

تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - مخابرات

عنوان :

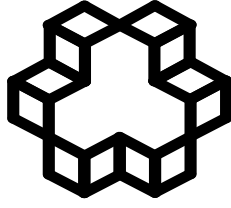
تخمین کانال در سیستم‌های MIMO-OFDM به روش کور

استاد راهنما: جناب آقای دکتر سهیل سالاری

استاد مشاور: سرکار خانم مهندس قدردان

دانشجو: علی پیرسیاوش

اسفند ۸۹



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده برق

تائیدیه هیات داوران

هیات داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان: تخمین کانال در سیستم‌های **MIMO-OFDM** به روش کور توسط آقای علی پیرسیاوش صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته: مخابرات، گرایش: سیستم با رتبه: مورد تائید قرار می دهند.

- | | | |
|-----------------|-------------------------------|-------|
| ۱. استاد راهنما | جناب آقای دکتر سهیل سالاری | امضاء |
| ۲. استاد ارزیاب | جناب آقای دکتر محمود احمدیان | امضاء |
| ۳. استاد ارزیاب | جناب آقای دکتر بهمن ابوالحسنی | امضاء |

تقدیم بہ پدر و مادر عزیزم

اظهار نامه دانشجوی

این جانب **علی پیرسیاوش** دانشجوی کارشناسی ارشد رشته **مخابرات** گرایش **سیستم** دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان **تخمین کانال در سیستم‌های MIMO-OFDM به روش کور** با راهنمایی استاد محترم جناب آقای **دکتر سهیل سالاری**، توسط این‌جانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب ارائه شده در این پایان‌نامه مورد تأیید این‌جانب می‌باشد و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. همچنین گواهی می‌نمایم مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط این‌جانب یا فرد دیگری در هیچ‌جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو

تاریخ

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هرگونه کپی‌برداری بصورت کل پایان‌نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.

ضمناً کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه قابل واگذاری به شخص ثالث نیست. هم‌چنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مراجع مجاز نمی‌باشد.

با سپاس فراوان از استاد ارجمند جناب آقای دکتر سهیل سالاری و همچنین سرکار خانم مهندس
قدردان که با راهنمایی‌های خود مرا در انجام این پروژه یاری رساندند.

و با سپاس از مرکز تحقیقات مخابرات ایران که این پایان‌نامه را طی قرارداد شماره ۸۹۸۲/۵۰۰
تاریخ ۸۹/۶/۳۰ تحت حمایت مادی و معنوی خود قرار داد.

چکیده

درسال‌های اخیر، افزایش تقاضا برای برقراری ارتباط با کیفیت مناسب و نرخ ارسال بالا موضوعی است که باعث جذابیت سیستم‌های چند ورودی - چند خروجی مبتنی بر مالتی‌پلکسینگ فرکانسی متعامد تحت عنوان MIMO-OFDM گردیده است. مالتی‌پلکسینگ فرکانسی از حیث مقاومت در مقابل اثرات مخرب کانال فیدینگ و چندگانگی در ارسال و دریافت از باب افزایش ظرفیت مخابره داده دلایلی هستند که MIMO-OFDM را کاندیدای اصلی نسل چهارم مخابرات بی‌سیم قرار داده‌اند. در این میان تخمین کانال که در کنار فرآیند همزمان‌سازی از چالش‌های عمده پیاده‌سازی گیرنده به حساب می‌آید، موضوع دیگری است که در بکارگیری سیستم‌های MIMO-OFDM می‌بایست مدنظر قرار گیرد. از این باب ما نیز در این پایان‌نامه به بررسی فرآیند تخمین کانال در سیستم‌های MIMO-OFDM پرداخته و از میان شیوه‌های موجود، روش‌های کور مبتنی بر آمارگان مرتبه دوم را به دلیل بازدهی طیفی بالا و سرعت همگرایی مناسب انتخاب نموده‌ایم. در این راستا تلاش خود را به دو دسته کلی پیش‌کدگذارهای خطی و روش‌های مبتنی بر تئوری زیرفضا معطوف نموده و سعی کرده‌ایم تا با اصلاح، ابداع و ارائه راهکارها و الگوریتم‌های بهینه، کارایی این دسته از تخمین‌گرها را افزایش و میزان خطای سیستم را کاهش دهیم. الگوریتم پیشنهادی تخمین توأمان بهبود یافته و بروزرسانی ماتریس کواریانس در زمینه تخمین‌گرهای مبتنی بر پیش‌کدگذارهای خطی و نیز بازآرایی سمبل‌های دریافتی همراه با روش تحلیل مبتنی بر تجزیه شاخه هم‌فاز و ربع‌فاز در روش‌های زیرفضا نمونه‌هایی از این تلاش می‌باشند. همچنین آزمایش شیوه‌ها و الگوریتم‌های پیشنهادی، با فرض استقلال داده‌های ارسال و نیز همزمانی کامل فرستنده و گیرنده، در محیط شبیه‌سازی و تحت شرایط متنوع، اجرا و نتایج آن در قالب اشکال و نمودارهای مختلف به تصویر کشیده شده است.

