بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی برق (مخابرات)

بررسی روش‌های تخمین کانال در سیستم‌های MIMO-OFDM

استاد راهنما : دکتر علی‌اکبر تدین تفت

استاد مشاور : دکتر منصور نخکش

پژوهش و نگارش : مهدی نصرآبادی

مهر ماه ۱۳۸۸

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم

اثر پیش روی، آموخته‌های درحد بضاعت ناچیز نگارنده، از دریای بیکران ولی نعمتان بیشماری است؛ که هرچند از فرط کثرت ذکر نامشان مقدور نیست لیک طلایه داران شان را از فرط حدت نقششان، یارای گریز از حمد نمی باشد:

دکتر علی اکبر تدین تفت

دکتر منصور نخکش

و دیگر عزیزانی که مرا در اجرای این پروژه یاری رسانده اند.

گرانمایگانی که این شاگرد کوچک، خود را وامدارشان می بیند و سپاس الطافشان را فرض می گیرد. توفیق رفیقشان باد.

چکیده

نیاز روزافزون به ارسال داده با نرخ‌بیت بالا به‌ویژه در سیستم‌های مخابرات بی‌سیم و محدودیت سیستم‌های موجود در برآورده ساختن این نیاز از یک سو و همچنین کاهش عملکرد شبکه‌های بی‌سیم به‌وسیله پدیده‌های محیط انتشار از جمله محوشدگی و هم‌چنین تداخل هم‌کانال و تداخل بین سمبل‌ها، سبب شده که در سال‌های اخیر سیستم‌های مخابراتی مبتنی بر چندورودی–چندخروجی (MIMO) به‌خاطر استفاده مؤثر از پهنای‌باند و همچنین کاهش این مشکلات موردتوجه بسیار قرار گیرند. از مشخصه‌های این سیستم‌ها، قابلیت دست‌یابی و امکان پیاده‌سازی سیستم‌های مخابراتی با توان ارسال و دریافت اطلاعات در نرخ‌بیت‌های بسیار بالا با استفاده از کدهای زمان-فضا می‌باشد.

همچنین، در سیستم‌های پرظرفیت با افزایش نرخ‌بیت ارسالی، تداخل بین‌سمبلی (ISI) ناشی از کانال چندمسیره، باعث کاهش بازدهی سیستم می‌شود. تکنیک OFDM در مقابله با این پدیده بسیار خوب عمل می‌کند. از طرف دیگر، تخمین دقیق ضرایب کانال مخابراتی، به طور مؤثری باعث بهبود کارایی سیستم‌های مخابراتی می‌شود. بنابراین، دسترسی به ضرایب کانال در سیستم‌های مخابراتی یک امر مهم و ارائه روش‌هایی جهت تخمین هر چه بهتر این ضرایب ضروری به نظر می‌رسد.

ما در این پایان نامه به تخمین کانال‌های مخابراتی محوشونده پرداخته‌ایم. برای کانال‌های محوشونده آهسته با مدل مشخص تعریف شده، تخمین ML از ماتریس ضرایب کانال ارائه شده است و نشان داده شده که این تخمین با تخمین LS برابر می‌باشد. برای کانال‌های محوشونده سریع هم تخمین MSE از پاسخ ضربه کانال ارائه شده است.

