



دانشگاه فردوسی مشهد  
دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق

رساله دکتری

**حذف ICI و ISI در کانال های MIMO انتخابگر فرکانسی  
مبتنی بر روش های کدینگ فضایی-زمانی و SVD**

ایمان احدی اخلاقی

استاد راهنما: دکتر حسین خوشبین

خرداد ۱۳۸۸

# تقدیم

تقدیم به همسر عزیزم و خانواده خوبم

# تقدیر و تشکر

با سپاس ویژه از استاد گرامی، جناب آقای دکتر خوشبین

با سپاس از اساتید محترم، آقایان دکتر مولوی، دکتر حسینی خیاط، دکتر اردبیلی پور و دکتر کهایلی

با سپاس از مسئولین محترم مرکز تحقیقات مخابرات و کامپیوتر دانشگاه فردوسی مشهد

با سپاس از مسئولین محترم مرکز تحقیقات مخابرات ایران

با سپاس فراوان از مدیریت و کلیه دوستان و همکاران خوبم در مؤسسه آموزش عالی سجاد مشهد

## چکیده:

در این رساله، در ابتدا تداخل های بین کانالی و بین سمبلی در کانال های چند ورودی-چند خروجی انتخابگر فرکانسی معرفی می شوند و مورد بررسی قرار می گیرند. سپس روش هایی جدید برای غلبه بر این تداخل ها معرفی می شوند. از آنجایی که نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد از بین روش های موجود، روش های مبتنی بر تجزیه ی مقادیر تکین کارآیی بهتری دارند، برای حذف تداخل بین کانالی در کانال های غیر انتخابگر فرکانسی و تخت، دو روش وفقی برای تخمین تجزیه ی مقادیر تکین ماتریس کانال پیشنهاد می شود. با استفاده از این دو روش می توان همسانساز و پیش کدگذار مناسبی جهت حذف تداخل بین کانالی طراحی کرد. سپس، برای کانال های انتخابگر فرکانسی که علاوه بر تداخل بین کانالی از تداخل بین سمبلی نیز متأثرند، مفهوم تجزیه ی مقادیر تکین تعمیم داده می شود و با استفاده از آن، ساختاری جهت حذف تداخل های بین کانالی و بین سمبلی در کانال های انتخابگر فرکانسی معرفی می شود.

برای محاسبه ی تجزیه ی مقادیر تکین تعمیم یافته، جهت ماتریس چند جمله ای مربوط به کانال های انتخابگر فرکانسی، دو روش مختلف پیشنهاد می شود. در روش پیشنهادی اول از الگوریتم ژنتیک برای این منظور استفاده می شود که علاوه بر حذف تداخل بین کانالی می تواند به طور همزمان تداخل بین سمبلی را نیز حذف کند. این روش علیرغم داشتن کارآیی مناسب، از سرعت خوبی برخوردار نیست. در روش دوم، یک الگوریتم تحلیلی و ریاضی جهت محاسبه ی تجزیه ی مقادیر تکین ماتریس کانال معرفی می شود. در این روش، تجزیه ی مقادیر تکین ماتریس چند جمله ای مربوط به کانال انتخابگر فرکانسی به صورت تحلیلی و پارامتری محاسبه می شود و سپس با به کار بردن بسط تیلور، ماتریس های متناظر با فیلتر های همسانساز و پیش کدگذار با پاسخ ضربه ی محدود تولید می شوند. لازم به ذکر است فیلتر های طراحی شده با این روش به صورت عملی قابل پیاده سازی هستند. نحوه ی عملکرد این روش که به دلیل تحلیلی بودن سرعت بسیار بالایی دارد و قابل استفاده در سیستم های بلادرنگ می باشد، در یک مثال به طور کامل توضیح داده شده است.

در انتها نیز یک نوع کدینگ فضایی-زمانی جدید برای حذف تداخل بین سمبلی با استفاده از چندگانگی فضایی معرفی می شود. در این روش، بر روی بعضی از آنتن های فرستنده سیگنال هایی ارسال می شوند که باعث می شوند در گیرنده جمله ی مربوط به تداخل بین سمبلی حذف گردد. با به کار بردن این کدینگ پیشنهادی می توان یک کانال چند ورودی-چند خروجی انتخابگر فرکانسی را به یک کانال تخت تبدیل کرد. مزیت این روش علاوه بر سرعت بسیار بالا و پیچیدگی پایین آن در مقایسه با سایر روش ها، این است که برخلاف روش های دیگر، افزایش طول حافظه کانال باعث پیچیدگی همسانسازی آن نمی شود. نتایج شبیه سازی ها نیز نشان از کارآیی بسیار بالای این روش دارند. در نهایت با توجه به مطالب فوق می توان روش های پیشنهادی در این پروژه را به عنوان جایگزین های مناسبی برای سیستم های متداول چند ورودی-چند خروجی انتخابگر فرکانسی در نظر گرفت.

## کلمات کلیدی:

کانال MIMO انتخابگر فرکانسی، تداخل بین کانالی ICI، تداخل بین سمبلی ISI، تجزیه مقادیر تکین SVD، الگوریتم ژنتیک، روش پارامتری، چندگانگی فضایی، کدینگ فضایی زمانی.

# فهرست مطالب

فصل اول:

۱..... مقدمه

فصل دوم:

۵..... کانال های چند ورودی-چند خروجی

۵-۱-۲..... کانال های چند ورودی-چند خروجی تخت

۶-۲..... کانال های چند ورودی-چند خروجی انتخابگر فرکانسی

۹-۲..... مزایای سیستم های چند ورودی-چند خروجی

۱۰-۲..... تخمین کانال در سیستم های چند ورودی-چند خروجی

۱۱-۴-۲..... روش وینر-هاف

۱۴-۴-۲..... تخمین وقتی کانال

۱۶-۴-۲..... نتایج شبیه سازی روش های مختلف تخمین کانال

۲۲-۵..... جمع بندی و نتیجه گیری

فصل سوم:

۲۳..... تداخل در کانال های MIMO

۲۳-۱-۳..... تداخل های بین کانالی و بین سمبلی در کانال های چند ورودی-چند خروجی

۲۴-۲-۳..... روش های کاهش و حذف تداخل بین کانالی

۲۴-۱-۲-۳..... روش بهینه‌ی بیشترین درستی  $ML$

۲۵-۲-۲-۳..... روش  $ZF$

۲۵-۳-۲-۳..... روش  $MMSE$

۲۵-۴-۲-۳..... گیرنده  $SUC$

۲۶-۵-۲-۳..... استفاده از تجزیه‌ی  $QR$

۲۷-۶-۲-۳..... استفاده از تجزیه‌ی  $SVD$

۲۸-۷-۲-۳..... روش  $SBR2$

۲۹-۸-۲-۳..... نتایج شبیه سازی روش های مختلف کاهش میزان تداخل بین کانالی

۳۲-۳-۳..... روش های کاهش میزان تداخل بین سمبلی

۳۲-۱-۳-۳..... استفاده از همسانساز و پیش کدگذار

۳۳-۲-۳-۳..... تبدیل یک کانال انتخابگر فرکانسی به چند زیر کانال تخت با مدولاسیون های چند حامله و روش  $OFDM$