کلمات کلیدی: مالتی‌پلکسینگ فرکانسی متعامد (OFDM)، ماتریس کواریانس، تخمین کور

کانال، پیش‌کدگذاری، تئوری زیرفضا، بازآرایی، سیستم‌های چند ورودی - چند خروجی (MIMO).

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱- سیستم‌های OFDM	۱
۲-۱- سیستم‌های MIMO – OFDM	۲
۳-۱- تخمین کانال	۳
۴-۱- ساختار پایان‌نامه	۴
فصل دوم: مروری بر کانال‌های فیدینگ و سیستم‌های OFDM	۶
۱-۲- مقدمه	۶
۲-۲- پدیده محوشوندگی (فیدینگ)	۶
۱-۲-۲- عوامل بروز پدیده فیدینگ	۶
۲-۲-۲- گسترش زمانی سیگنال در حوزه تأخیر زمانی	۷
۳-۲-۲- گسترش زمانی سیگنال در حوزه فرکانس	۹
۴-۲-۲- رفتار متغیر بازمان کانال در حوزه فرکانس	۱۱
۵-۲-۲- مدل کانال فیدینگ	۱۱
۶-۲-۲- روش‌های مقابله با فیدینگ	۱۴
۳-۲-۳- ساختار مالتی‌پلکسینگ فرکانسی متعامد	۱۶
۱-۳-۲- توصیف کیفی	۱۶
۲-۳-۲- باند محافظ (استفاده از پیشوند دوری)	۱۷
۳-۳-۲- سیستم مخابراتی مبتنی بر مدولاسیون OFDM	۲۰
فصل سوم: مباحثی از تئوری تخمین و روش‌های تخمین کانال	۲۲
۱-۳- مقدمه	۲۲

- ۲۲-۳-۲- بیان کلی مسئله ۲۲
- ۲۲-۳-۱- فرمولاسیون مسئله ۲۲
- ۲۳-۳-۲- مدل خطی ۲۳
- ۲۴-۳-۳- معیارهای طراحی تخمین گرها ۲۴
- ۲۴-۳-۱- تخمین گر حداقل مربعات ۲۴
- ۲۵-۳-۲- تخمین گر مبتنی بر حداقل متوسط مربع خطا ۲۵
- ۲۶-۳-۳- تخمین گر استقرار بیشینه ۲۶
- ۲۷-۳-۴- تخمین گر شباهت بیشینه ۲۷
- ۲۸-۳-۴- گیرندگی بهینه و تخمین کانال ۲۸
- ۳۰-۳-۵- تخمین گرهای کانال شبه بهینه ۳۰
- ۳۰-۳-۵-۱- تخمین گرهای داده یار یا تخمین گرهای مبتنی بر رشته‌های آموزشی ۳۰
- ۳۱-۳-۵-۲- تخمین کور کانال ۳۱
- ۳۴-۳-۵-۳- تخمین نیمه کور کانال ۳۴
- ۳۵-۳-۵-۴- تخمین گرهای کدیاری ۳۵
- ۳۶-۳-۶- تعاریف آماری ۳۶
- ۳۶-۳-۶-۱- فضای نمونه‌های کلی و جزئی ۳۶
- ۳۶-۳-۶-۲- خطای آماری تخمین ۳۶
- ۳۹-۳-۶-۳- ارزش انتظاری ۳۹
- ۴۰-۳-۶-۴- همبستگی و ماتریس کواریانس ۴۰
- ۴۲-۳-۷- جمع بندی ۴۲

