

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه بیرجند
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق - مخابرات

بررسی روش های تخمین کانال در سیستم های تجاری مبتنی بر MIMO-OFDM

فاطمه صالحی

استاد راهنما:

دکتر ناصر ندا

استاد مشاور:

دکتر حمید فرخی

تابستان ۱۳۹۱

چکیده

فن‌آوری‌های جدید مانند مالتی‌پلکس فرکانسی متعامد (OFDM) و کانال‌های چند ورودی-چند خروجی (MIMO) می‌توانند عملکرد سیستم‌های مخابراتی رایج را بهبود ببخشند. با استفاده از مزایای این دو فن‌آوری می‌توان به نرخ داده‌ی بالا نائل شد. 3GPP LTE استاندارد جدید مخابراتی است که در راستای سیر تکاملی UMTS قرار دارد و در پاسخ به تقاضای فزاینده برای سرویس‌های چندرسانه‌ای با کیفیت بالا، از این دو فن‌آوری بهره می‌گیرد. یکی از چالش‌های مهم در سیستم‌های MIMO-OFDM، تخمین کانال با دقت و سرعت بالا به منظور آشکارسازی صحیح سیگنال‌های دریافتی از یک سو و فیدبک به فرستنده، جهت تخصیص منابع و انتخاب به موقع آرایش ارسال بر روی آنتن‌های چندگانه از سوی دیگر است. لذا بررسی روش‌های تخمین کانال سریع، دقیق و با پیچیدگی کم، در سیستم‌های MIMO-OFDM امری ضروری است. تخمین کانال به کمک پایلوت، روشی است که در آن سیگنال‌های شناخته شده به نام پایلوت، با الگوی مشخص در میان داده یا حتی بر روی آن، برای بدست آوردن اطلاعات کانال ارسال می‌شوند. هدف ما در این پروژه، تخمین کانال برای سیستم‌های MIMO-OFDM با حفظ راندمان طیفی است. تخمین در دو بعد صورت می‌گیرد، یعنی نیاز است که پاسخ فرکانسی کانال در اندیس‌های زمانی متفاوت تخمین زده شود. برای این منظور الگوریتم‌های تخمین کانال مانند کوچکترین مربعات (LS)، حداقل میانگین مربع خطا (MMSE)، درونیاب خطی و درونیاب مبتنی بر DFT برای تخمین در بعد فرکانس بررسی می‌شوند. همچنین تئوری دنباله‌های DPS که قابل اعمال بر روی همه روش‌هاست برای درونیابی در حوزه زمان بیان می‌شود. عملکرد روش‌های ارائه شده توسط شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب ارزیابی و مشاهده می‌شود که استفاده از تکنیک LS حوزه زمان به همراه دنباله‌های DPS بهترین کارایی را از لحاظ پیچیدگی و MSE دارد. همچنین از میان الگوهای پایلوت معرفی شده، الگوی پایلوت مالتی‌پلکس شونده‌ی بدون صفر، مصالحه خوبی بین دقت تخمین و بهره‌وری طیفی برقرار می‌کند.