فهرست مطالب

۱) مقدمه ۱

۱-۱) مقدمه ۲

۱-۲) روش‌های دایورسیتی ۵

۱-۲-۱) دایورسیتی فضایی ۶

۱-۲-۲) دایورسیتی فرکانسی ۷

۱-۲-۳) دایورسیتی زمانی ۷

۱-۲-۴) دایورسیتی در فرستنده ۹

۱-۳) کدینگ الموتی ۹

۱-۴) تخمین کانال ۱۲

۱-۵) ساختار پایان نامه ۱۳

۲) سیستم‌های MIMO-OFDM ۱۴

۲-۱) مقدمه ۱۵

۲-۲) سیستم MIMO ۱۶

۲-۳) مفهوم انتقال چند حاملی ۱۸

۲-۴) OFDM به عنوان انتقال چند حاملی ۲۳

۲-۴-۱) پیاده‌سازی OFDM به کمک FFT ۲۷

۲-۴-۲)OFDM با فاصله محافظ ۲۸

۲-۵) سیستم MIMO-OFDM ۳۱

۲-۵-۱) فرستنده سیستم MIMO-OFDM ۳۲

۲-۵-۲) گیرنده سیستم MIMO-OFDM ۳۳

۳) کانال‌های مخابراتی و روش‌های تخمین آن‌ها ۳۵

۳-۱) مقدمه ۳۶

۳-۲) کانال‌های مخابراتی ۳۷

۳-۳) کانال‌های محو شونده و کدینگ الموتی ۳۹

۳-۴) تخمین کانال ۴۰

۳-۴-۱) تخمین کانال مبتنی بر آموزش ۴۲
۳-۴-۲) تخمین کور کانال ۴۳
۳-۴-۳) تخمین نیمه‌کور کانال ۴۴
۴) تخمین کانال‌های محوشونده در سیستم‌های MIMO-OFDM ۴۶
۴-۱) مقدمه ۴۷
۴-۲) تخمین کانال محوشونده آهسته در سیستم MIMO-OFDM (مدل اول) ۴۸
۴-۲-۱) مدل سیگنال MIMO-OFDM ۴۸
۴-۲-۲) مشخصه‌های کانال‌های بی‌سیم ۵۰
۴-۲-۳) تخمین ضرایب کانال ۵۲
۴-۲-۴) تخمین کانال ساده شده (روش اول) ۵۴
۴-۲-۵) تحلیل کارایی ۵۷
۴-۲-۶) دنباله‌های آموزشی بهینه ۶۱
۴-۲-۷) تخمین کانال ساده شده (روش دوم) ۶۴
الف) الگوریتم تخمین کانال ساده شده ۶۴
۴-۲-۸) تحلیل کارایی ۶۶
۴-۳) تخمین کانال محوشونده آهسته در سیستم MIMO-OFDM (مدل دوم) ۷۰
۴-۳-۱) مدل سیگنال MIMO-OFDM ۷۰
۴-۳-۲) تخمین ML کانال ۷۱
۴-۳-۳) برابری تخمین LS و ML برای مدل فوق ۷۳
۴-۳-۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی ۷۴
۴-۴) تخمین کانال با محوشوندگی سریع در سیستم MIMO-OFDM ۷۸
۴-۴-۱) مقدمه ۷۸
۴-۴-۲) مدل سیگنال MIMO-OFDM ۷۸
۴-۵) تخمین کانال ۷۹
۴-۵-۱) نتایج حاصل از شبیه‌سازی ۸۲
۵) نتیجه گیری و پیشنهادها ۸۶
مراجع ۹۰

فهرست شکل‌ها

شکل (۱-۱) : دایورسیتی فضایی (MIMO) ۷

شکل (۱-۲) : دایورسیتی فرکانسی ۸

شکل (۱-۳) : دایورسیتی زمانی ۹

شکل (۱-۴) : طرح دایورسیتی در فرستنده با دو فرستنده و یک گیرنده ۱۰

شکل (۲-۱) : بلوک دیاگرام یک سیستم MIMO ۱۶

شکل (۲-۲) : مفهوم انتقال چند حاملی ۱۹

شکل (۲-۳) : نمودار بلوکی انتقال چند حاملی با دیدگاه اول ۲۱

شکل (۲-۴) : نمودار بلوکی انتقال چند حاملی با دیدگاه دوم ۲۲

شکل (۲-۵) : همپوشانی طیفی زیر حامل‌ها در OFDM ۲۵

شکل (۲-۶) : طیف چگالی توان یک سیگنال OFDM (a) مقیاس خطی (b) مقیاس لگاریتمی ۲۶

شکل (۲-۷) : پیاده‌سازی OFDM با استفاده از FFT ۲۸

شکل (۲-۸) : فاصله محافظ (پیشوند تکرار) ۲۹

شکل (۲-۹) : OFDM با فاصله محافظ. (a) پالس‌های ارسالی (b) پالس‌های آشکارساز ۳۱

شکل (۲-۱۰) : یک سیستم کلی MIMO-OFDM ۳۲

شکل (۲-۱۱) : بلوک دیاگرام ساده فرستنده MIMO-OFDM ۳۳

شکل (۲-۱۲) : بلوک دیاگرام ساده گیرنده MIMO-OFDM ۳۴

شکل (۳-۱) : نموداری از یک فریم MIMO ۴۲

شکل (۳-۲) : نحوه ارسال بیت‌های آموزشی ۴۳

شکل (۳-۳) : نمایش تصویری روش‌های آموزشی در برابر تخمین کور کانال ۴۵

شکل (۴-۱) : سیستم MIMO-OFDM همراه با استفاده از کدینگ زمان فضا ۴۹

شکل (۴-۲) : تخمین ضرایب کانال در سیستم MIMO-OFDM ۵۵

شکل (۴-۳) : تخمین کانال ساده شده در سیستم‌های MIMO-OFDM ۶۶

شکل (۴-۴) : تخمین کانال به روش تخمین کانال‌های محوشونده آهسته، فاصله زیرکانال‌ها = ۴ ..... ۷۵