فصل چهارم: پیش‌کدگذاری ۴۳

۴-۱- مقدمه ۴۳

۴-۲- فرمولاسیون مسئله ۴۴

۴-۳- پیش‌کدگذاری ۴۶

۴-۴- ابهام در تخمین کور کانال ۴۸

۴-۵- الگوریتم تخمین بر مبنای استفاده مشترک از عناصر ماتریس کواریانس ۴۸

۴-۵-۱- الگوریتم تخمین توأمان ۴۹

۴-۵-۲- الگوریتم پیشنهادی تخمین توأمان بهبود یافته ۵۰

۴-۵-۳- روش پیشنهادی به روزرسانی ماتریس کواریانس ۵۱

۴-۶- کران کرامر-رائو ۵۲

۴-۷- نتایج شبیه‌سازی ۵۳

فصل پنجم: تخمین کور کانال مبتنی بر تئوری زیرفضا ۶۰

۵-۱- مقدمه ۶۰

۵-۲- تعاریف اولیه ۶۱

۵-۲-۱- مقادیر و بردارهای ویژه ۶۱

۵-۲-۲- مقادیر و بردارهای تکین ۶۳

۵-۲-۳- رتبه ماتریس ۶۵

۵-۳- تئوری زیر فضا ۶۶

۵-۴- سیستم SISO ۶۹

۷۲	..... ۱-۴-۵- بازآرایی
۷۸	..... ۲-۴-۵- تجزیه شاخه هم‌فاز و ربع‌فاز
۸۰	..... ۳-۴-۵- نتایج شبیه‌سازی
۸۶	..... ۵-۵- سیستم MIMO
۸۶	..... ۱-۵-۵- مدل سیستم
۹۰	..... ۲-۵-۵- بازآرایی سمبل‌های دریافتی
۹۲	..... ۳-۵-۵- کران کرامر- راثو
۹۳	..... ۴-۵-۵- نتایج شبیه‌سازی
۱۰۲	..... فصل ششم: جمع‌بندی و پیشنهادات
۱۰۲	..... ۱-۶- جمع‌بندی
۱۰۳	..... ۲-۶- پیشنهادات برای تحقیقات آینده
۱۰۵	..... پیوست: کران پایین پارامترهای تخمین
۱۰۸	..... مراجع

فهرست اشکال

فصل دوم: مروری بر کانال‌های فیدینگ و سیستم‌های OFDM

- شکل (۱-۲) روابط بین توابع همبستگی و توابع چگالی توان کانال ۸
- شکل (۲-۲) رابطه بین تابع انتقال کانال و پهنای باند سیگنال ۱۰
- شکل (۳-۲) مقایسه سیستم FDM و سیستم OFDM در استفاده از پهنای باند ۱۶
- شکل (۴-۲) مثالی از یک سیگنال گسسته ارسالی ۱۷
- شکل (۵-۲) مدل گسسته‌ای از پاسخ ضربه یک کانال با ۳ ضریب ۱۷
- شکل (۶-۲) نمایش فرآیند تداخل بین سمبلی ۱۸
- شکل (۷-۲) نمایش فرآیند تداخل بین سمبلی، پاسخ کانال به ورودی ۱۸
- شکل (۸-۲) افزودن پیشوند دوری به سمبل‌های سیگنال ارسالی ۱۹
- شکل (۹-۲) مدل گسسته سیستم OFDM ۲۱
- شکل (۱۱-۲) سیستم MIMO-OFDM با N_t آنتن فرستنده و N_r آنتن گیرنده ۲۱

فصل سوم: مباحثی از تئوری تخمین و روش‌های تخمین کانال

- شکل (۱-۳) آشکارسازی بهینه در مقایسه با تقریب‌های شبه‌بهینه مبتنی بر تخمین کانال ۲۹
- شکل (۲-۳) دسته‌بندی تخمین‌گرهای شبه‌بهینه کانال ۳۴
- شکل (۳-۳) حلقه اصلاح ضرایب کانال در تخمین‌گرهای کدیاری در مقایسه با سایر تخمین‌گرها ۳۵
- شکل (۴-۳) اندازه فوریه گسسته ضرایب اصلی کانال ۳۷
- شکل (۵-۳) اندازه فوریه گسسته ضرایب تخمینی کانال در دو فضای نمونه‌های کلی و جزئی ($N=10$) ۳۷

شکل (۳-۶) اندازه فوریه گسسته ضرایب تخمینی کانال در دو فضای نمونه‌های کلی و جزئی ($N=50$) ۳۸