کلید واژه‌ها: تخمین کانال، پایلوت، درونیاب، مالتی‌پلکس فرکانسی متعامد، کانال چند ورودی-چند خروجی، دنباله‌های DPS، استاندارد LTE.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
د.....	فهرست علائم و نشانه‌ها.....
و.....	فهرست جدول‌ها.....
ز.....	فهرست شکل‌ها.....
۱.....	فصل ۱- مقدمه.....
۱.....	۱-۱- پیشگفتار.....
۱.....	۱-۲- اهداف این پروژه.....
۳.....	فصل ۲- مختصری بر سیستم‌های MIMO-OFDM.....
۳.....	۱-۲- مقدمه.....
۴.....	۲-۲- نگاهی به تکنولوژی‌های فراتر از نسل ۳.....
۶.....	۳-۲- تکنیک‌های MIMO به کار رفته در LTE.....
۶.....	۱-۳-۲- MIMO تک کاربره (SU-MIMO) در DL.....
۸.....	۲-۳-۲- چندگانگی ارسال (TD).....
۹.....	۳-۳-۲- پیش‌کدینگ مرتبه ۱ حلقه بسته.....
۹.....	۴-۳-۲- MIMO چند کاربره (MU-MIMO).....
۱۰.....	۵-۳-۲- شکل‌دهی پرتو اختصاصی در DL.....
۱۰.....	۴-۲- فیدبک UL در LTE.....
۱۲.....	فصل ۳- لایه فیزیکی LTE.....
۱۲.....	۱-۳- ساختار فریم انتقالی در LTE-DL.....
۱۲.....	۲-۳- پارامترهای ارسال DL.....
۱۴.....	۳-۳- ساختار سیگنال مرجع DL.....
۱۵.....	۴-۳- نگاشت سیگنال‌های مرجع در LTE-DL.....
۱۸.....	فصل ۴- مدل سیستم و سیگنال.....
۱۸.....	۱-۴- مقدمه.....
۱۹.....	۲-۴- مدل سیستم MIMO-OFDM.....
۱۹.....	۱-۲-۴- مدل سیستم در حوزه آرایه.....
۲۱.....	۲-۲-۴- مدل سیستم در حوزه زاویه.....
۲۴.....	فصل ۵- تخمین یک بعدی کانال.....
۲۴.....	۱-۵- مقدمه.....
۲۶.....	۲-۵- الگوی پایلوت- صفر.....

۲۷	.....LS تکنیک	۱-۲-۵
۲۷	.....LS حوزه فرکانس	۱-۱-۲-۵
۲۸	.....LS حوزه زمان	۲-۱-۲-۵
۳۱	.....LMMSE تکنیک	۲-۲-۵
۳۲	.....LMMSE حوزه فرکانس	۱-۲-۲-۵
۳۶	.....LMMSE حوزه زمان	۲-۲-۲-۵
۴۰	.....درونیاب خطی	۳-۲-۵
۴۰	.....DFT تکنیک های درونیابی مبنی بر	۴-۲-۵
۴۳	.....الگوی پایلوت بدون صفر	۳-۵
۴۴	.....LS تخمین	۱-۳-۵
۴۴	.....LMMSE تخمین	۲-۳-۵
۴۵	.....الگوی پایلوت جمع شونده	۴-۵
۴۶	.....LS تخمین	۱-۴-۵
۴۷	.....تخمین بازگشتی کانال	۲-۴-۵
۴۸	.....تخمین کانال در دو بعد	۶-۶
۴۸	.....تخمین کانال با استفاده از فیلتر وینر دو بعدی	۱-۶
۵۰	.....تخمین کانال به کمک دو درونیاب وینر یک بعدی	۲-۶
۵۱	.....درونیابی در حوزه فرکانس	۱-۲-۶
۵۱	.....درونیابی در حوزه زمان	۲-۲-۶
۵۳	.....Slepian بسط پایه	۳-۶
۵۵	.....تخمین کانال به کمک دنباله های DPS	۴-۶
۵۶	.....تخمین به کمک دنباله های DPS حوزه زمان	۱-۴-۶
۵۷	.....حالت تمام پایلوت (پایلوت پیوسته)	۱-۱-۴-۶
۵۷	.....حالت پایلوت پراکنده	۲-۱-۴-۶
۵۹	.....تخمین به کمک دنباله های DPS حوزه فرکانس	۲-۴-۶
۶۰	.....رابطه بین دنباله های Slepian و درونیاب وینر	۵-۶
۶۱	.....پیاده سازی نرم افزاری	۷-۷
۶۱	.....کانال های مورد استفاده جهت تخمین	۱-۷
۶۱	.....BRAN-flat کانال	۱-۱-۷
۶۱	.....BRAN-E1 کانال	۲-۱-۷
۶۱	.....BRAN-E کانال	۳-۱-۷
۶۸	.....SISO-OFDM معرفی محیط شبیه سازی سیستم	۲-۷
۶۹	.....SISO-OFDM نتایج شبیه سازی در سیستم	۳-۷
۷۸	.....MIMO-OFDM معرفی محیط شبیه سازی سیستم	۴-۷
۷۸	.....سیستم MIMO حلقه باز	۱-۴-۷

