که برای دمدولاسیون داده‌های ارسالی از آنتن های فرستنده به کار می‌روند و برای تحلیل، از مدل عمومی پیش تر مطرح شده برای سیستم‌های*MIMO* استفاده می‌گردد. از آن جا که در این پایان‌نامه، علاقه اصلی ما به نکات مربوط به الگوریتم‌های مختلف آشکارسازی است، همواره این فرض را در نظر گرفتیم که کانال از قبل به صورت کامل و دقیق تخمین زده شده است. روش های مشهور عملی برای آشکارسازی در سیستم‌های *MIMO* از قبیل آشکارسازهای خطی، آشکارسازهای *V-BLAST*، آشکارسازهای *QRM-ML* و آشکارسازهای کروی مورد بررسی قرار می‌گیرند و ایده‌های اصلی و اساسی این آشکارسازها به صورت جزئی مورد کنکاش قرار می‌گیرد. هم‌چنین، نقاط قوت و ضعف این آشکارسازها بیان گردیده و کارایی آن‌ها، با استفاده از شبیه سازی‌های متعدد و نمودار های نرخ خطای‌سمبل بر حسب نسبت انرژی سیگنال به نویز در هر بیت در ورودی گیرنده بررسی و مقایسه شده است. علاوه بر آن، از آن جا که یک فاکتور مهم در انتخاب و به کارگیری هر روش آشکارسازی، میزان پیچیدگی محاسباتی آن است، نکات و مسائل مربوط به این موضوع به صورت نمودارها و جدول‌هایی برای بحث در مورد پیچیدگی روش‌های مختلف آشکارسازی *MIMO*، فراهم آورده شده است.

[1] - Multiple-input and multiple output

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه..... ۱

۱-۱-تعریف سیستم *MIMO*..... ۱

۱-۲- نگاهی گذرا به تاریخچه‌ی سیستم‌های *MIMO*..... ۲

۱-۳-مزایای استفاده از تکنولوژی *MIMO*..... ۳

۱-۴-مدل ریاضی سیستم *MIMO* ۸

۱-۵-کانال مخابراتی *MIMO* ۱۰

۱-۵-۱-مشخصات فیزیکی کانال *MIMO*..... ۱۰

۱-۵-۲-ظرفیت کانال *MIMO*..... ۱۳

۱-۵-۳-مدل ریاضی کانال *MIMO* ۱۵

۱-۵-۴-مدل کلاسیک کانال مستقل با توزیع یکنواخت و فیدینگ رایلی ۱۶

۱-۶-چالش های موجود در آشکارسازی سیستم‌های *MIMO* ۱۸

۱-۷-مطالب ارائه شده در این پایان‌نامه..... ۱۸

فصل دوم: انواع روش‌های آشکارسازی *MIMO* ۲۰

۲-۱-آشکارساز بهینه *ML* ۲۰

۲-۲-آشکارسازهای خطی..... ۲۲

۲-۲-۱-الگوریتم *ZF*: ۲۳

۲-۲-۲-الگوریتم *MMSE* ۲۵
۲-۲-۳-نتایج شبیه‌سازی آشکارسازهای خطی ۲۸
۲-۳-آشکارسازهای مبتنی بر روش حذف ترتیبی(*V-BLAST*) ۳۱
۲-۳-۱-الگوریتم ۱: (مرتب‌سازی بر پایه معیار *SINR*) ۳۲
۲-۳-۲-الگوریتم ۲: (مرتب‌سازی با معیار *SNR*) ۳۳
۲-۳-۳-الگوریتم ۳: (مرتب‌سازی براساس نرم ستون‌ها) ۳۴
۲-۳-۴-الگوریتم ۴: (مرتب‌سازی بر مبنای سیگنال دریافتی) ۳۴
۲-۳-۵-نتایج شبیه سازی آشکارسازهای *V-BLAST* ۳۵
۲-۴-آشکارسازهای مبتنی بر روش جستجوی درختی ۳۷
۲-۴-۱-آشکارساز *QRM-MLD* ۳۷
۲-۴-۲-نتایج شبیه سازی آشکارسازهای *QRM-MLD* ۴۰
۲-۴-۳-آشکارسازی دی‌کدینگ کروی ۴۳
۲-۴-۴-تشریح الگوریتم دی کدینگ کروی ۴۵
۲-۴-۵-نتایج شبیه‌سازی آشکارساز دی‌کدینگ کروی ۴۸
فصل سوم: محاسبات پیچیدگی روش های آشکارسازی *MIMO* ۵۰
۳-۱-پیچیدگی عملیات های ریاضی ۵۱
۳-۲-پیچیدگی عملیات نگاشت سمبل‌ها بر روی منظومه‌ها مختلف پیکربندی ۵۲
۳-۳-آنالیز پیچیدگی آشکارسازهای خطی ۵۴
۳-۳-۱-پیچیدگی الگوریتم *ZF* ۵۴
۳-۳-۲-محاسبه‌ی پیچیدگی الگوریتم *MMSE* ۵۶
۳-۴-محاسبه ی پیچیدگی روش آشکارسازی *SIC (VBLAST)* ۵۷
۳-۴-۱-پیچیدگی *ZF-VBLAST* ۵۷
۳-۴-۲-پیچیدگی الگوریتم *MMSE-VBLAST* ۶۰
۳-۵-پیچیدگی الگوریتم‌های بر پایه جستجوی *ML* ۶۲
۳-۵-۱-الگوریتم بهینه *ML* ۶۲
۳-۵-۲-الگوریتم *QRM-ML* ۶۳
۳-۵-۳-الگوریتم دی‌کدینگ کروی ۶۵