۳۶-۴-۳..... جمع بندی و نتیجه گیری

## فصل چهارم:

|  |          |
|--|----------|
| حذف تداخل (با استفاده از تجزیه مقادیر تکین).....                             | ۳۷       |
| ۱-۴ مشکلات روش OFDM.....   | ۳۷       |
| ۱-۱-۴ بالا بودن نسبت توان بیشینه به توان متوسط.....                          | ۳۸       |
| ۲-۱-۴ مشکل حساسیت به غیر خطی بودن سیستم.....                                 | ۳۸       |
| حذف تصویر.....   | ۳۸-۱-۴   |
| ۴-۱-۴ اعوجاج و نویز فاز.....   | ۳۹       |
| حذف تداخل با استفاده از تجزیه مقادیر تکین در کانال های تخت.....              | ۳۹-۲-۴   |
| روش مستقیم.....  | ۳۹-۱-۲-۴ |
| روش وقتی.....  | ۴۱-۲-۲-۴ |
| روش پیشنهادی اول برای تخمین SVD کانال.....                                   | ۴۱       |
| روش پیشنهادی دوم برای تخمین SVD کانال.....                                   | ۴۲       |
| شبیه سازی ها و مقایسه ی نتایج.....   | ۴۴       |
| حذف تداخل با استفاده از تجزیه مقادیر تکین در کانال های انتخابگر فرکانسی..... | ۴۹-۳-۴   |
| تجزیه SVD برای ماتریس های چند جمله ای.....                                   | ۴۹-۱-۳-۴ |
| روش پیشنهادی استفاده از GA.....  | ۵۱-۲-۳-۴ |
| کدینگ.....   | ۵۲       |
| تابع برازندگی.....   | ۵۲       |
| نتایج شبیه سازی ها.....  | ۵۳       |
| روش پیشنهادی پارامتری و استفاده از بسط تیلور.....                            | ۵۵-۳-۳-۴ |
| استفاده از بسط تیلور برای تبدیل یک فیلتر IIR به فیلتر FIR.....               | ۵۸       |
| جمع بندی الگوریتم.....   | ۶۰       |
| نتایج شبیه سازی.....   | ۶۱       |
| جمع بندی و نتیجه گیری.....   | ۶۳-۴-۴   |

## فصل پنجم:

|   |          |
|---|----------|
| حذف ISI با استفاده از چندگانگی فضایی.....   | ۶۴       |
| ۱-۵ معادل بودن تداخل های بین کانالی و بین سمبلی از نظر ریاضی.....                     | ۶۴       |
| ۲-۵ پیشنهاد یک نوع کدینگ فضایی-زمانی جدید و حذف ISI با استفاده از چندگانگی فضایی..... | ۶۶       |
| ۱-۲-۵ پیشنهاد تعمیمی برای کانال های با طول حافظه ی بیشتر.....                         | ۶۸       |
| نتایج شبیه سازی.....  | ۶۹-۲-۲-۵ |
| استفاده از چندگانگی فضایی در کانال های انتخابگر فرکانسی.....                          | ۷۱-۳-۵   |
| کدینگ الموتی.....   | ۷۱-۱-۳-۵ |
| ترکیب کد فضایی-زمانی پیشنهادی و کد فضایی-زمانی الموتی.....                            | ۷۲-۲-۳-۵ |

|         |   |
|---------|---|
| ۷۴..... | ۴-۵ تعمیم کدینگ پیشنهادی برای حالت MIMO |
| ۷۵..... | ۱-۴-۵ رتبه‌ی چندگانگی                   |
| ۷۷..... | ۲-۴-۵ کانال MIMO تخت معادل              |
| ۸۲..... | ۵-۵ جمع بندی و نتیجه گیری               |

## فصل ششم:

|         |  |
|---------|--|
| ۸۳..... | نتیجه گیری و پیشنهادات   |
| ۸۳..... | ۱-۶ جمع بندی و نتیجه گیری  |
| ۸۶..... | ۲-۶ پیشنهادات  |
| ۸۶..... | ۱-۲-۶ تخمین وقتی کانال های چند ورودی-چند خروجی انتخابگر فرکانسی با روشی غیر از LMS             |
| ۸۶..... | ۲-۲-۶ تخمین وقتی تجزیه‌ی مقادیر تکین ماتریس کانال تخت با روشی غیر از LMS                       |
| ۸۷..... | ۳-۲-۶ فرمول بندی و توسعه‌ی تجزیه‌ی QR برای کانال های انتخابگر فرکانسی                          |
| ۸۷..... | ۴-۲-۶ فرمول بندی روش SBR2 به صورت بسته   |
| ۸۷..... | ۵-۲-۶ استفاده از الگوریتم ژنتیک و روش پارامتری جهت تخمین تجزیه‌ی QR برای حالت انتخابگر فرکانسی |
| ۸۸..... | ۶-۲-۶ استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه   |
| ۸۸..... | ۷-۲-۶ تخمین فیلترهای ایده‌آل در روش پارامتری با فیلترهای IIR                                   |
| ۸۹..... | ۸-۲-۶ اختصاص قسمتی از پردازش سیگنال کدینگ فضایی-زمانی پیشنهادی به طرف گیرنده                   |
| ۹۰..... | مراجع  |
| ۹۵..... | فهرست مقالات   |
| ۹۶..... | فهرست نوآوری ها  |

# فهرست شکل ها و جداول

- شکل ۱-۲- یک سیستم چند ورودی-چند خروجی با  $N$  آنتن فرستنده و  $M$  آنتن گیرنده. .... ۸
- شکل ۲-۲- ساختار وقتی  $LMS$  برای تخمین کانال چند ورودی-چند خروجی. .... ۱۵
- شکل ۳-۲- خطای تخمین کانال با روش های فیلتر وینر و فیلتر وقتی  $LMS$  وقتی  $M = 1$ . .... ۱۸
- شکل ۴-۲- خطای تخمین کانال با روش های فیلتر وینر و فیلتر وقتی  $LMS$  وقتی  $M = 2$ . .... ۱۹
- شکل ۵-۲- خطای تخمین کانال با روش های فیلتر وینر و فیلتر وقتی  $LMS$  وقتی  $M = 3$ . .... ۲۱
- شکل ۱-۳- به کار بردن تجزیه ی مقادیر تکین برای حذف تداخل. .... ۲۷
- شکل ۲-۳- منحنی  $BER$  بر حسب نسبت سیگنال به نویز برای روش های مختلف و ابعاد مختلف کانال. .... ۳۱
- شکل ۳-۳- پاسخ فرکانسی یک کانال انتخابگر فرکانسی و تبدیل آن به زیر کانال های تخت. .... ۳۳
- شکل ۴-۳- پاسخ فرکانسی زیرکانال های ناشی از حامل های متعامد برای حذف تداخل بین زیرکانال های مجاور. .... ۳۴
- شکل ۵-۳- ساختار به کار رفته در روش مدولاسیون چند حاملی  $OFDM$ . .... ۳۵
- شکل ۶-۳- نمونه ای از ساختار  $MIMO - OFDM$ . .... ۳۵
- شکل ۱-۴- نحوه ی استفاده از  $SVD$  برای حذف تداخل کانال های چند ورودی، چند خروجی. .... ۴۰
- شکل ۲-۴- ساختار های وقتی به کار رفته برای تخمین  $SVD$  کانال. .... ۴۱
- شکل ۳-۴- خطای مقادیر تکین بر حسب  $SNR$ . .... ۴۵
- شکل ۴-۴- خطای تخمین ماتریس کانال ( $\hat{H} = \hat{U}\hat{S}\hat{V}^H$ ) بر حسب  $SNR$ . .... ۴۵
- شکل ۵-۴- خطای قطری بودن کانال بعد از اعمال ماتریس های  $\hat{U}^H$  و  $\hat{V}$  بر حسب  $SNR$ . .... ۴۶
- شکل ۶-۴- نحوه ی همگرایی فیلتر وقتی ( $W_2$ ) مورد استفاده برای تخمین  $SV^H$ . .... ۴۸
- شکل ۷-۴- کدینگ به کار رفته و ساختمان هر کروموزوم. .... ۵۲
- شکل ۸-۴- نحوه ی همگرایی الگوریتم. .... ۵۴
- شکل ۹-۴- همبستگی بین نمونه های زمانی خروجی های کانال قبل و بعد از اعمال فیلتر ها. .... ۵۵