شکل (۳-۷) اندازه فوریه گسسته ضرایب تخمینی کانال در دو فضای نمونه‌های کلی و جزئی ($N=100$) ... ۳۸

فصل چهارم: پیش‌کدگذاری

شکل (۴-۱) سیستم OFDM باند پایه معمول ۴۴

شکل (۴-۲) تخمین کانال بر اساس ستون‌های مختلف ماتریس کواریانس ۵۴

شکل (۴-۳) مقایسه تخمین کانال قویترین ستون با ستون‌های مختلف ۵۴

شکل (۴-۴) مقایسه تخمین‌گر پیشنهادی و تخمین‌گر [۲۶] برای ۱۵۰ بلوک OFDM دریافتی ۵۵

شکل (۴-۵) نمودار NMSE بر حسب تعداد بلوک‌های OFDM دریافتی بر مبنای الگوریتم پیشنهادی،

الگوریتم [۲۶] و یک ستون از ماتریس کواریانس تحت $SNR=10$ (dB) ۵۶

شکل (۴-۶) نمودار NMSE بر حسب تعداد بلوک‌های OFDM دریافتی بر مبنای الگوریتم پیشنهادی،

الگوریتم [۲۶] و یک ستون از ماتریس کواریانس تحت $SNR=8$ (dB) ۵۶

شکل (۴-۷) نمودار NMSE بر حسب SNR برای ۱۰۰ بلوک OFDM دریافتی و نمایش تاثیر تکنیک به

روزرسانی ماتریس کواریانس برای الگوریتم تخمین [۲۶] ۵۷

شکل (۴-۸) نمودار NMSE بر حسب تعداد بلوک‌های OFDM دریافتی بر مبنای الگوریتم [۲۶] و نمایش

اعمال یا عدم اعمال تکنیک به روزرسانی تحت $SNR=10$ (dB) ۵۸

شکل (۴-۹) نمودار NMSE بر حسب تعداد بلوک‌های OFDM دریافتی بر مبنای الگوریتم [۲۶] و نمایش

اعمال یا عدم اعمال تکنیک به روزرسانی تحت $SNR=8$ (dB) ۵۸

شکل (۴-۱۰) نمودار NMSE بر حسب SNR برای ۱۰۰ بلوک OFDM دریافتی ۵۹

شکل (۴-۱۱) نمودار NMSE بر حسب بلوک‌های OFDM دریافتی تحت $SNR=10$ (dB) ۵۹

فصل پنجم : تخمین کور کانال مبتنی بر تئوری زیرفضا

- شکل (۱-۵) دو بردار ویژه ماتریس A ۶۲
- شکل (۲-۵) ایده اساسی روش بر مبنای زیرفضا (subspace-base) ۶۶
- شکل (۳-۵) نمایش مقادیر ویژه ۶۷
- شکل (۴-۵) سیستم OFDM باند پایه معمول ۷۰
- شکل (۵-۵) برقراری اصل تعامد تئوری زیرفضا و همگرایی به صفر درایه‌های ماتریس $U_0^H \bar{H}(h)$ ۷۵
- شکل (۶-۵) نمایش زاویه تعامد نسبت به تعداد بلوک‌های دریافتی برای $SNR=10,15,20$ (dB) ۷۶
- شکل (۷-۵) میانگین مربعات خطا برای $SNR=10,15,20$ (dB) ۷۶
- شکل (۸-۵) NMSE بر حسب تعداد بلوک‌های OFDM دریافتی برای $SNR=5,10,15,20$ (dB) ۸۰
- شکل (۹-۵) نمایش NMSE بر حسب SNR برای $M=100,200,300$ ۸۱
- شکل (۱۰-۵) مقایسه کارایی تجزیه شاخه هم‌فاز و ربع‌فاز و روش معمول مرجع [۳۹] در تخمین ضرایب کانال بر حسب تعداد بلوک‌های OFDM دریافتی برای $SNR=5$ (dB) ۸۲
- شکل (۱۱-۵) مقایسه کارایی تجزیه شاخه هم‌فاز و ربع‌فاز و روش معمول مرجع [۳۹] در تخمین ضرایب کانال بر حسب تعداد بلوک‌های OFDM دریافتی برای $SNR=10$ (dB) ۸۲
- شکل (۱۲-۵) مقایسه کارایی تجزیه شاخه هم‌فاز و ربع‌فاز و روش معمول مرجع [۳۹] در تخمین ضرایب کانال بر حسب تعداد بلوک‌های OFDM دریافتی برای $SNR=15$ (dB) ۸۳
- شکل (۱۳-۵) مقایسه کارایی تجزیه شاخه هم‌فاز و ربع‌فاز و روش معمول مرجع [۳۹] در تخمین ضرایب کانال بر حسب تعداد بلوک‌های OFDM دریافتی برای $SNR=20$ (dB) ۸۳
- شکل (۱۴-۵) مقایسه کارایی تجزیه شاخه هم‌فاز و ربع‌فاز و روش معمول مرجع [۳۹] در تخمین ضرایب کانال بر حسب SNR برای $M=100$ ۸۴