شکل (۴-۵) : تخمین کانال به روش تخمین کانال‌های محوشونده آهسته، فاصله زیرکانال‌ها = ۸ ..... ۷۶

شکل (۴-۶) : تخمین کانال به روش تخمین کانال‌های محوشونده آهسته، فاصله زیرکانال‌ها = ۴ ..... ۷۷

شکل (۴-۷) : تخمین کانال به روش تخمین کانال‌های محوشونده سریع، فاصله زیرکانال‌ها = ۲ ..... ۸۳

شکل (۴-۸) : تخمین کانال به روش تخمین کانال‌های محوشونده سریع، فاصله زیرکانال‌ها = ۴ ..... ۸۴

شکل (۴-۹) : تخمین کانال به روش تخمین کانال‌های محوشونده سریع، فاصله زیرکانال‌ها = ۴ ..... ۸۵

فصل اول

مقدمه

۱-۱) مقدمه

در سال‌های اخیر با گسترش روز افزون ارتباطات چند رسانه‌ای شامل صوت، تصویر و داده در شبکه‌های ارتباطی و همچنین افزایش تقاضا برای استفاده از سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم و سیار، طراحی سیستم‌هایی برای ارسال اطلاعات با نرخ داده بالا و راندمان مناسب بر روی کانال‌هایی که معمولاً با اثرات مخربی چون محوشدگی[۱]، نویز، تداخل، تضعیف و ... همراهند، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

با توجه به عملکرد مطلوب سیستم OFDM[۲] در مقابله با انتشار چندمسیره[۳] که از مشکلات عمده کانال‌های مخابراتی بی‌سیم محسوب می‌شوند، استفاده ازاین مدولاسیون یک گزینه مناسب برای اجرای شبکه‌های بی‌سیم پهن‌باند با ظرفیت بالا می‌باشد [۱].

---

[1] - Fading

[2] - Orthogonal Frequency Division Multiplexing

[3] - Multi Path Propagation

OFDM طیف فرکانسی موجود را به مجموعه‌ای از زیرکانال‌های با پاسخ فرکانسی تقریباً یکنواخت تبدیل می‌کند. اطلاعات با نرخ بیت بالا به چند دسته اطلاعات موازی با نرخ بیت‌های پایین‌تر تفکیک شده و هر کدام به وسیله یکی از زیرحامل‌های متعامد مدوله می‌شوند [۲].

درواقع تکنیک OFDM با تقسیم سمبل‌های ارسالی بین چندین زیرحامل[۱] متعامد و ارسال هم‌زمان آنها، در مقابله با اثرات نامطلوب انتشار چندمسیره بسیار مقاوم و کارا می‌باشد. همچنین با پیشرفت تکنولوژی و ساخت ادوات DSP، پیاده‌سازی OFDM ازطریق پردازشگرهای یادشده به‌کمک FFT، بسیار کم‌هزینه و ساده شده است. این مزایا به همراه قابلیت ارائه نرخ داده بالا و پیچیدگی کم گیرنده، موجب شده تا OFDM به عنوان یکی از کاندیداهای اصلی ایجاد سیستم‌های مخابراتی نسل جدید شناخته شود. OFDM تاکنون در تعداد زیادی از استانداردهای مخابراتی بی‌سیم مانند DAB[۲]، DVB[۳]، Wi-Fi (IEEE802.11)، WiMAX (IEEE802.16)، ADSL[۴]، HDTV[۵] و دیگر استانداردها مورد استفاده قرار گرفته است [۴,۳].