۷۹	سیستم MIMO حلقه بسته.....	۲-۴-۷
۸۰	MIMO-OFDM نتایج شبیه سازی در سیستم.....	۵-۷
۸۰	سیستم MIMO حلقه باز.....	۱-۵-۷
۸۷	سیستم MIMO حلقه بسته.....	۲-۵-۷
۹۰	جمع بندی و نتیجه گیری	
۹۱	پیشنهادها	
۹۲	ضمیمه أ - تولید سمبل های مرجع.....	
۹۲	أ-۱- دنباله های متعامد	
۹۲	أ-۲- دنباله های شبه رندم	
۹۲	أ-۲-۱- دنباله طول بیشینه.....	
۹۳	أ-۲-۲- دنباله Gold.....	
۹۳	أ-۲-۳- تولید دنباله های PN در LTE.....	
۹۴	أ-۳- دنباله سمبل های مرجع	
۹۶	أ-۴- نگاشت سمبل های مرجع بر روی المان های منبع	
۹۷	فهرست مراجع.....	
۹۹	واژه نامه فارسی به انگلیسی.....	
۱۰۱	واژه نامه انگلیسی به فارسی.....	

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
سمبل ارسالی در حوزه فرکانس	x
سمبل دریافتی در حوزه فرکانس	y
سمبل ارسالی در حوزه زمان	s
سمبل دریافتی در حوزه زمان	r
گین کانال	h
پاسخ ضربه کانال	g
نویز گوسی سفید جمعی در حوزه فرکانس	z
نویز گوسی سفید جمعی در حوزه زمان	w
تعداد زیرحامل‌ها	N_{IFFT}
تعداد سمبل‌های OFDM در یک فریم	N_s
تعداد آنتن‌های فرستنده	N_t
تعداد آنتن‌های گیرنده	N_r
تعداد پایلوت‌ها در یک سمبل OFDM	N_p
تعداد پایلوت‌ها در یک زیرحامل	M_p
تعداد پایلوت‌ها در یک فریم OFDM	N_{grid}
سمبل پایلوت ارسالی	x_p
سمبل پایلوت دریافتی	y_p
ضریب فرکانسی کانال در محل پایلوت	h_p
نویز بر روی سمبل پایلوت	z_p
واریانس نویز	σ_z^2
توان نامین ضریب کانال	σ_i^2
خودهمبستگی ضرایب کانال	r_h
ضریب کانال تخمین زده شده	\tilde{h}
فاصله فرکانسی دو سمبل پایلوت متوالی	D_f
فاصله زمانی دو سمبل پایلوت متوالی	D_t
توان پایلوت	ρ_p
توان دیتا	ρ_d
ماکزیمم تأخیر کانال	τ_{max}
فرکانس داپلر	f_d
ماکزیمم شیفت داپلر	v_{Dmax}

T_s	طول سمبل OFDM
B_s	پهنای باند زیرحامل
f_c	فرکانس حامل
c_0	سرعت نور
$u[n]$	دنباله DPS
λ	مقیاس تمرکز انرژی دنباله DPS در حوزه زمان
γ	ضریب وزن دنباله DPS
D	بعد زیرفضای دنباله‌های DPS
BW	پهنای باند دنباله‌های DPS

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۱۳	جدول ۱-۳: پارامترهای DL برای ارسال OFDM
۶۱	جدول ۱-۷: PDP کانال BRAN-E1
۶۱	جدول ۲-۷: PDP کانال BRAN-E