- جدول ۴-۱- ماتریس‌های بردار تکین یک ماتریس پارامتری ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۰- تأثیر نقطه‌ی مرکزی بر روی دقت تقریب ناشی از بسط تیلور..... ۵۹
- شکل ۴-۱۱- پاسخ فرکانسی یک فیلتر IIR و تقریب FIR آن با استفاده از بسط تیلور. .... ۶۰
- شکل ۴-۱۲- ضریب همبستگی متقابل بین خروجی‌های کانال *MIMO* انتخابگر فرکانسی ..... ۶۱
- جدول ۴-۲- مقایسه‌ی زمان اجرای الگوریتم‌های پیشنهادی ..... ۶۲
- شکل ۵-۱- یک کانال *MISO* دو ورودی-یک خروجی با طول حافظه‌ی  $L = 2$  ..... ۶۶
- شکل ۵-۲- کد فضایی-زمانی پیشنهادی برای حذف تداخل بین سمبلی برای دو فرستنده و یک گیرنده..... ۶۸
- شکل ۵-۳- منحنی مکان اولین خطا بر حسب خطای تخمین کانال. .... ۷۰
- شکل ۵-۴- منحنی مکان اولین خطا بر حسب نسبت سیگنال به نویز. .... ۷۰
- شکل ۵-۵- نحوه‌ی ارسال سمبل‌ها در کد الموتی. .... ۷۱
- شکل ۵-۶- رتبه‌ی چندگانگی کل وقتی  $M = 2$  ..... ۷۶
- شکل ۵-۷- رتبه‌ی چندگانگی کل وقتی  $N = 10$  ..... ۷۶
- شکل ۵-۸- رتبه‌ی چندگانگی کل وقتی  $M$  مقدار بهینه‌ی خود را داشته باشد ..... ۷۶
- شکل ۵-۹- تبدیل کانال *MIMO* انتخابگر فرکانسی به *MIMO* تخت و استفاده از *SVD* برای حذف *ICI* ..... ۷۸
- شکل ۵-۱۰- منحنی نرخ خطای بیت بر حسب نسبت سیگنال به نویز برای کانال تخت معادل وقتی  $M = 1$  ..... ۷۹
- شکل ۵-۱۱- منحنی نرخ خطای بیت بر حسب نسبت سیگنال به نویز برای کانال تخت معادل وقتی  $M = 2$  ..... ۸۰
- شکل ۵-۱۲- منحنی نرخ خطای بیت بر حسب نسبت سیگنال به نویز برای کانال تخت معادل وقتی  $M = 3$  ..... ۸۰
- شکل ۵-۱۳- منحنی نرخ خطای بیت بر حسب نسبت سیگنال به نویز برای کانال تخت معادل وقتی  $M = 4$  و  $N = 5$  ..... ۸۱



# فصل اول:

## مقدمه

از زمانی که برای اولین بار از جریان الکتریسیته برای انتقال پیام استفاده شد و موریس الفبای مخصوصی را برای این منظور به کار برد بیش از یکصد سال می گذرد. در این سالها نه چندان طولانی، پیشرفت هایی که در زمینه مهندسی برق به طور عام و مخابرات به طور خاص شاهد بوده ایم به حدی سریع صورت گرفته و بشر امروز چنان محصولات متنوع و بیشماری در اختیار دارد که تصور زندگی بدون آنها، نه در سال های بسیار دور گذشته که در همین چند سال پیش نیز به دشواری امکان پذیر است. علیرغم این پیشرفت ها که در رشته های مهندسی مخابرات شاهد بوده ایم، نیاز روز افزون برای برقراری ارتباطات جدید و ارسال و دریافت حجم عظیم اطلاعات مختلف از قبیل صوت، تصویر، فیلم و داده باعث شده است تحقیقات فراوانی برای ارتقاء سطح استاندارد ها در این زمینه در حال انجام باشد. گسترش شبکه های مخابرات بسیار سلولی و حجم انبوه اطلاعات دیجیتالی که عموم افراد جامعه به طور روزمره با آن سر و کار دارند، ارائه دهندگان سرویس های مخابرات بسیار را بر آن داشته است تا با بالا بردن کیفیت و ارزان کردن سرویس ها، انتظارات فزاینده ی کاربران را پاسخی مناسب دهند. معرفی نسل های جدید مخابرات بسیار که با هدف افزایش نرخ داده و کاهش هزینه ها صورت می گیرد در همین راستا می باشد.

شبکه های بی سیم<sup>1</sup> به خاطر سهولت نصب و قابلیت حرکت کاربران در آنها، بخش بسیار زیادی از مخابراتی انواع داده را بر عهده دارند. در این شبکه ها تمام یا قسمتی از کانال ارتباطی بین فرستنده و گیرنده، کانال فضای آزاد و مناسب برای ارسال و دریافت امواج رادیویی است. امواج الکترومغناطیسی یا رادیویی از یک سو در فضای آزاد با سرعت نور منتشر می شوند و از سوی دیگر امکان سوار کردن سیگنال های مختلف پیام بر روی آنها وجود دارد؛ برای همین، این امواج انتخاب مناسبی برای ارسال پیام ها در بسیاری از شرایط می باشند.

---

<sup>1</sup> Wireless networks

شبکه های بی سیم علیرغم داشتن مزایای فراوان، به دلیل غیر ایده آل بودن کانال های رادیویی، مشکلات و معایبی نیز دارند که باعث محدود شدن استفاده از آنها می شود. از بین عواملی که سبب کاهش کیفیت سرویس های مخابرات بی سیم می شود می توان به پدیده ی محوشدگی<sup>۱</sup> و وجود عامل مزاحم نویز یا اغتشاش اشاره کرد [۱-۵]. محوشدگی در کانال های بی سیم ناشی از طبیعت متغیر با زمان بودن این نوع کانال ها و وجود مسیر های مختلف<sup>۲</sup> بین فرستنده و گیرنده می باشد [۳-۱]. نویز نیز عامل مزاحمی است که معمولاً با جمع شدن با سیگنال مطلوب ارسال شده از فرستنده آن را دچار اغتشاش می کند و باعث آشکار سازی اشتباه پیام در گیرنده می گردد. عامل های مزاحم محوشدگی و نویز در حالت کلی ناشی از وجود موانع مختلف بر سر راه امواج رادیویی و منابع نامطلوب این امواج در کانال های رادیویی می باشد. از آنجایی که این موانع و منابع به صورت تصادفی در محیط اطراف فرستنده و گیرنده قرار گرفته اند، باعث غیر ایده آل بودن کانال های رادیویی و غیر تعینی<sup>۳</sup> و تصادفی بودن آنها می شوند. برای غلبه بر این مشکلات در مخابرات بی سیم راهکار هایی پیشنهاد می شود که تا حدی می توانند کیفیت و کارایی سیستم های مخابراتی را بالا ببرند. اما وجود پدیده های محوشدگی و نویز در حالت کلی سبب می شود یک محدودیت ذاتی در میزان حداکثر داده های قابل ارسال در واحد زمان، که به آن ظرفیت سیستم گفته می شود، در مخابرات سیار ایجاد شود [۱، ۲ و ۵].