تکنولوژی‌های معاصر نیاز به سیستم‌هایی دارند که درعین داشتن نرخ داده بالا، مشکلات اختلال در کانال بی‌سیم نظیر محوشدگی سیگنال، تداخل بین سمبل‌ها[۶] و تداخل هم‌کانال[۷]، اثر کمی روی آنها داشته باشد. آنتن‌های چندگانه به عنوان یک راه حل مناسب برای مقابله با محوشدگی کانال و تداخل و هم‌چنین فراهم کردن نرخ‌های داده بالاتر مطرح هستند. با توجه به این مسائل، استفاده از آنتن‌های متعدد کاربردهای گوناگونی درزمینه مخابرات بی‌سیم پیدا کرده است. یکی از این کاربردها که اخیراً بسیار رواج یافته، سیستم MIMO[۸] یا همان سیستم‌های چند

---

[1] - Subcarrier

[2] - Digital Audio Broadcasting

[3] - Digital Video Broadcasting

[4] - Asymmetric Digital Subscriber Lines

[5] - High-Definition Television (HDTV) Terrestrial Broadcasting

[6] - Inter Symbol Interference

[7] - Co Channel Interference

[8] - Multiple-Input Multiple-Output

ورودی-چند خروجی می‌باشد.

ایده اصلی در MIMO، استفاده از چندین آنتن در فرستنده و هم‌چنین در گیرنده می‌باشد. در این سیستم‌ها، یک رشته‌داده به چندین رشته‌داده تقسیم شده، هر کدام از این زیررشته‌ها مدوله شده و در زمان و فرکانس یکسان (یا متفاوت) از طریق آنتن‌های مختلف ارسال می‌شوند. در گیرنده ترکیبی از رشته داده‌های ارسال شده، از طریق چندین آنتن و از مسیرهای متفاوت دریافت می‌شوند. هریک‌از مسیرهای چندگانه بین فرستنده و گیرنده به عنوان یک کانال عمل می‌کند. گیرنده با کمک الگوریتم‌های MIMO مبتنی بر تخمین کانال‌های بین هر فرستنده و گیرنده، رشته داده ارسالی را بازیابی می‌کند. از این‌رو سیستم‌های MIMO به‌خاطر توانایی آنها در رسیدن به نرخ داده بالاتر بدون نیاز به پهنای باند اضافی، همچنین قابلیت اطمینان بیشتر در دریافت داده در مقایسه با سیستم‌های تک‌آنتنی، به عنوان کانون توجه مخابرات بی‌سیم واقع شده‌اند.

با حرکت به سمت نسل چهارم (4G) مخابرات بی‌سیم پهن‌باند و با توجه به مزایای هر کدام از سیستم‌های MIMO و OFDM، ترکیب این دو تکنولوژی تحت عنوان MIMO-OFDM، به عنوان یکی از مهم‌ترین شیوه‌های تأمین نرخ‌داده بالا همراه با کارائی مطمئن در مقابله با پدیده چندمسیری و دیگر اختلالات کانال‌های بی‌سیم، در سیستم‌های مخابراتی آینده مطرح می‌باشد.

در سیستم‌های بی‌سیم، اطلاعات ارسالی پس از عبور از کانال رادیویی به گیرنده می‌رسند. در گیرنده‌های همدوس معمولی برای بازیابی اطلاعات منتقل‌شده، باید اثر کانال بر روی سیگنال ارسالی تخمین زده شود [۵]. با شرط تخمین دقیق گیرنده از تغییرات کانال بر روی سیگنال ارسالی، می‌توان اطلاعات ارسالی را بازیابی کرد. سیگنال‌های ارسالی تحت عواملی نظیر انتشار چندمسیری، تحرک[1]، پراکندگی‌های محلی[2] و ... دچار تخریب شده و با تغییرات نسبت به سیگنال اصلی ارسالی، به گیرنده می‌رسند. این عوامل معمولاً محدودیت‌هایی بر روی کارائی سیستم اعمال می‌کنند. مهم‌تر از همه موارد، این‌که کانال رادیویی بسیار پویا، متغیر و تصادفی است و خصوصیات

[1] - Mobility

[2] - Local Scattering

آماری کانال وابسته به محیط انتقال می‌باشد. کارائی تخمین کانال مستقیماً به این آمار و ارقام وابسته است. تکنیک‌های متفاوتی برای استخراج و بهره‌برداری از این آمار برای تخمین بهتر کانال پیشنهاد شده‌اند. بنابراین، همانند بسیاری دیگر از سیستم‌های بی‌سیم، تخمین کانال[1]، جزء لاینفک طراحی گیرنده در سیستم‌های MIMO-OFDM بوده و درک اساسی تکنیک‌های تخمین کانال این سیستم‌ها ضروری می‌باشد. همچنان‌که ترکیب سیستم‌های MIMO-OFDM نرخ داده بالاتر را موجب می‌شوند، تکنیک‌های تخمین کانال برای این سیستم‌ها هم نیاز به تحقیق و بررسی بیشتری دارند.