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲: بلوک دیاگرام یک سیستم مبتنی بر MIMO-OFDM	۴
شکل ۲-۲: ماتری پلکس فضایی حلقه بسته با N_t آنتن و M لایه	۷
شکل ۳-۲: ماتری پلکس فضایی حلقه باز با N_t آنتن و M لایه [۱]	۸
شکل ۴-۲: مکانیزم فیدبک CSI	۱۱
شکل ۱-۳: ساختار فریم کلی LTE-DL	۱۲
شکل ۲-۳: ساختار شبکه ای منبع DL [۴]	۱۴
شکل ۳-۳: نگاشت سیگنالهای مرجع برای DL برای CP نرمال	۱۵
شکل ۴-۳: نگاشت سیگنالهای مرجع برای CP نرمال با $v_{shift}=4$	۱۷
شکل ۵-۳: نگاشت سیگنالهای مرجع برای CP گسترده با $v_{shift}=0$	۱۷
شکل ۱-۴: نمایش شماتیک حوزه زاویه کانال MIMO با ۴ آنتن ارسال و ۴ آنتن دریافت [۱۳]	۱۹
شکل ۲-۴: بلوک دیاگرام یک سیستم MIMO-OFDM با N_t آنتن فرستنده و N_r آنتن گیرنده	۲۲
شکل ۱-۵: دیاگرام الگوریتم مبنی بر DFT	۴۱
شکل ۲-۵: بلوک دیاگرام الگوریتم بهبود یافته مبنی بر DFT	۴۳
شکل ۱-۶: یک ساختار سمبل پایلوت پراکنده	۴۹
شکل ۲-۶: نمایش روال تخمین	۵۶
شکل ۳-۶: λ_i برای پهنای باند داپلر نرمالیزه شده متفاوت با طول دنباله Slepian برابر با ۱۲۸ [۳۲]	۵۸
شکل ۴-۶: λ_i برای طول های متفاوت دنباله Slepian با پهنای باند داپلر نرمالیزه شده ۰/۰۰۱ [۳۲]	۵۹
شکل ۱-۷: منحنی های پاسخ فرکانسی کانال BRAN-flat	۶۳
شکل ۲-۷: منحنی های پاسخ فرکانسی کانال BRAN-E1	۶۵
شکل ۳-۷: منحنی های پاسخ فرکانسی کانال BRAN-E	۶۷
شکل ۴-۷: همبستگی فرکانسی کانال ها	۶۸
شکل ۵-۷: بلوک دیاگرام سیستم SISO-OFDM	۶۹
شکل ۶-۷: MSE بر حسب SNR در دو تکنیک تخمین در محل پایلوت در کانالهای مختلف	۷۰
شکل ۷-۷: MSE بر حسب SNR در تکنیک های مختلف تخمین در کانال BRAN-E	۷۱
شکل ۸-۷: MSE بر حسب SNR در تکنیک های مختلف تخمین در کانال BRAN-E1	۷۱
شکل ۹-۷: MSE بر حسب SNR در تکنیک های مختلف تخمین در کانال flat	۷۲
شکل ۱۰-۷: BER بر حسب SNR در تکنیک های مختلف تخمین در کانال BRAN-E	۷۲
شکل ۱۱-۷: BER بر حسب SNR در تکنیک های مختلف تخمین در کانال BRAN-E1	۷۳
شکل ۱۲-۷: BER بر حسب SNR در تکنیک های مختلف تخمین در کانال flat	۷۳
شکل ۱۳-۷: دنباله های Slepian برای $N_s=21$ و $v_{Dmax}=0.0191$	۷۴