۳-۶- معرفی الگوریتم *V-BLAST* اسکالر با پیچیدگی بسیار کم..... ۶۶
۳-۶-۱-مروری بر الگوریتم مرسوم *V-BLAST*..... ۶۷
۳-۶-۲-روش *V-BLAST* بازگشتی اسکالر ۶۹
فصل چهارم: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات ۷۳

۴-۱-جمع بندی و نتیجه گیری ۷۳
۴-۲-ارائه پیشنهادات برای ادامه کار ۷۴

فهرست منابع..... ۷۶
ضمایم..... ۸۶
ضمیمه الف..... ۸۶

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول (۲-۱) الگوریتم دی کدینگ کروی..... ۴۸
جدول (۳-۱) پیچیدگی روش‌های مختلف ریاضی ۵۳
جدول (۳-۲) الگوریتم *ZF-VBLAST*..... ۵۷
جدول (۳-۳) الگوریتم *MMSE-VBLAST* ۶۱
جدول (۳-۴) تعداد بردارهای جستجوی *ML* برای سیستم *MIMO* با ۴و۶ آنتن فرستنده برحسب نقاط متفاوت پیکربندی ۶۳
جدول (۳-۵) مقایسه پیچیدگی الگوریتم‌های *MIMO* وقتی که $N_R=N_T=M$..... ۶۳
جدول (۳-۶) تعداد ضرب‌ها و جمع‌های مورد نیاز برای روش‌های مختلف آشکارسازی *VBLAST*..... ۷۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل(۱-۱) نمودار متوسط نرخ ارسال داده بر حسب *SNR* برای پیکربندی‌های متفاوت آنتن‌ها با پهنای باند *100 kHz*. ۴

شکل(۱-۲)- منحنی مصالحه میان گین‌های دایورسیتی و مالتی‌پلکسینگ ۷

شکل(۱-۳) سیستم *MIMO* با N_T آنتن فرستنده و N_R آنتن گیرنده ۹

شکل(۱-۴)-نمودار ظرفیت کانال *MIMO* برای مقادیر مختلف آنتن‌های فرستنده و گیرنده بر حسب *SNR* ۱۵

شکل(۲-۱) سیستم کلی اکوآلایزر خطی ۲۳

شکل(۲-۲) نمودار *SER* بر حسب *SNR* برای پیکر بندی *8-PSK* و روش‌های آشکارسازی خطی و مقایسه آنها با *ML* ۲۹

شکل(۲-۳) نمودار *SER* بر حسب *SNR* برای پیکر بندی *QPSK* و روش‌های آشکارسازی خطی و مقایسه آنها با *ML* ۳۰

شکل (۲-۴) نمودار آشکارسازی بازگشتی برای ۴ رشته اطلاعات فضایی ۳۱

شکل (۲-۵) مقایسه سه روش آشکارسازی *OSIC* با استفاده از نرخ خطای سمبل به انرژی سیگنال به نویز برای *QPSK* ۳۶

شکل(۲-۶) مقایسه سه روش آشکارسازی *OSIC* با استفاده از نرخ خطای سمبل به انرژی سیگنال به نویز برای *16QAM* ۳۷