۱-۲) روش‌های دایورسیتی

در سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم سیار، به منظور کاهش اثرات ناشی از چندمسیری و هم‌چنین افزایش قابلیت اطمینان سیستم، بدون افزایش توان ارسالی یا پهنای باند، تکنیک‌های دایورسیتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دایورسیتی روشی برای ارسال چندین نمونه از یک سیگنال می‌باشد. این افزونگی در ارسال اطلاعات به منظور دست یافتن به کارایی بهتر می‌باشد. دایورسیتی از راه‌های مختلفی قابل تحقق می‌باشد. در یک دسته بندی، انواع دایورسیتی را می‌توان به سه دسته دایورسیتی در زمان، دایورسیتی در فرکانس و دایورسیتی در فضا دسته بندی نمود. ترکیب هر کدام از این روش‌ها با یکدیگر هم منجر به انواع جدید دایورسیتی خواهد شد. کدینگ زمان-فضا نمونه‌ای از بکارگیری هم‌زمان دایورسیتی زمانی و دایورسیتی فضایی می‌باشد. دایورسیتی هم در فرستنده و هم در گیرنده قابل اجرا می‌باشد. هر چند که دایورسیتی در گیرنده قدیمی‌تر و معمول‌تر می‌باشد؛ اما در سال‌های اخیر به دایورسیتی در فرستنده هم توجه خاصی شده است. دایورسیتی در فرستنده به صورت حلقه باز[2] و یا حلقه بسته[1] می‌باشد. در نوع حلقه

---

[1] - Channel Estimation

[2] - Open Loop

بسته، فرستنده توسط فیدبکی که از گیرنده به آن می‌رسد، از اطلاعات کانال مطلع می‌شود؛ اما در نوع حلقه باز آن، فرستنده هیچ اطلاعات پیشینی از کانال نخواهد داشت. شرح مختصری از شیوه‌های مختلف دایورسیتی در ادامه آورده شده است.

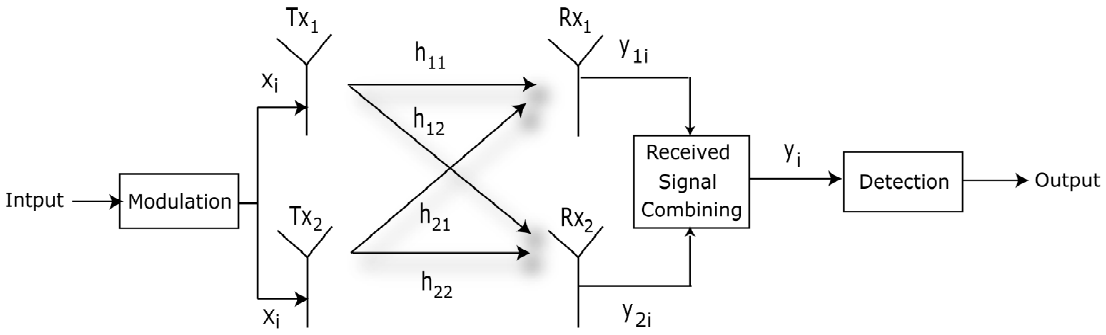
۱-۲-۱) دایورسیتی فضایی

به منظور بهره‌گیری از دایورسیتی فضایی، آنتن‌های متعدد در موقعیت‌های مکانی مختلف به کار گرفته می‌شوند. به منظور تحقق دایورسیتی در فرستنده، از چندین آنتن در فرستنده و به منظور تحقق دایورسیتی در گیرنده، از چندین آنتن در گیرنده استفاده می‌شود. مزیت مهم دایورسیتی فضایی، عدم نیاز به زمان و یا فرکانس اضافی به منظور تحقق دایورسیتی می‌باشد.

عیب اصلی این نوع دایورسیتی، نیاز به نمونه‌های مختلف سیگنال است که تحت تأثیر محوشدگی‌های مستقل قرار گیرند. به این منظور، آنتن‌ها باید در فواصلی نسبت به هم قرار گیرند که سیگنال‌های ارسالی و یا دریافتی آنها، با کانال‌های ناهمبسته نسبت به هم مواجه باشند. اگر موقعیت آنتن‌ها نسبت به هم مناسب انتخاب نشوند، در این صورت همه آنتن‌ها مسیرهای تقریباً مشابهی را تجربه خواهند کرد و بنابراین نمونه‌های دریافتی سیگنال‌ها همبستگی بالایی با یکدیگر خواهند داشت. در نتیجه بهره‌ای از دایورسیتی نخواهیم برد. دایورسیتی فضایی برای مقابله با هر دو نوع محوشدگی انتخاب زمان و انتخاب فرکانس به‌کار گرفته می‌شود. در شکل (۱-۱) دایورسیتی فضایی نمایش داده شده است.