- شکل ۷-۱۴: MSE بر حسب SNR در تکنیک های مختلف تخمین در کانال BRAN-E..... ۷۵
- شکل ۷-۱۵: BER بر حسب SNR در تکنیک های مختلف تخمین در کانال BRAN-E..... ۷۵
- شکل ۷-۱۶: درصد میانگین خطای نرمالیزه شده تکنیک های مختلف تخمین در کانال BRAN-E..... ۷۶
- شکل ۷-۱۷: MSE بر حسب SNR در تکنیک های مختلف تخمین در کانال BRAN-E..... ۷۷
- شکل ۷-۱۸: BER بر حسب SNR در تکنیک های مختلف تخمین در کانال BRAN-E..... ۷۷
- شکل ۷-۱۹: درصد میانگین خطای نرمالیزه شده تکنیک های مختلف تخمین در کانال BRAN-E..... ۷۸
- شکل ۷-۲۰: بلوک دیاگرام سیستم MIMO-OFDM حلقه باز..... ۷۹
- شکل ۷-۲۱: ساختار فرستنده سیستم MIMO-OFDM حلقه بسته..... ۸۰
- شکل ۷-۲۲: MSE بر حسب SNR در تخمین کانال flat به کمک الگوهای مختلف پایلوت..... ۸۱
- شکل ۷-۲۳: BER بر حسب SNR در تخمین کانال flat به کمک الگوهای مختلف پایلوت..... ۸۲
- شکل ۷-۲۴: درصد میانگین خطای تخمین نرمالیزه در کانال flat به کمک الگوهای مختلف پایلوت..... ۸۲
- شکل ۷-۲۵: MSE بر حسب SNR در تخمین کانال E1 به کمک الگوهای مختلف پایلوت..... ۸۳
- شکل ۷-۲۶: BER بر حسب SNR در تخمین کانال E1 به کمک الگوهای مختلف پایلوت..... ۸۴
- شکل ۷-۲۷: درصد میانگین خطای تخمین نرمالیزه در کانال E1 به کمک الگوهای مختلف پایلوت..... ۸۴
- شکل ۷-۲۸: MSE بر حسب SNR در تخمین کانال E به کمک الگوهای مختلف پایلوت..... ۸۵
- شکل ۷-۲۹: BER بر حسب SNR در تخمین کانال E به کمک الگوهای مختلف پایلوت..... ۸۶
- شکل ۷-۳۰: درصد میانگین خطای تخمین نرمالیزه در کانال E به کمک الگوهای مختلف پایلوت..... ۸۶
- شکل ۷-۳۱: درصد خطای فیدبک بر حسب SNR در کانال های مختلف..... ۸۷
- شکل ۷-۳۲: درصد خطای فیدبک بر حسب SNR در تکنیک های مختلف تخمین کانال..... ۸۸
- شکل ۷-۳۳: درصد خطای فیدبک بر حسب SNR در الگوهای مختلف نگاشت پایلوت..... ۸۹
- شکل ۷-۳۴: درصد خطای فیدبک بر حسب SNR در الگوهای مختلف نگاشت پایلوت..... ۸۹
- شکل ۱-۹۴: یک مولد دنباله Gold..... ۹۴
- شکل ۲-۹۴: مولد کد PN در سیستم LTE..... ۹۴
- شکل ۳-۹۶: یک مثال از نگاشت دنباله سیگنال مرجع به المان های منبع برای حالت ۴ پورت آنتن..... ۹۶

فصل ۱ - مقدمه

۱-۱ - پیش‌گفتار

اخیراً یک پوشش جهانی در استفاده از مالتی‌پلکس فرکانسی متعامد (OFDM)^۱ به عنوان یک تکنولوژی نوظهور برای ارسال داده با نرخ بالا، رخ داده است. به طور مثال، سیستم‌های شبکه محلی بی-سیم مانند WiMAX^۲، WiBro^۳، WiFi^۴، HIPERLAN^۵ و ... و سیستم‌های سیار فراتر از نسل سوم (یا آنچه که اصطلاحاً 3.5G^۶ نامیده می‌شود، مانند LTE^۷) همگی سیستم‌های مبتنی بر OFDM هستند. استفاده از آنتن‌های چندگانه در هر دو سمت فرستنده و گیرنده (به اختصار MIMO^۸) یکی از مهمترین پیشرفت‌های تکنیکی در حوزه مخابرات دیجیتال بوده که به عنوان یک روش مؤثر برای افزایش ظرفیت و نرخ ارسال داده در استانداردهای اخیر محسوب می‌شود.