شکل(۲-۷) نمودار *SER* برحسب انرژی سیگنال به نویز برای الگوریتم *QRM-MLD* با مقادیر *M=2,4,8,16* ۴۱

شکل (۲-۸)مقایسه الگوریتم *ML* و*QRM-MLD* برای پیکربندی *8-PSK* ۴۲
شکل(۲-۹)مقایسه الگوریتم *ML* و*QRM-MLD* برای پیکربندی *QPSK* ۴۲
شکل(۲-۱۰) شبکه‌ی مستطیل دوبعدی فرضی ۴۳
شکل(۲-۱۱) توصیف هندسی مساله حداقل مربعات صحیح ۴۴
شکل(۲-۱۲) توصیف هندسی کره چندبعدی در فضای لتیس ۴۶
شکل(۲-۱۳) نمودار کارایی *SER* بر حسب *SNR* برای آشکارسازهای *SD* و *ML* ۴۹
شکل(۳-۱) نمودار پیچیدگی محاسباتی *SD* با معیار تعداد نقاط جستجو بر حسب *SNR* ۶۶
شکل(۳-۲)الگوریتم چندلایه‌ای اسکالر بازگشتی *VBLAST* ۷۲
شکل(۳-۳) نمودار تعداد ضرب‌های مورد نیاز بر حسب تعداد جفت آنتن‌ها برای سه روش مختلف آشکارسازی ۷۲

فصل ۱

مقدمه

۱-۱- تعریف سیستم *MIMO*:

در تعریف کلی به سیستمی *MIMO* گویند که شامل آنتن های چندگانه در هر دو سمت فرستنده و گیرنده باشد که به آن *MEA (Multi- Element Arrays)* نیز می گویند. در سیستم *MIMO* تعداد N_T آنتن فرستنده و N_R آنتن گیرنده داریم. اطلاعات ارسالی به N_T رشته تقسیم می شوند و هر رشته به یک آنتن داده می شود تا ارسال شود. آنتن های ارسالی همگی در هر سمبل ارسالی سنکرون می باشند و از باند فرکانس یکسانی استفاده می کنند و از پیکربندی سیگنال یکسان $S=\left\{s_1,s_2,...,s_{2^b}\right\}$ استفاده می کنند که b تعداد بیت های اطلاعات ارسالی را نمایش می دهد که توسط هر سیگنال در S ارسال می شود. پیکربندی ها دو بعدی فرض می شوند و انرژی متوسط سمبل E_s می باشد همچنین فرض می کنیم که تمامی سمبل ها دارای احتمال یکسان می باشند. استفاده از این تکنولوژی از محبوبیت زیادی در دهه‌ی اخیر برخوردار است که به خاطر قابلیت افزایش کارایی زیاد این سیستم‌ها است [۱]. مخابرات در کانال‌های بی‌سیم توسط فیدینگ چندمسیری عموماً خراب می‌شود. مالتی‌پد[1] پدیده‌ی رسیدن سیگنال ارسالی به گیرنده‌ی موردنظر با زوایای مختلف و یا با تأخیرهای زمانی متفاوت و یا با شیفت‌های فرکانسی متفاوت (داپلر[2]) به علت مسدود شدن امواج الکترومغناطیس در محیط

[1] - Multipath
[2] -Duppler

می‌باشد. بنابراین توان سیگنال دریافتی دارای تغییراتی در فضا (به خاطر انتشار زاویه‌ای) و یا تغییر فرکانس (به خاطر پدیده‌ی تأخیر) و یا تغییر زمانی (به خاطر پدیده داپلر) برای مجموع تمامی مولفه‌های چند مسیره می‌باشد. این تغییرات تصادفی در میزان سیگنال به فیدینگ[1] معروف می‌باشد و می‌تواند به طور جدی بر روی کیفیت و قابلیت اعتماد مخابرات بی‌سیم تأثیر بگذارد. بایستی متذکر شویم که محدودیت‌های عملی نظیر محدودیت توان و کمبود باند فرکانس، وظیفه‌ی طراحی نرخ‌های ارسال بالا و قابلیت اعتماد بالا در سیستم‌های بی‌سیم به یک پدیده‌ی چالش برانگیز تبدیل می‌کند.