شکل (۱۵-۵) مقایسه کارایی تجزیه شاخه همفاز و ربع فاز و روش معمول مرجع [۳۹] در تخمین ضرایب
کانال بر حسب SNR برای $M=300$ ۸۵

شکل (۱۶-۵) مدل سیستم MIMO-OFDM ۸۷

شکل (۱۷-۵) نمایش زاویه تعامد نسبت به تعداد بلوک‌های دریافتی برای $SNR=20$ (dB) و مقایسه کارایی
روش تجزیه شاخه همفاز و ربع‌فاز نسبت به روش مرجع [۴۱] در یک سیستم $MIMO - OFDM - 2 \times 2$
..... ۹۴

شکل (۱۸-۵) Average MSE نسبت به تعداد بلوک‌های دریافتی برای $SNR=20$ (dB) در یک سیستم
 $MIMO - OFDM - 2 \times 2$ ۹۵

شکل (۱۹-۵) نمایش زاویه تعامد بر حسب SNR برای $M=200$ در یک سیستم $MIMO - OFDM - 2 \times 2$
..... ۹۶

شکل (۲۰-۵) Average MSE بر حسب SNR برای $M=200$ در یک سیستم $MIMO - OFDM - 2 \times 2$
..... ۹۶

شکل (۲۱-۵) نمایش زاویه تعامد نسبت به تعداد بلوک‌های دریافتی برای $SNR=20$ (dB) در یک سیستم
 $MIMO - OFDM - 3 \times 3$ ۹۷

شکل (۲۲-۵) Average MSE نسبت به تعداد بلوک‌های دریافتی برای $SNR=20$ (dB) در یک سیستم
 $MIMO - OFDM - 3 \times 3$ ۹۸

شکل (۲۳-۵) نمایش زاویه تعامد بر حسب SNR برای $M=200$ در یک سیستم $MIMO - OFDM - 3 \times 3$
..... ۹۸

شکل (۲۴-۵) Average MSE بر حسب SNR برای $M=200$ در یک سیستم $MIMO - OFDM - 3 \times 3$
..... ۹۹

شکل (۲۵-۵) نمایش زاویه تعامد نسبت به تعداد بلوک‌های دریافتی برای $SNR=20$ (dB) در یک سیستم
 $MIMO - OFDM - 4 \times 4$ ۹۹

شکل (۲۶-۵) Average MSE نسبت به تعداد بلوک‌های دریافتی برای SNR=20 (dB) در یک سیستم

۱۰۰ MIMO – OFDM – 4 × 4

شکل (۲۷-۵) نمایش زاویه تعامد بر حسب SNR برای M=200 در یک سیستم MIMO – OFDM – 4 × 4