یکی از روش های افزایش ظرفیت در سیستم های مخابرات سیار و بی سیم استفاده از چندگانگی<sup>۴</sup> می باشد. چندگانگی در حالت کلی به معنی ارسال چندگانه ی داده های پیام از طریق مسیر های مختلف می باشد. این مسیر ها می توانند مسیر هایی باشند که به صورت فیزیکی و مکانی مجزا و مستقل از یکدیگر هستند و یا این که با انتخاب فرکانس، زمان، پلاریزاسیون و ... مختلف به صورت مجازی تشکیل شده اند.

یکی از روش های چندگانگی که در سیستم های مخابرات سیار و بی سیم کاربرد بسیار دارد، چندگانگی فضایی<sup>۵</sup> است [۶]. در این روش چندگانگی، داده های ارسالی از مسیر های مختلفی به گیرنده رسیده و از آنجایی که پدیده های محوشدگی و نویز در مسیر های مختلف متفاوت و غالباً مستقل از یکدیگر هستند، می توان در گیرنده اثر این عوامل مزاحم را تا حد زیادی کاهش داد. به عبارت دیگر در شرایط یکسان داده ها را با نرخ بیشتر مخابره نمود و به ظرفیت بیشتری دست یافت. برای بهره بردن از مزایای چندگانگی فضایی می بایست تعداد آنتن های فرستنده و گیرنده را بیشتر از یک عدد انتخاب نمود. سیستم های مخابراتی که از چند آنتن فرستنده و گیرنده بهره می برند به سیستم های چند ورودی-چند خروجی (*MIMO*)<sup>۶</sup> مشهور هستند [۶ و ۷]. در سیستم های *MIMO* به دلیل استفاده از چند گانگی فضایی می توان با توان های کمتر فرستنده ظرفیتی مساوی با ظرفیت سیستم های یک ورودی-یک خروجی یا *SISO*<sup>۷</sup> را در پهنای باند و نسبت

<sup>1</sup> Fading

<sup>2</sup> Multipath

<sup>3</sup> Stochastic

<sup>4</sup> Diversity

<sup>5</sup> Space diversity

<sup>6</sup> Multiple Input Multiple Output

<sup>7</sup> Single Input Single Output

سیگنال به نویز مساوی به دست آورد [۷]؛ برای همین، این سیستم‌ها برای مواردی که در ارسال توان محدودیت وجود دارد، مانند تلفن‌های همراه، کاربرد‌های فراوانی دارند [۶]. در حال حاضر سیستم‌های Wi-Fi و WiMAX که به ترتیب مبتنی بر استاندارد‌های IEEE 802.11 n/g و IEEE 802.16 هستند و برای ارسال داده با نرخ‌های بالا به کار می‌روند، برای افزایش ظرفیت از آنتن‌های چندگانه در فرستنده و گیرنده سود می‌جویند.

در سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی، سیگنال دریافت شده در هر آنتن گیرنده، ترکیبی از سیگنال‌های ارسال شده از آنتن‌های مختلف فرستنده می‌باشد که از مسیرهای مختلفی به گیرنده می‌رسند. به عبارت دیگر، بین سیگنال‌های ارسال‌شده از آنتن‌های مختلف فرستنده تداخل بین کانالی وجود دارد ( $ICI$ )<sup>۱</sup> که باید به نوعی اثر مخرب آن را حذف نمود [۶ و ۷]. در سیستم‌های چند کاربره<sup>۲</sup> که در آن‌ها هر کدام از آنتن‌های فرستنده داده‌های یک کاربر خاص را ارسال می‌کنند نیز این پدیده باعث به وجود آمدن تداخل بین کاربران می‌شود. برای حذف تداخل بین سیگنال‌های آنتن‌های فرستنده لازم است اطلاع کافی از کانال مخابراتی موجود بین فرستنده و گیرنده در اختیار داشته باشیم. در صورت دانستن اثر کانال بر سیگنال‌های ارسال‌شده می‌توان اثر آن را معکوس نمود و تداخل را از بین برد. نکته‌ای که باید اینجا بدان تأکید کرد این است که در صورت حذف تداخل بین کانالی، که از آن به عنوان یک پدیده‌ی مخرب نام برده شد، عملاً باعث استفاده از چندگانگی فضایی موجود و افزایش ظرفیت سیستم مخابراتی می‌شود.

علاوه بر تداخل بین کانالی که ناشی از وجود چند آنتن در فرستنده می‌باشد، نوع دیگری از تداخل به نام تداخل بین سمبلی یا  $ISI$ <sup>۳</sup> نیز وجود دارد که ناشی از وجود پدیده‌ی محوشدگی چند مسیره و در نتیجه خاصیت انتخابگری فرکانسی کانال می‌باشد. در صورتی که این تداخل نیز مانند تداخل بین کانالی حذف نگردد باعث افزایش احتمال خطا در آشکار سازی داده‌ها خواهد شد [۸].

یکی از روش‌های حذف و کاهش تداخل بین سمبلی استفاده از تکنیک ارسال چند حاملی<sup>۴</sup> است [۹]. در این روش سعی می‌شود به جای یک حامل از تعداد بیشتری حامل استفاده کرد که فاصله‌ی فرکانسی بین آنها به گونه‌ای باشد تا بر هم متعامد باشند و در نتیجه علی‌رغم همپوشانی فرکانسی باندهای مجاور، تأثیر تداخلی بر روی هم نداشته باشند. این مسأله سبب افزایش گذردهی<sup>۵</sup> سیستم و ظرفیت کانال خواهد شد. به این روش  $OFDM$ <sup>۶</sup> گفته می‌شود. با به کار بردن تکنیک  $OFDM$ ، کانال مخابراتی که به خاطر محوشدگی و پدیده‌ی چند مسیره به صورت انتخابگر فرکانسی عمل می‌کند، به چند زیر کانال تخت<sup>۷</sup> تبدیل می‌شود. بهره بردن از مزیت‌های سیستم‌های  $MIMO$  و تکنیک  $OFDM$  به طور همزمان، یکی از روش‌های بالا بردن گذردهی در سیستم‌های مخابراتی می‌باشد.

<sup>۱</sup> Inter Channel Interference

<sup>۲</sup> Multi user

<sup>۳</sup> Inter Symbol Interference

<sup>۴</sup> Multi carrier

<sup>۵</sup> Throughput

<sup>۶</sup> Orthogonal Frequency Division Multiplexing

<sup>۷</sup> Flat

یکی دیگر از راه های حذف تداخل بین سمبلی یا *ISI* در سیستم های مخابراتی یک ورودی-یک خروجی یا *SISO* استفاده از همسانساز<sup>۱</sup> است. همسانساز در واقع یک فیلتر با مشخصه فرکانسی عکس مشخصه فرکانسی کانال می باشد. در نتیجه با عبور سیگنال خروجی کانال (ورودی گیرنده) از آن اثر کانال حذف شده و دیگر تداخل بین سمبل های متوالی از بین خواهد رفت. در این پروژه هدف تعمیم این روش برای کانال های چند ورودی-چند خروجی *MIMO* و یا به عبارت دقیق تر طراحی همسانساز برای کانال های چند ورودی-چند خروجی انتخابگر فرکانسی می باشد. برای رسیدن به این مطلوب از مفهومی تحت عنوان تجزیه ی مقادیر تکین ماتریس ها در حالت کلی و تجزیه ی مقادیر تکین ماتریس های چند جمله ای در حالت خاص استفاده خواهیم کرد.