۱-۲- نگاهی گذرا به تاریخچه‌ی سیستم‌های *MIMO*

مانند بسیاری از سیستم‌های مورد استفاده امروزی در زمینه‌ی مخابرات دیجیتال، مفهوم سیستم‌های *MIMO* ایده‌ای است که استفاده‌ی آن به سالهای قبل یعنی ۱۹۷۰ برمی‌گردد که به عنوان مدلی برای کابل‌های تلفنی چند زوجه مورد مطالعه قرار گرفته بود. احتمالاً اولین مطالعه در این زمینه مقاله‌ی *kaye* و *George* [۲] بود که در آن گیرنده‌ی خطی بهینه‌ی مدولاسیون سیگنال *PAM* را برای سیستم *MIMO* فرکانس گزین بدست آورده بود. چند سال بعد ظرفیت اطلاعاتی کانال‌های *MIMO* توسط *Brandenbury* و *Wyner* [۳] محاسبه گردید. همچنین بعد از یک دهه [۴]*salz wyner* فیلترهای گیرنده‌ی بهینه در سیستم‌های *MIMO* با تعداد دلخواه ورودی و خروجی ار مورد بررسی قرار دادند. در سال ۱۹۸۷، وینترز [۵] ظرفیت کانال *MIMO* در محیط‌های با فیدینگ رایلی را مورد بررسی قرار داد. با توجه به تحقیقات انجام گرفته در این سالها می‌توان دریافت اگرچه مزایای *MIMO* در مقایسه با سیستم‌های معمول مخابراتی تک ورودی-تک خروجی بیش از ۲ دهه کاملاً شناخته شده بود، اما پیچیدگی این سیستم‌ها از لحاظ طراحی فرکانس رادیویی و آشکارسازی سیگنال‌ها موجب عدم

[1] -Fading

پیاده‌سازی عملی این سیستم‌ها شده بود تا در سال ۱۹۹۶ فوشینی[1]، معماری لایه‌ای زمان فضا[2] را پایه‌گذاری کرد که بعدها به معماری *BLAST*[3] منسوب شد.

در این مقاله[۶] فوشینی الگوریتمی را پیشنهاد کرد که در آن رشته‌ی اطلاعات ارسالی به چندین شاخه تقسیم می‌شود و بعد از کدینگ توسط آنتن‌های مختلف ارسال می‌گردد. این ایده مهمترین ایده‌ی سیستم‌های *MIMO* برای پیاده‌سازی عملی می‌باشد و به همین دلیل تا به حال پیشرفت‌های زیادی بر روی آن صورت گرفته است.

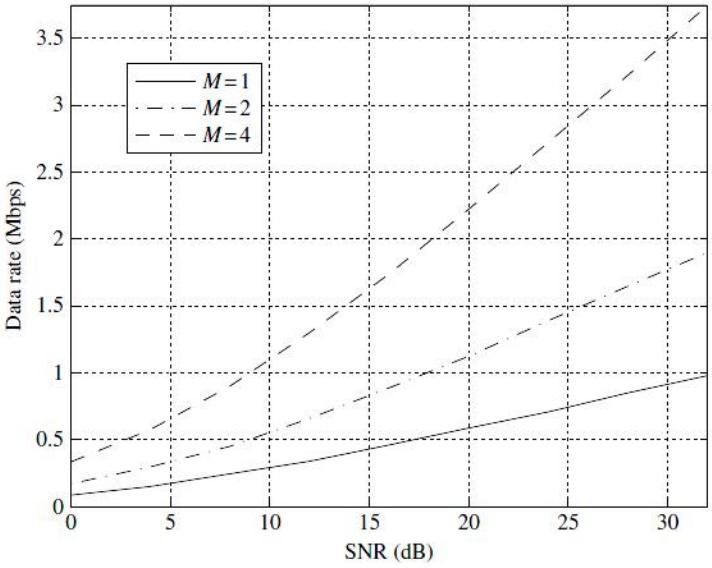
در سال ۱۹۹۸، فوشینی و گانز [۷] فرمول ظرفیت شانون را برای سیستم‌های *MIMO* تعمیم دادند و یکی از مهمترین نتایج آن این بود که تحت برخی شرایط فیدینگ تا حداکثر مقدار $min(N_T,N_R)$، (که N_R و N_T تعداد آنتن‌های گیرنده و فرستنده می‌باشند.) می‌توانیم رشته‌های اطلاعاتی را به صورت همزمان روی کانال مخابراتی *MIMO* ارسال کنیم. امروزه با توجه به اینکه تکنولوژی *MIMO* روز به روز در حال گسترش است و استفاده‌ی آن در استانداردهای مخابرات امروزی نظیر *802.11n*، *LTE* و *WiMAX* رایج شده است، لذا بررسی این سیستم‌ها از لحاظ پیچیدگی، مقرون به صرفه بودن، احتمال خطا و جنبه‌های دیگر همواره از موضوعات مورد علاقه تحقیقات در زمینه‌ی *MIMO* می‌باشد.