۱۰۰

شکل (۲۸-۵) Average MSE بر حسب SNR برای M=200 MIMO – OFDM – 4 × 4 ۱۰۱

فهرست جداول

فصل اول: مقدمه

جدول (۱-۱) استانداردهای MIMO و فناوری‌های مرتبط با آن ۲

فصل دوم: مروری بر کانال‌های فیدینگ و سیستم‌های OFDM

جدول (۱-۲) روش‌های مقابله با اثرات مخرب فیدینگ ۱۵

فصل اول: مقدمه

۱-۱- سیستم‌های OFDM^۱

امروزه با پیشرفت سریع فن‌آوری به خصوص در زمینه مخابرات و ارتباطات رادیویی نیاز روزافزون به افزایش نرخ انتقال داده در عین حفظ کیفیت، یکی از چالش‌های بزرگ محسوب می‌گردد. در این میان، روش‌هایی چون مدولاسیون چند حاملی^۲ که در آن دنباله داده با نرخ بیت زیاد به چندین دنباله موازی با نرخ کم تقسیم و روی حامل‌های مختلف مدوله می‌شود تا با افزایش مقاومت در برابر محوشوندگی (فیدینگ)^۳، گسترش تأخیر^۴، تداخل بین سمبلی^۵ و ... امکان ارسال داده با نرخ بالا را فراهم کند، جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند [۱]. در میان این دسته از تکنیک‌های چندحاملی، مالتی‌پلکسینگ فرکانسی متعامد، حساسیت کمتری نسبت به عوامل مخرب چون محوشوندگی، تداخل بین سمبلی و ... از خود نشان داده و در عین حال به دلیل ساختار متعامد زیر حامل‌ها^۶ از کارایی طیفی بالاتری برخوردار می‌باشد و در نتیجه کاربرد آن روز به روز در حال گسترش و نوآوری است [۲]، [۳]. از جمله این کاربردها می‌توان به سیستم دیجیتال پخش همگانی صدا و تصویر در اروپا (DAB/DVB)^۷ [۴]، [۵]، سیستم‌های مخابراتی پرسرعت نظیر ADSL^۸ [۶]، HIPERLAN^۹ [۷]، [۸] و استاندارد IEEE 802.11a Wireless LAN [۹] اشاره نمود. به بیان دیگر OFDM را می‌توان اساس و پایه فناوری نسل چهارم مخابرات سیار به حساب آورد [۱۰]، [۱۱]. البته به کارگیری سیستم‌های OFDM دشواری‌های خاصی نیز دارد که از آن جمله می‌توان به حساسیت نسبت به همزمانسازی فرکانسی و شیفت داپلر^{۱۰} PAPR بالا و ... اشاره کرد [۳].

¹ Orthogonal Frequency division Multiplexing

² Multicarrier Modulation

³ Fading

⁴ Delay Spread

⁵ Inter Symbol Interference (ISI)

⁶ Sub-Carriers

⁷ Digital Audio/Video Broadcasting (DAB/DVB)

⁸ Asymmetric Digital Subscriber Line

⁹ High Performance Local Radio Area Network

¹⁰ Peak to Average Power Ratio

۲-۱- سیستم‌های MIMO – OFDM

از اهداف اصلی سیستم‌های مخابراتی بی سیم نسل‌های آینده، می‌توان به فراهم کردن نرخ انتقال بالا و کیفیت سرویس‌دهی مناسب اشاره کرد. فناوری بی‌سیم چند ورودی-چند خروجی (MIMO) راهکار دیگری است که به واسطه استفاده چندگانه از فضا در ارسال و دریافت، شایسته این تقاضاست [۱۲]. به کارگیری چند آنتن در هر دو سوی ارتباط، از یک دید با فراهم کردن امکان ارسال چندین رشته داده موجب افزایش کارایی طیفی و از دید دیگر با ایجاد امکان برای دریافت چندباره یک رشته بیت، موجب کاهش خطا می‌گردد. این شیوه به عنوان مثال می‌تواند در ^۱HSDPA به کار رود که بخشی از استاندارد سیستم ارتباطات راه دور سیار جهانی (UMTS^۲) است. همچنین تلاش‌هایی در جریان است تا در ترکیب نسل جدید و بعدی استاندارد WLAN IEEE 802.11، از سیستم‌های MIMO استفاده شود [۱۲]. از سوی دیگر سیستم‌های مبتنی بر مدولاسیون OFDM نیز جهت بهبود کارایی طیفی خود گرایش زیادی به شیوه MIMO پیدا کرده‌اند. از جمله این ساختارها می‌توان به سیستم‌های مبتنی بر استانداردهای WLAN 802.11n، WiMAX 802.16-2004، WiMAX 802.16e و یا 3GPP Release 8 (LTE) اشاره نمود که همگی از ساختار MIMO-OFDM/OFDMA جهت ارسال و دریافت اطلاعات بهره می‌گیرند [۱۳]. در جدول (۱-۱) به برخی دیگر از این کاربردها اشاره شده است.

جدول (۱-۱) استانداردهای MIMO و فناوری‌های مرتبط با آن [۱۳]

Standard	Technology
WLAN 802.11n	OFDM
WiMAX 802.16-2004	OFDM/OFDMA
WiMAX 802.16e	OFDMA
3GPP Release 8 (LTE)	OFDMA
802.20	OFDM
802.22	OFDM

^۱ High Speed Downlink Packet Access

^۲ Universal Mobile Telecommunications System