در فصل ۲ این رساله به معرفی دقیق تر کانال های چند ورودی-چند خروجی، *MIMO*، و بررسی انواع روش های تخمین این نوع کانال ها به همراه شبیه سازی آنها می پردازیم و در فصل ۳ نیز انواع مختلف روش های حذف تداخل در کانال های *MIMO* به همراه شبیه سازی و مقایسه ی روش های پیشنهادی با روش های موجود، مورد بررسی قرار خواهند گرفت. فصل ۴ به حذف تداخل بین کانالی با استفاده از تجزیه ی مقادیر تکین، هم برای کانال های *MIMO* تخت و هم برای کانال های *MIMO* انتخابگر فرکانسی، اختصاص دارد. در این فصل ابتدا، دو روش جدید برای حذف تداخل مبتنی بر تجزیه ی مقادیر تکین معرفی می شوند و مبانی تئوریک آنها مورد بررسی قرار می گیرند و سپس با استفاده از شبیه سازی کارآیی آنها با روش های موجود مقایسه می شود. در فصل ۵ هم یک نوع کدینگ فضایی-زمانی جدید معرفی می شود و پایه های نظری آن به طور دقیق و عمیق بررسی می شوند. در این روش تداخل بین سمبلی با استفاده از چندگانگی فضایی حذف می گردد. در فصل ۶ نیز نخست به جمع بندی مطالب بیان شده در رساله و نتیجه گیری از آنها می پردازیم و سپس برای ادامه ی پژوهش در این زمینه، پیشنهاداتی را ارائه می کنیم.

---

<sup>1</sup> Equalizer

# فصل دوم:

## کانال های چند ورودی-چند خروجی

یکی از راه های مقابله با تأثیر مخرب پدیده های محوشدگی و نویز در کانال های رادیویی، استفاده از چندگانگی فضایی است. در سیستم هایی که از چندگانگی فضایی بهره می برند، تعداد آنتن ها در طرف فرستنده و یا در طرف گیرنده و یا در هر دو طرف بیش از یک می باشد. در این سیستم ها، کانال رادیویی را می توان به صورت یک کانال با ورودی ها و خروجی های چندگانه در نظر گرفت. به این نوع کانال ها، کانال های چند ورودی-چند خروجی یا *MIMO* اطلاق می شود. در این فصل کانال های چند ورودی-چند خروجی مورد بررسی قرار می گیرند.

### ۱-۲ کانال های چند ورودی-چند خروجی تخت

در یک کانال مخابراتی که در آن یک آنتن به ارسال سیگنال و یک آنتن دیگر به دریافت آن می پردازد، در صورتی که پاسخ ضربه‌ی کانال با زمان تغییر کند، رابطه‌ی ورودی-خروجی در حضور نویز به صورت ذیل می باشد [۱]:

$$y(t) = h(\tau, t) * s(t) + n(t) = \int_{\tau} h(\tau, t) s(t - \tau) d\tau + n(t) \quad (1-2)$$

که در این رابطه  $s(t)$  سیگنال ارسالی و  $h(\tau, t)$  پاسخ ضربه‌ی کانال تغییر پذیر با زمان و  $y(t)$  سیگنال دریافتی می باشد.  $n(t)$  نیز نویز سفید دارای توزیع نرمال یا گاوسی می باشد.

در صورتی که بین آنتن فرستنده و آنتن گیرنده تنها یک مسیر وجود داشته باشد، کانال اعوجاجی بر روی سیگنال ارسالی ایجاد نمی کند و فقط تأخیری ناشی از پدیده‌ی انتشار که متناسب با فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده است به سیگنال اعمال می شود. در این صورت داریم:

$$h(\tau, t) = a_0(t) \delta(\tau - \tau_0) \quad (2-2)$$

در این رابطه به خاطر طبیعت تغییر پذیر با زمان بودن کانال، بهره‌ی مسیر  $a_0(t)$  تابعی از زمان می باشد. در حوزه‌ی فرکانس نیز تابع تبدیل چنین کانالی را می توان بدین صورت نوشت:

$$H(\omega, t) = a_0(t)e^{-j\omega\tau_0} \quad (۳-۲)$$

همان طور که در رابطه‌ی فوق دیده می شود، دامنه‌ی تابع تبدیل فوق  $H(\omega, t)$  برای تمام فرکانس ها یکسان می باشد. دلیل این امر وجود تنها یک مسیر بین فرستنده و گیرنده می باشد. به این دسته از کانال ها، کانال های محوکننده‌ی تخت<sup>۱</sup> گفته می شود. به دلیل وجود یک مسیر بین فرستنده و گیرنده، بررسی کانال های تخت به سادگی امکان پذیر است؛ اما این کانال ها مشکل بزرگی نیز دارند: دامنه‌ی کانال که برای همه‌ی فرکانس ها یکسان می باشد، خود تابعی از زمان است. اگر به هر دلیلی این دامنه به طور شدیدی کاهش پیدا کند، عملاً ارتباط بین فرستنده و گیرنده قطع می شود.

از آنجایی که معمولاً تغییرات ضرایب کانال با زمان در مقایسه با دوره‌ی سمبل ها طی فرآیندی کند و آهسته صورت می گیرد، می توان فرض کرد ضریب  $a_0$  در طول یک دوره از سمبل با زمان تغییر نمی کند و کانال رادیویی را در مواردی که نرخ بیت زیاد است تغییر ناپذیر با زمان در نظر گرفت.

## ۲-۲ کانال های چند ورودی-چند خروجی انتخابگر فرکانسی

در صورتی که پدیده‌ی انتشار در محیطی صورت بگیرد که موانع زیادی در آن وجود دارند و امکان رخ دادن پدیده های بازتاب<sup>۲</sup> و پراش<sup>۳</sup> وجود داشته باشد، تعداد مسیر های بین فرستنده و گیرنده از یکی بیشتر خواهد بود. در شهر ها معمولاً انتشار به این شکل صورت می گیرد. در این حالت سیگنال دریافتی در گیرنده برآیند سیگنال دریافتی از مسیر های مختلف می باشد. روابط ذیل پاسخ ضربه و تابع تبدیل چنین کانال هایی را نشان می دهند [۱ و ۲]:

$$h(\tau, t) = \sum_{l=0}^{L-1} a_l(t)\delta(\tau - \tau_l) \quad (۴-۲)$$

$$H(\omega, t) = \sum_{l=0}^{L-1} a_l(t)e^{-j\omega\tau_l} \quad (۵-۲)$$

همان طور که در رابطه‌ی (۵-۲) مشاهده می شود، بین فرستنده و گیرنده تعداد  $L$  مسیر مختلف وجود دارد که هر کدام نیز دارای بهره  $a_l(t)$  و میزان تأخیر،  $\tau_l$ ، متفاوتی می باشند. در رابطه‌ی فوق دیده می شود که بهره‌ی کانال برای مؤلفه های مختلف فرکانسی سیگنال عبوری از کانال یکسان نیست. در نتیجه به کانال های متغیر بازمانی که در آنها بیش از یک مسیر بین فرستنده و گیرنده وجود دارد کانال های محوکننده‌ی انتخابگر فرکانسی<sup>۴</sup> گفته می شود. بررسی و تحلیل این کانال ها به