۱-۳-مزایای استفاده از تکنولوژی *MIMO*

تکنولوژی *MIMO* مانند یک اختراع مهم در طراحی سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم می‌باشد. این تکنولوژی فوایدی را ارائه می‌کند که به فیدینگ در کانال‌های مخابراتی نه تنها به عنوان اثر مخرب بلکه به عنوان یک پدیده‌ی کمکی و یک ابزار بهینه نگاه می‌کند. با اضافه کردن یک بعد علاوه بر بعد زمان و مکان و فرکانس که در سیستم‌های مرسوم *SISO* استفاده می‌شد، *MIMO* می‌تواند کارایی بالاتری را با استفاده از بعد فضا بدست آورد که توسط استفاده از آنتن‌های چندگانه در فرستنده و گیرنده انجام می‌گیرد[۸و۹].

[1] - Foschini
[2] -Layered Space-Time architecture
[3] -Bell Laboratories Layered Space-Time

کارایی استفاده از آنتن‌های چندگانه در شکل (۱-۱) مشخص می‌شود که نرخ ارسال داده را برحسب *SNR* برای پیکربندی‌های مختلف $M \times M$ به ازای $M=1,2,4$ نشان می‌دهد. پاسخ ضربه‌ی کانال برای هر سه حالت یکسان در نظر گرفته شده است. با فرض *SNR* دریافتی ۲۵ دسی‌بل، سیستم مخابراتی *SISO* نرخ ارسال داده‌ی *0.7Mbps* را ارائه می‌دهد و برای *MIMO*، *2×2* و *4×4* به ترتیب نرخ ارسال داده به *1.4* و *2.8* افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که این افزایش نرخ ارسال داده با فرض ثابت بودن توان و پهنای باند نسبت به سیستم تک آنتنی مرسوم صورت می‌گیرد. در واقع سیستم تک ورودی تک خروجی تنها در صورتی می‌تواند به نرخ ارسال داده‌ی *2.8Mbps* دست یابد که یا پهنای باند از *100kHz* به *400kHz* افزایش یابد و یا با فرض ثابت بودن پهنای باند در *100kHz* ، *SNR* دریافتی در گیرنده به *88dB* افزایش یابد. نتایج بدست آمده در این نمودار براساس گیرنده‌ی بهینه می‌باشد و در عمل مقادیر بدست آمده برای نرخ ارسال داده کمتر از این مقادیر می‌باشد.



شکل(۱-۱) نمودار متوسط نرخ ارسال داده بر حسب *SNR* برای پیکربندی‌های متفاوت آنتن‌ها با پهنای باند *100 kHz* [۹]

در ادامه به معرفی فوایدی می‌پردازیم که سیستم *MIMO* به ما ارائه می‌دهد:

الف- گین آرایه‌ای :

سیستم های با آنتن چندگانه، گین آرایه ای را ارائه می دهند که مربوط به افزایش متوسط نسبت سیگنال به نویز گیرنده در مقایسه با سیستم های تک آنتنی می باشد. این گین

همچنین می تواند برای سیستم ها $SIMO$ و $MISO$ با اطلاعات حالت کانال[1] مناسب تعریف شود. این گین سبب افزایش مقاومت سیستم نسبت به نویز می‌گردد ودر نتیجه موجب بهبود محدوده تحت پوشش شبکه می‌گردد.