---

[1] - Close Loop



شکل (۱-۱) : دایورسیتی فضایی (MIMO)

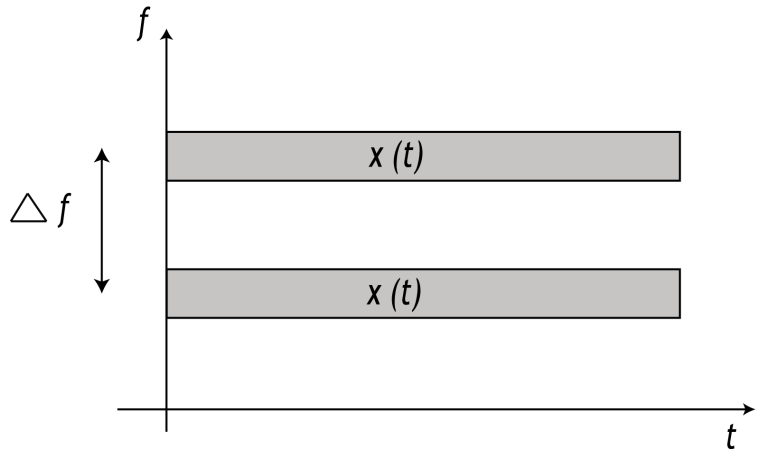
۱-۲-۲) دایورسیتی فرکانسی

یکی از راه‌های تحقق دایورسیتی، استفاده از حامل‌های متفاوت برای مدوله کردن سیگنال اطلاعات می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است، این حامل‌ها حداقل به اندازه پهنای باند همدوس (همبستگی) کانال (Δf_c)، باید از یکدیگر جدا شوند تا نمونه‌های متفاوت سیگنال تحت تأثیر محوشدگی‌های مستقل واقع شوند. نمونه‌های مستقل دریافتی در گیرنده، به طور بهینه با هم ترکیب می‌شوند تا بتوان سیگنال‌های ارسالی را آشکار کرد. دایورسیتی فرکانسی برای غلبه بر محوشدگی انتخاب فرکانس مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از آنجا که محدوده فرکانسی موجود و قابل استفاده محدود می‌باشد، در بسیاری موارد بکارگیری دایورسیتی فرکانسی به تنهایی مطلوب نمی‌باشد.

۱-۲-۳) دایورسیتی زمانی

روش دیگر نائل شدن به دایورسیتی، استفاده از زمان به جای فضا می‌باشد. می‌باشد. مطابق شکل (۱-۳)، در دا یورسیتی زمانی سیگنال مشابهی را در n بازه زمانی مختلف ارسال می‌کنیم. بنابراین n نمونه یکسان از یک سیگنال ارسال می‌شود. نکته مهم در اینجا، تفاوت زمانی بین این