<sup>۱</sup> Flat fading channels

<sup>۲</sup> Reflection

<sup>۳</sup> Diffraction

<sup>۴</sup> Frequency selective fading channels

دلیل وجود رابطه‌ی جمع برداری آن، نسبت به کانال‌های تخت پیچیده تر است. در عوض این نوع کانال‌ها به دلیل داشتن نوعی چندگانگی که به آن چندگانگی زمانی گفته می‌شود، نسبت به کانال‌های تخت از مزیت مهمی برخوردار هستند: احتمال وقوع محوشدگی شدید برای تمام مسیرهای بین فرستنده و گیرنده در آن واحد کم است و در صورتی که یکی از مسیرهای بین فرستنده و گیرنده دچار محوشدگی شدیدی شود، گیرنده می‌تواند از سیگنال دریافت شده از سایر مسیرها استفاده کند. البته گیرنده‌ی مورد استفاده می‌بایست دارای توانایی استفاده از سیگنال دریافتی از تمام مسیرها باشد که این مسأله به پیچیدگی طراحی آن می‌افزاید.

در سیستم‌های مخابراتی که هم‌اکنون مورد استفاده قرار می‌گیرند، به‌طور معمول نرخ داده بسیار بالا است و فرستنده تعداد زیادی از سمبل‌ها را در یک ثانیه ارسال می‌کند و دوره‌ی سمبل‌ها بسیار کوتاه می‌باشد. با توجه به این توضیحات ما نیز تغییرات ضرایب و پارامترهای کانال را در مقایسه با نرخ ارسال داده‌ها فرض کرده و از روابط (۲-۶) و (۲-۷) برای مدل کردن کانال استفاده می‌کنیم:

$$h(\tau) = \sum_{l=0}^{L-1} a_l \delta(\tau - \tau_l) \quad (۲-۶)$$

$$H(\omega) = \sum_{l=0}^{L-1} a_l e^{-j\omega\tau_l} \quad (۲-۷)$$

به عبارت دیگر کانال را به صورت غیر محوشونده و یا محوشونده کند<sup>۱</sup> در نظر می‌گیریم. این فرض هنگامی که کاربر مخابرات سیار دارای در محیط شهری و با موانع زیاد حرکتی سریع نداشته باشد، کاملاً فرض معقولی است. اما در صورتی که یا کاربر با سرعت بالا حرکت کند، مثلاً در یک قطار سریع‌السیر باشد، و یا موانع محیط با سرعت زیادی آرایش خود را تغییر دهند، مانند هنگامی که کاربر در کنار یک بزرگراه شلوغ قرار داشته باشد، نوع محوکنندگی کانال تغییر می‌کند و می‌بایست از روابط مربوط به کانال‌های محوشونده سریع<sup>۲</sup> برای مدل کردن کانال استفاده کرد.

بسته به نوع محیط و توزیع موانع در آن، مدل‌های مختلفی برای انتشار سیگنال‌های رادیویی در مخابرات سیار برای بررسی کانال‌ها در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال اگر مسیر دید مستقیم بین فرستنده و گیرنده وجود نداشته باشد، کانال را با مدل رایلی<sup>۳</sup> مدل می‌کنند و اگر بین فرستنده و گیرنده یک مسیر دید مستقیم قوی و تعداد زیادی مسیر غیر مستقیم ضعیف وجود داشته باشد، از خواص آماری مدل رایس<sup>۴</sup> یا ناکاگامی-n<sup>۵</sup> برای بررسی کانال استفاده می‌شود [۱۰-۱۲].

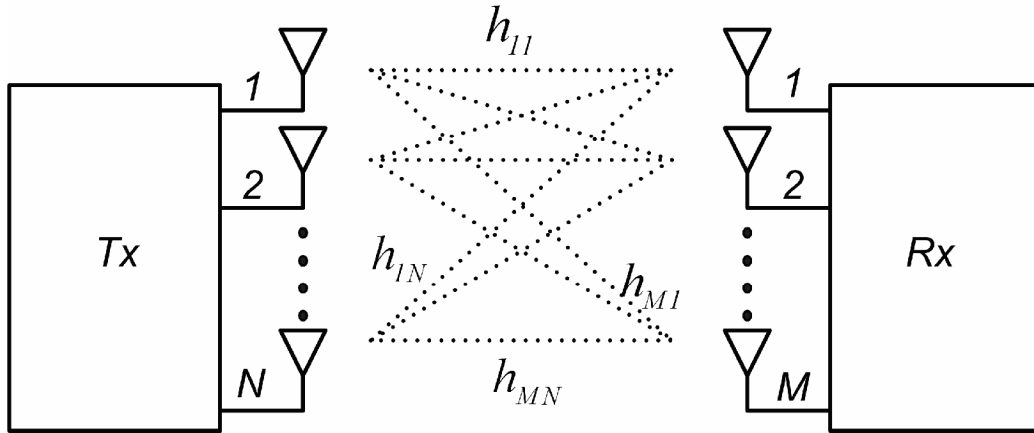
<sup>۱</sup> Slow flat fading

<sup>۲</sup> Fast fading channels

<sup>۳</sup> Rayleigh

<sup>۴</sup> Rician

<sup>۵</sup> Nakagami-n



شکل ۱-۲- یک سیستم چند ورودی-چند خروجی با  $N$  آنتن فرستنده و  $M$  آنتن گیرنده.

چنانچه مانند حالتی که در شکل ۱-۲ دیده می شود تعداد آنتن های فرستنده و گیرنده بیش از یک باشد و با کانال های چند ورودی-چند خروجی سر و کار داشته باشیم، سیگنال دریافتی در هر آنتن گیرنده برآیند سیگنال آنتن های مختلف فرستنده و مسیر های مختلف می باشد. با داشتن اطلاعات کانال و ورودی آن، خروجی از روابط کانولوشنی ذیل محاسبه می شود:

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ \vdots \\ y_M(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}(t) & \cdots & h_{1N}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1}(t) & \cdots & h_{MN}(t) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} s_1(t) \\ \vdots \\ s_N(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ \vdots \\ n_M(t) \end{bmatrix} \quad (۸-۲)$$

و یا

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}(t) * \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (۹-۲)$$

که در آن  $N$  و  $M$  به ترتیب تعداد آنتن های فرستنده و گیرنده هستند. در این روابط  $\mathbf{n}(t)$  بردار نویز خروجی کانال یا نویز موجود در گیرنده می باشد که دارای مؤلفه های  $n_1(t)$ ،  $n_2(t)$  و ... و برای هر یک از  $M$  آنتن گیرنده می باشد. به طور معمول این نویزها با هم ناهمبسته<sup>۱</sup> هستند و در نتیجه به دلیل گوسی بودن، ناوابسته یا مستقل<sup>۲</sup> نیز می باشند [۱۳].