ب-گین دایورسیتی فضایی :

هدف دایورسیتی فضایی ایجاد ارتباط با قابلیت اعتماد بالاتری می باشد و هیچ گونه افزایش در سرعت انتقال اطلاعات نداریم در واقع اگر تعداد متعددی کپی از یک سیگنال اطلاعات از طریق خط های ارتباطی با فیدینگ متفاوت دریافت شود، گین دایورسیتی می تواند حاصل شود. بنابراین با افزایش تعداد کپی‌های سیگنال مستقل، احتمال اینکه تمامی کپی های سیگنال به طور همزمان به فیدینگ عمیق بروند کاهش می یابد و اگر تعداد کانال های مستقل خیلی زیاد باشد این احتمال بسیار به صفر نزدیک می شود و به این خاطر قابلیت اعتماد کانال بهبود می یابد. اگر احتمال این که سیگنال روی یک کانال به فیدینگ عمیق رود P باشد و d کانال مستقل داشته باشیم احتمال فیدینگ همزمان به P^d کاهش می یابد. که این بدین معنی است که مرتبه ی دایورسیتی d می باشد. متذکر می شویم که تعداد شاخه های فیزیکی و مرتبه ی دایورسیتی واقعی همیشه با هم برابر نیست و معمولاً کمتر از d می باشد. اما استفاده از تکنیک های موثر کدینگ می تواند d را از تعداد شاخه‌ها هم بیشتر کند[۱۰]. به طور کلی در سیستم‌های $MIMO$، مرتبه‌ی دایورسیتی می‌تواند تا مقدار $d = N_R.N_T$ افزایش یابد و سبب بهبود کیفیت و قابلیت اعتماد سیستم گردد. تعداد متفاوتی از مفاهیم دایورسیتی را میتوان با توجه به تشریح فیزیکی آنها بیان نمود. در سیستم های $MISO, SIMO, MIMO$ هنگامی با دایورسیتی فضایی سروکار داریم که کپی‌های چندگانه‌ی سیگنال از طریق آنتن‌های متفاوت که به صورت فضایی از هم فاصله دارند، حاصل می‌شوند. در حالت $SIMO$ تنها دایورسیتی گیرنده داریم که اگر اطلاعات وضعیت کانال در گیرنده در دسترس باشد، می‌تواند از طریق مجموعه‌ی مربوط به تمامی سیگنال‌های دریافتی مورد استفاده قرار گیرد. بدست آوردن دایورسیتی فرستنده در سیستم $MISO$ می تواند پیچیده تر باشد زیرا فرستنده، احتمالاً اطلاعات وضعیت دقیق کانال را ندارد [۱۱]، اگرچه با استفاده از کدهای زمان- فضای مناسب

[1] -Channel State Information

[۱۲و۱۳] می توان دایورسیتی فرستنده را بدست آورد. در حالت *MIMO*، هم دایورسیتی گیرنده و هم فرستنده موجود است.

ج- گین مالتی پلکسینگ فضایی :

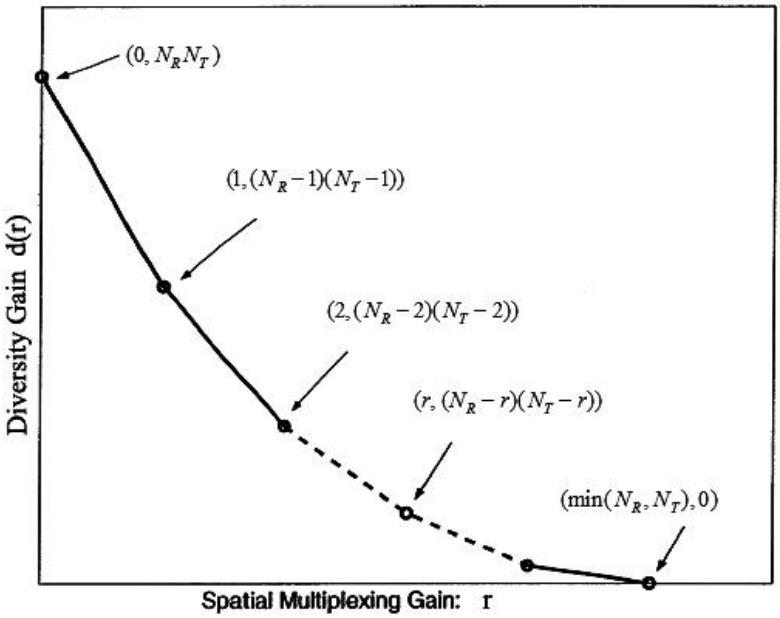
این گین به بعدهای فضایی چند گانه ای که توسط سیستم های *MIMO* ارائه می شود، اشاره دارد. این ابعاد فضایی می توانند برای ارسال داده های متفاوت به صورت موازی که سبب افزایش نرخ ارسال داده می شود، به کار برده شوند. در واقع، ظرفیت کانال *MIMO* می‌تواند به صورت خطی به نسبت می‌نی‌مم تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده افزایش یابد[۱۳و۱۴]. این گین تنها برای سیستم *MIMO* تعریف می‌شود و می‌تواند توسط طرح کلی مالتی‌پلکسینگ *(SM)* فضایی ایجاد شود، به این ترتیب که رشته های داده‌ی مستقل به صورت موازی از هر آنتن فرستنده که این آنتن ها در فضا تسهیم شده‌اند، ارسال می‌گردند[۱۵]. هنگامی که محیط مخابراتی حاوی تعداد زیادی پراکنده کننده باشد و ماتریس کانال به صورت خوش شرط[1] باشد، رشته‌های اطلاعاتی می‌توانند در گیرنده از هم تفکیک گردند. بنابراین، ظرفیت کانال به صورت مضربی از تعداد رشته‌های مستقل اطلاعاتی افزایش می‌یابد. به طور کلی تعداد رشته‌های مستقل اطلاعاتی در یک سیستم *MIMO* می‌تواند تا حداکثر مقدار می‌نی‌مم تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده افزایش یابد.