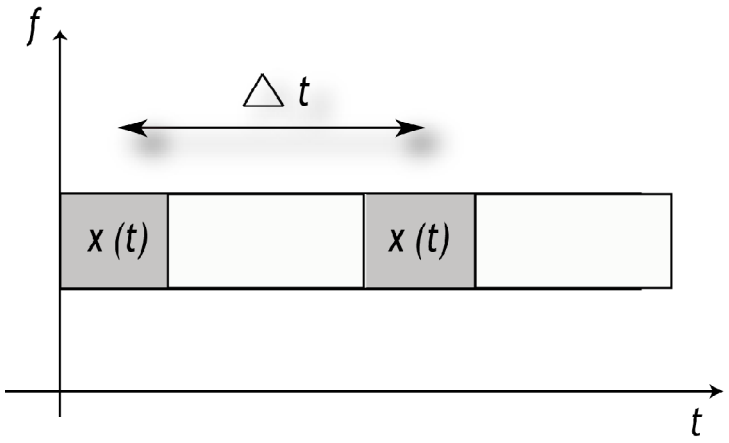
شکل (۱-۲) : دایورسیتی فرکانسی

بازه‌های زمانی ارسال سیگنال می‌باشد. حداقل فاصله زمانی بین دو نمونه متوالی مشابه از یک سیگنال، باید به اندازه زمان همدوس (همبستگی) کانال (Δt_c) باشد تا نمونه‌های یکسان از یک سیگنال، تحت تأثیر محوشدگی‌های مستقل قرار گیرند. عیب دیگر این نوع دایورسیتی، نیاز به یک بازه زمانی ارسال می‌باشد که برای کاربردهای مخابراتی زنده، خوشایند نیست. با استفاده از نوع دیگر دایورسیتی مانند دایورسیتی فرکانسی و یا دایورسیتی فضایی، می‌توان بر این مسأله فایق آمد.

با ترکیب انواع دایورسیتی‌های ذکر شده، می‌توان به دایورسیتی‌های ترکیبی دست یافت. روش‌های کدینگ مطرح شده در چند سال اخیر، به عنوان نمونه، کدینگ بلوکی زمان-فضا[1] (STBC)، از بیش از یک نوع دایورسیتی استفاده می‌کنند. ترکیبات مهم انواع دایورسیتی به شکل زیر می‌باشند :

- دایورسیتی زمان-فضا (ST)
- دایورسیتی فرکانس-فضا (SF)
- دایورسیتی فرکانس-زمان-فضا (STF)