برای یک کانال تخت در رابطه ی ورودی-خروجی فوق عمل کانولوشن به عمل ضرب تبدیل می شود و خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ \vdots \\ y_M(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & \cdots & h_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ \vdots \\ s_N(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ \vdots \\ n_M(t) \end{bmatrix} \quad (۱۰-۲)$$

و یا

<sup>۱</sup> Uncorrelated

<sup>۲</sup> Independent



$$\mathbf{y}(t) = H\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (11-2)$$

در این رابطه ها، با توجه به کند بودن محوشوندگی، ضریب  $h_{mm}$  یک عدد مختلط می باشد که اندازه‌ی بهره و میزان فاز مسیر بین آنتن فرستنده‌ی  $n$  ام و آنتن گیرنده‌ی  $m$  ام را نشان می دهد. رابطه (۱۱-۲)، را می توان در زمان های  $t = nt_s$  نوشت. در این صورت رابطه به صورت زمان گسسته و برحسب متغیر  $n$  بیان خواهد شد. در صورتی که کانال انتخابگر فرکانسی باشد، نیز می توان از رابطه‌ی کانولوشنی (۸-۲) تبدیل  $z$  گرفت و رابطه‌ی ورودی-خروجی را به صورت ضرب ماتریسی و مدل گسسته‌ی ذیل نوشت:

$$\begin{bmatrix} y_1(z) \\ \vdots \\ y_M(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}(z) & \cdots & h_{1N}(z) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1}(z) & \cdots & h_{MN}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(z) \\ \vdots \\ s_N(z) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(z) \\ \vdots \\ n_M(z) \end{bmatrix} \quad (12-2)$$

و یا

$$\mathbf{y}(z) = H(z)\mathbf{s}(z) + \mathbf{n}(z) \quad (13-2)$$

## ۳-۲ مزایای سیستم های چند ورودی-چند خروجی

در یک کانال چند ورودی-چند خروجی انتخابگر فرکانسی به خاطر وجود مسیر های مختلف بین فرستنده و گیرنده و وجود چند آنتن فرستنده و چند آنتن گیرنده، دو نوع تداخل بین سیگنال های دریافتی رخ می دهد که به آنها تداخل های بین کانالی و بین سمبلی گفته می شود. در فصل های بعد به بیان روش هایی برای حذف و کاهش این دو نوع تداخل در یک کانال چند ورودی-چند خروجی تخت خواهیم پرداخت. در اینجا ممکن است سؤالی مطرح شود که چرا علیرغم وجود تداخل و پیچیده شدن سیستم به سراغ سیستم های چند ورودی-چند خروجی می رویم. برای پاسخ به این سؤال منطقی، برتری های یک سیستم چند ورودی-چند خروجی نسبت به سیستم های دیگر به صورت فهرست وار ذکر می شود [۶ و ۷]:

### ۱- کاهش تأثیر پدیده‌ی محوشدگی

نرخ خطای بیت ( $BER$ )<sup>۱</sup> در کانال های محوکننده نسبت به کانال های غیر محوکننده میزان زیادی بیشتر است. با به کار بردن چندگانگی های مناسب می توان این میزان را کاهش داد. در صورتی که از چندگانگی زمانی برای این منظور استفاده شود، از گذردهی سیستم کاسته شده و اگر از چندگانگی فرکانسی استفاده شود، بازدهی پهنای باند کم می شود. استفاده از چندگانگی فضایی و سیستم های چند ورودی-چند خروجی باعث کاهش نرخ خطای بیت بدون کاهش گذردهی می شود.

<sup>۱</sup> Bit Error Rate

## ۲- غلبه بر پدیده‌ی چندمسیری و تداخل بین سمبلی

با به کار بردن آرایه ای از آنتن های مختلف در گیرنده و فرستنده می توان الگوی تشعشی آنتن ها را جهت دار کرد و تنها مسیر های مطلوب را دریافت نمود و تداخل بین سمبلی را نیز تا حد زیادی کاهش داد.

## ۳- افزایش ظرفیت

می توان نشان داد به خاطر وجود چندگانگی و این که نویز ها در آنتن های مختلف گیرنده نسبت به هم ناوابسته هستند، نرخ بیشینه‌ی قابل اطمینان ارسالی و ظرفیت سیستم به میزان قابل توجهی افزایش می یابد.

در کنار این مزایا، سیستم های چند ورودی-چند خروجی با مشکلاتی همچون پیچیدگی و هزینه‌ی بیشتر، وجود تداخل فضایی و بین کانالی، تداخل بین سمبلی در کانال های انتخابگر فرکانسی و همسانسازی<sup>۱</sup> پیچیده تر روبرو هستند.

## ۲-۴ تخمین کانال در سیستم های چند ورودی-چند خروجی

جهت استفاده از چندگانگی های زمانی و مکانی در کانال های چند ورودی-چند خروجی انتخابگر فرکانسی، لازم است به ترتیب بر دو نوع تداخل بین سمبلی و بین کانالی غلبه کنیم. برای این منظور در روش های پیشنهاد شده برای این منظور در این پروژه از همسانسازی بهره می بریم. برای انجام عمل همسانسازی و جبران اثر مخرب کانال، نخست باید اثر کانال را بر روی سیگنال های عبوری از آن بدانیم. متأسفانه کانال های رادیویی مانند کانال های الکتریکی و نوری دارای یک مدل ساده و تعینی نیستند و به دلیل موانع مختلف موجود در محیط انتشار و مسیر های مختلفی که بین فرستنده و گیرنده تشکیل می شود و البته با زمان تغییر می کند، تعیین دقیق تابع تبدیل کانال به راحتی سایر کانال ها امکان پذیر نیست. علاوه بر این مطلب، تغییر تابع تبدیل کانال در طول زمان مشکل دیگری نیز ایجاد می کند و می بایست عمل تخمین کانال به طور مداوم صورت گیرد.

گیرنده با تخمینی که از ماتریس کانال می زند می تواند در کاهش میزان تداخل بین کانالی *ICI* و آشکارسازی سمبل های دریافتی از آن استفاده کند. اما برای این که فرستنده نیز بتواند از این اطلاعات استفاده کند و عمل پیش کدگذاری<sup>۲</sup> را طوری انجام دهد که میزان تداخل در گیرنده کاهش یابد، باید به نحوی از تخمین کانالی که در گیرنده محاسبه می شود و موجود است اطلاع پیدا کند. برای این منظور لازم است کانال معکوسی نیز از گیرنده به فرستنده موجود باشد. در حالت کلی با توجه به میزان اطلاعاتی که فرستنده از کانال دارد ممکن است هر یک از حالت های مختلف ذیل اتفاق بیفتد [۱۴]:

۱- فرستنده اطلاعی از کانال نداشته باشد. در این صورت نمی توان در فرستنده هیچ عمل پیش کدگذاری خاصی برای افزایش گذردهی سیستم مخابراتی انجام داد و تمام بار مسؤلیت بر دوش طرف گیرنده می باشد.

<sup>1</sup> Equalization

<sup>2</sup> Prefiltering

۲- فرستنده تنها اطلاع ناقصی از سیستم داشته باشد. در این صورت فرستنده تنها با دانستن ویژگی آماری ماتریس خود همبستگی سیگنال ارسالی ( $R_{SS}$ ) اطلاع ناقصی از سیستم دارد. در چنین حالتی امکان پیش کد گذاری نه چندان پیچیده ای در فرستنده وجود دارد.