د- حذف و کاهش تداخل :

تداخل در شبکه‌های بی‌سیم از استفاده‌ی منابع مشترک فرکانسی و زمانی ناشی می‌شود. تداخل در این شبکه‌ها می‌تواند توسط استفاده از بُعد فضا و ایجاد فاصله‌ی بیشتر میان آنتن‌ها و یا کاربرها کاهش یابد. که این کار توسط هدایت کردن انرژی سیگنال به سمت کاربر مورد نظر و در نتیجه کم شدن تداخل برای دیگر کاربران صورت می‌گیرد. تکنولوژی به کار رفته در آنتن ها کلید افزایش ظرفیت شبکه های امروزی می باشد. این تکنولوژی با آنتن های جهت دار شروع شد که این آنتن ها معمولاً به صورت ۶۰ یا ۱۲۰ درجه پرتو افشانی می کنند و به مانند یک سلول عمل می کنند. به عنوان مثال در یک سیستم *GSM* با استفاده از آنتن های جهت دار ۱۲۰ درجه، ظرفیت را می توان تا سه برابر افزایش داد. آرایه های آنتن های وفقی می

[1] -Well conditioned

توانند توسط بیم های باریک به مالتی پلکسینگ فضایی دست یابند[۱۷]. آنـتن هـای هوشـمند نیز به دسته‌ی آنتن های وفقی تعلق دارند اما از لحاظ تخمین جهت دسترسی هوشمند متفاوت می باشند. این آنتن‌ها می توانند برای هر کار بیم خاصی را تشکیل دهند و با فیـدبک اختیـاری می تواند پیچیدگی سیستم آرایه ای را کـاهش دهنـد و سـبب کـاهش تـداخل چشـمگیری در سیستم‌های مخابرات بی‌سیم گردند. حـذف و کـاهش تـداخل در سیسـتم‌هـای *MIMO* سـبب افزایش محدوده پوششی شبکه می‌گردد.



شکل(۱-۲) - منحنی مصالحه میان گین‌های دایورسیتی و مالتی‌پلکسینگ[۱۶]

به طور کلی نمی‌توانیم از تمامی بهره‌های کانال *MIMO* به طور همزمان استفاده کنیم ولـی با استفاده از ترکیب این بهره‌ها در یک شبکه‌ی بی‌سیم مخابراتی *MIMO* مـی‌تـوانیم ظرفیـت، پوشش شبکه و قابلیت اعتماد کانال را بهبود بخشیم. همواره یک مصـالحه اساسـی میـان گـین دایورسیتی فضایی و گین مالتی پلکسینگ فضایی برقـرار مـی‌باشـد. شـکل (۱-۲) معـرف ایـن مصالحه است که برای حالتی است که کانال با فیدینگ آهسته‌ی رایلی و در طـول ارسـال یـک فریم ثابت باشد. ملاحظه می‌گردد که ماکزیمم گین دایورسیتی زمانی حاصل می‌شود کـه گـین مالتی پلکسینگ صفر گردد و برای دستیابی به گین مالتی پلکسینگ r، گین دایورسیتی برابر با $(N_R-r)(N_T-r)$ می‌شود. منحنی مصالحه به عنوان یک چهارچوب و شاخص برای مقایسـه‌ی