[1] - Space-Time Block Coding



شکل (۱-۳) : دایورسیتی زمانی

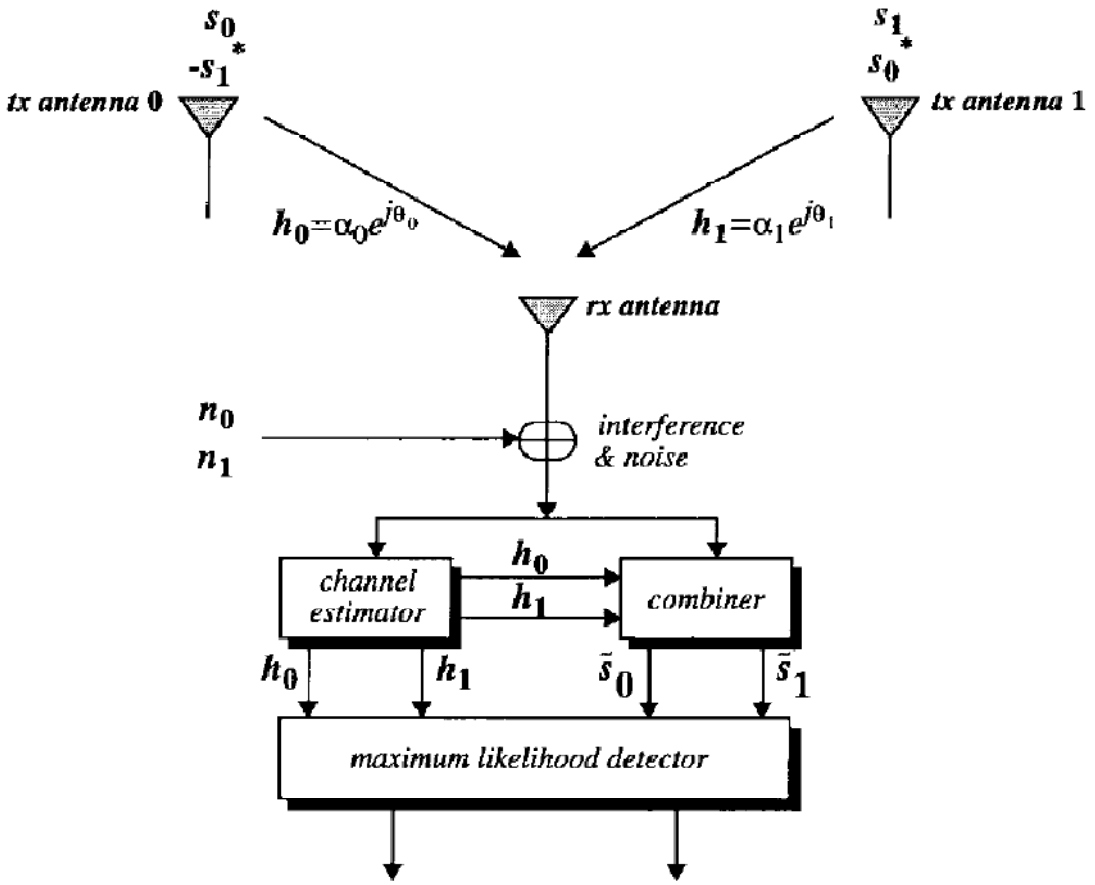
۱-۲-۴) دایورسیتی در فرستنده

در سال‌های اخیر، روش‌های زیادی برای اجرای دایورسیتی در فرستنده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در سال ۱۹۹۸، آقای الموتی یک روش ساده و جالب برای تحقق این نوع دایورسیتی ارائه کرد ونشان داد که می‌توان با اجرای این نوع دایورسیتی در فرستنده، به کارایی مشابه با دایورسیتی در گیرنده رسید [٦].

راهکار ارائه شده توسط الموتی، توسط تارخ و دیگران برای یک ساختار کامل دایورسیتی در فرستنده با استفاده از دایورسیتی زمان و فضا تحت عنوان کدینگ بلوکی زمان-فضا بسط یافت [۷]. این کدینگ برای استفاده از دایورسیتی فرکانس و فضا با عنوان کدینگ بلوکی فرکانس-فضا در مرجع [۸] توسعه یافته است.

۱-۳) کدینگ الموتی

شکل (۱-۴) نمایش باند پایه طرح الموتی برای دایورسیتی در فرستنده با دو فرستنده و یک



شکل (۱-۴) : طرح دایورسیتی در فرستنده با دو فرستنده و یک گیرنده

گیرنده را نشان می‌دهد. در طی دوره زمانی یک سمبل، دو سیگنال از دو آنتن به صورت هم‌زمان ارسال می‌شوند. سیگنال ارسالی از آنتن صفر با s_0 و سیگنال ارسالی از آنتن یک با s_1 نشان داده شده‌اند. در طی زمان سمبل بعدی، $-s_1^*$ از آنتن صفر و سیگنال s_0^* از آنتن یک ارسال می‌شوند. این موضوع در جدول (۱-۱) نشان داده شده است.

مطابق با جدول (۱-۱)، کدینگ هم در زمان و هم در فضا انجام می‌شود (کدینگ زمان-فضا). کدینگ را می‌توان به جای دو دوره سمبل مجاور، در دو حامل مجاور هم انجام داد (کدینگ فرکانس-فضا).

جدول (۱-۱) : کدینگ و دایورسیتی در فرستنده با دو آنتن (کدینگ زمان-فضا الموتی)

	antenna 0	antenna 1
time t	s_0	s_1
time $t+T$	$-s_1^*$	s_0^*

کانال در زمان t را می‌توان با مقادیر مختلط $h_0(t)$ برای آنتن فرستنده صفر و $h_1(t)$ برای آنتن فرستنده یک مدل کرد. فرض می‌شود که محوشدگی در مدت زمان دو سمبل متوالی، ثابت می‌باشد. بنابراین روابط زیر را خواهیم داشت :

$$\begin{aligned} h_0(t) &= h_0(t+T) = h_0 = \alpha_0 e^{j\theta_0} \\ h_1(t) &= h_1(t+T) = h_1 = \alpha_1 e^{j\theta_1} \end{aligned} \qquad (۱-۱)$$

T بیانگر دوره زمانی سمبل[1] می‌باشد. سیگنال‌های دریافتی را می‌توان به شکل زیر نوشت :

$$\begin{aligned} r_0 &= r(t) = h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0 \\ r_1 &= r(t+T) = -h_0 s_1^* + h_1 s_0^* + n_1 \end{aligned} \qquad (۲-۱)$$

که r_0 و r_1 سیگنال‌های دریافتی در زمان‌های t و $t+T$ و n_0 و n_1 هم متغیرهای تصادفی مختلط و نشان دهنده نویز و تداخل در هر گیرنده می‌باشند.

بلوک ترکیب کننده که در شکل نشان داده شده، یک ترکیب خطی ساده از سیگنال‌های دریافتی مطابق روابط زیر را به آشکارساز بیشترین درست‌نمایی[2] (ML) ارسال می‌کند :

$$\begin{aligned} \tilde{s}_0 &= h_0^* r_0 + h_1 r_1^* \\ \tilde{s}_1 &= h_1^* r_0 - h_0 r_1^* \end{aligned} \qquad (۳-۱)$$

با جایگذاری روابط (۱-۱) و (۱-۲) در رابطه (۱-۳)، خواهیم داشت :

---

[1] - Symbol Duration

[2] - Maximum Likelihood