۳- فرستنده به طور کامل از کانال اطلاع دارد. در این حالت تخمین ماتریس  $H$  که در گیرنده موجود است در اختیار فرستنده نیز قرار می گیرد و فرستنده با استفاده از آن و عمل پیش کدگذاری مناسب می تواند در کاهش میزان تداخل در گیرنده و آشکار سازی صحیح به گیرنده کمک کند.

در سیستم های  $MIMO$ ، کانال بسته به این که تخت یا انتخابگر فرکانسی باشد به ترتیب به صورت ماتریس های  $H$  یا  $H(z)$  مدل می شود. تعداد درایه های هر یک از این ماتریس ها  $M \times N$  می باشد که  $M$  تعداد آنتن های گیرنده و  $N$  تعداد آنتن های فرستنده می باشد. البته، در حالتی که کانال انتخابگر فرکانسی است، هریک از درایه های  $h_{mn}(z)$ ، خود مانند تابع تبدیل یک کانال یک ورودی-یک خروجی انتخابگر فرکانسی است و در نتیجه به صورت یک بردار می باشد که حداکثر دارای  $L$  درایه می باشد؛ که  $L$  طول حافظه کانال می باشد. در نتیجه تعداد ضرایبی که برای تخمین کانال های چند ورودی-چند خروجی می بایست تعیین شوند،  $M \times N \times L$  می باشد. روش های مختلفی برای تخمین کانال چند ورودی-چند خروجی انتخابگر فرکانسی وجود دارد که در این بخش به معرفی یک روش تحلیلی و یک روش وفقی<sup>۱</sup> برای تخمین کانال می پردازیم.

## ۲-۴-۱ روش وینر-هاف [۴]

در این بخش روش وینر-هاف را برای تخمین  $FIR$ <sup>۲</sup> یک کانال چند ورودی-چند خروجی تخت معرفی می کنیم و سپس آن را برای حالت انتخابگر فرکانسی تعمیم می دهیم. در یک کانال تخت، با فرض نبودن نویز، رابطه ی ورودی-خروجی به صورت ذیل خواهد بود:

$$\mathbf{y} = H\mathbf{s} \quad (۲-۱۴)$$

که  $\mathbf{s}$  بردار سیگنال ورودی و  $\mathbf{y}$  بردار سیگنال خروجی کانال می باشند. در این روش ما با دانستن بعضی از ویژگی های آماری بردار های ورودی و خروجی کانال، تخمینی از ماتریس کانال  $H$  را به دست می آوریم و آن را با نماد  $\hat{H}$  نشان می دهیم. در حالت ایده آل، خروجی کانال  $H$  و خروجی تخمین کانال  $\hat{H}$  به ازای ورودی  $\mathbf{s}$  که به طور یکسان به هر دوی آنها اعمال می شود می بایست یکسان باشد. به عبارت دیگر می بایست سیگنال خطا، که به صورت ذیل تعریف می شود، تا حد امکان کم باشد:

$$\mathbf{e} = H\mathbf{s} - \hat{H}\mathbf{s} = (H - \hat{H})\mathbf{s} \quad (۲-۱۵)$$

در این روش  $\hat{H}$  به گونه ای محاسبه می شود که مربع خطای فوق کمترین میانگین را داشته باشد. به عبارت دیگر  $\hat{H}$  را طور پیدا می کنیم که  $E\{\mathbf{e}^T \mathbf{e}\}$  کمینه شود. بدین منظور معادله ی ذیل را حل می کنیم:

<sup>۱</sup> Adaptive

<sup>۲</sup> Finite-duration Impulse Response

$$\frac{\partial}{\partial \hat{H}} E\{\mathbf{e}^H \mathbf{e}\} = 0 \quad (16-2)$$

که در این رابطه ماتریس ژاکوبین به صورت ذیل تعریف می شود:

$$\frac{\partial}{\partial \hat{H}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \hat{h}_{11}} & \frac{\partial}{\partial \hat{h}_{12}} & \cdots & \frac{\partial}{\partial \hat{h}_{1N}} \\ \frac{\partial}{\partial \hat{h}_{21}} & \frac{\partial}{\partial \hat{h}_{22}} & \cdots & \frac{\partial}{\partial \hat{h}_{2N}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial}{\partial \hat{h}_{M1}} & \frac{\partial}{\partial \hat{h}_{M2}} & \cdots & \frac{\partial}{\partial \hat{h}_{MN}} \end{bmatrix} \quad (17-2)$$

با حل معادله‌ی (۱۶-۲) به جواب ذیل برای تخمین  $\hat{H}$  می رسیم که بر پایه‌ی کمینه کردن ملاک مربعات خطا به دست آمده است:

$$\hat{H} = R_{yy}^{-1} R_{ys} \quad (18-2)$$

که  $R_{yy}$  ماتریس خود همبستگی بردار خروجی کانال و  $R_{ys}$  ماتریس همبستگی متقابل بین ورودی ها و خروجی های کانال می باشد. این رابطه را می توان به شکل ذیل نیز نوشت:

$$\begin{bmatrix} \hat{h}_{11} & \hat{h}_{12} & \cdots & \hat{h}_{1N} \\ \hat{h}_{21} & \hat{h}_{22} & \cdots & \hat{h}_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{h}_{M1} & \hat{h}_{M2} & \cdots & \hat{h}_{MN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{yy}(0) & r_{yy}(1) & \cdots & r_{yy}(M-1) \\ r_{yy}(1) & r_{yy}(0) & \cdots & r_{yy}(M-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{yy}(M-1) & r_{yy}(M-2) & \cdots & r_{yy}(0) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} r_{ys}(0) & r_{ys}(1) & \cdots & r_{ys}(N-1) \\ r_{ys}(1) & r_{ys}(0) & \cdots & r_{ys}(N-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{ys}(M-1) & r_{ys}(M-2) & \cdots & r_{ys}(0) \end{bmatrix} \quad (19-2)$$

در این رابطه  $r_{yy}(m)$  تابع همبستگی متقابل خروجی هایی از کانال می باشد که  $m$  آنتن از هم فاصله دارند و  $r_{ys}(m)$  نیز تابع همبستگی متقابل خروجی و ورودی ای از کانال می باشد که  $m$  آنتن از هم فاصله دارند. به این رابطه، رابطه‌ی وینر یا وینر-هاف گفته می شود. در عمل، محاسبه‌ی دقیق ماتریس خودهمبستگی  $R_{yy}$  و ماتریس همبستگی متقابل  $R_{ys}$  کار آسانی نیست؛ زیرا، ماتریس خود همبستگی سیگنال دریافتی و ماتریس همبستگی متقابل بین ورودی و خروجی از ویژگی های آماری سیگنال های ورودی و خروجی هستند و برای محاسبه‌ی آنها به محاسبه‌ی میانگین آماری و یا به عبارت دیگر امید ریاضی نیاز داریم. البته در مواردی که بتوان از خاصیت ارگادیک<sup>۱</sup> بودن استفاده کرد می توان این مقادیر را از روی روابط میانگین زمانی ذیل تخمین زد [۱۳]:

$$r_{yy}(k) \cong \frac{1}{P} \sum_{p=0}^{P-1} y(p)y^*(p+k) \quad (20-2)$$

$$r_{ys}(k) \cong \frac{1}{P} \sum_{p=0}^{P-1} y(p)s^*(p+k) \quad (21-2)$$

<sup>1</sup> Ergodic