تخمین کانال یکی از مهمترین مسائل و بخش جدایی‌ناپذیر هر سیستم مخابراتی است، مخصوصاً در سیستم‌های نوین مبتنی بر MIMO-OFDM که کاربرد مهمی در شبکه‌های مخابراتی تجاری و نظامی امروز و آینده دارند. تخمین مناسب و تا حد امکان نزدیک به واقعیت از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا بر روی متعادل‌سازی سمبل‌های دریافتی در سمت گیرنده و تخصیص منابع در سمت فرستنده‌ی سیستم‌های حلقه بسته، تأثیر دارد. برای تسهیل تخمین کانال در یک سیستم مبتنی بر OFDM، سیگنال‌های شناخته شده به نام پایلوت در میان سمبل OFDM ارسالی اعمال می‌شوند. سپس روش‌های مختلفی برای تخمین کانال با استفاده از این پایلوت‌های شناخته شده می‌تواند اعمال شود.

۱-۲ - اهداف این پروژه

تاکنون روش‌های گوناگونی برای تخمین کانال سیستم‌های OFDM ارائه شده است. این پروژه به بیان روش‌هایی برای تخمین کانال و مقایسه عملکرد آنها در سیستم‌های مبتنی بر MIMO-OFDM و به طور خاص LTE می‌پردازد.

ساختار این پروژه به صورت زیر خواهد بود:

- در ابتدا سیستم‌های مبتنی بر MIMO-OFDM به اختصار در فصل ۲ معرفی می‌شوند و سپس سیستم LTE و اهداف و ویژگی‌های آن بررسی می‌شود.
- ساختار لایه فیزیکی LTE-Downlink و جنبه‌های اساسی آن که برای تخمین کانال اهمیت دارند در فصل ۳ مطالعه می‌شود.

¹ Orthogonal Frequency Division Multiplexing

² worldwide interoperability for microwave access

³ Wireless Broadband

⁴ Wireless Fidelity

⁵ High Performance Radio Local Area Network type

⁶ 3.5 Generation

⁷ Long Term Evolution

⁸ Multiple Input Multiple Output

- فصل ۴ مدل سیستم و سیگنال مورد مطالعه در این پروژه را برای برقراری هماهنگی و امکان مقایسه روش‌های مختلف تخمین، تشریح می‌کند.
 - در فصل ۵ روش‌های متنوعی برای تخمین کانال در بعد فرکانس (کانال تغییرناپذیر با زمان) با استفاده از الگوهای مختلف پایلوت ارائه می‌شود.
 - فصل ۶ روش‌هایی را برای تخمین کانال تغییرپذیر با زمان در دو بعد معرفی می‌کند.
 - در فصل ۷ روش‌های مختلف تخمین کانال توسط شبیه‌سازی در متلب برای دو سیستم SISO و MISO مبتنی بر OFDM اعمال و با هم مقایسه می‌شوند.
 - در انتها نتایج حاصل از این پروژه و پیشنهادهایی برای کارهای آتی ذکر خواهد شد.
- لازم به ذکر است که در این نوشتار از حروف لاتین کوچک ضخیم برای نمایش بردارها و از حروف لاتین بزرگ ضخیم برای نمایش ماتریس‌ها استفاده شده است.

فصل ۲ - مختصری بر سیستم های MIMO-OFDM

۲-۱ - مقدمه

همزمان با گسترش فزاینده مخابرات چندرسانه‌ای انتظار می‌رود که مخابرات سیار به طور قابل اطمینان ارسال داده با نرخ بالا را پشتیبانی کند. استفاده از آنتن‌های چندگانه در فرستنده و گیرنده، کانال بی‌سیم MIMO (چند ورودی - چند خروجی) با چندین درجه آزادی به وجود می‌آورد که تقاضا برای نرخ داده‌ی بالاتر و پوشش سلول بهتر را حتی بدون افزایش پهنای باند فرکانسی یا توان متوسط ارسالی برآورده می‌کند. ثابت شده است ساختار MIMO چندین لایه فضایی می‌سازد که رشته‌های داده-ی متعدد، همزمان و بر روی یک فرکانس منتقل می‌شوند و ظرفیت کانال به طور خطی افزایش می‌یابد [۱]. MIMO می‌تواند به دو تکنیک چندگانگی ارسال^۱ و مالتی پلکس فضایی^۲ تفکیک شود و بسته به شرایط کانال یکی از این دو تکنیک انتخاب می‌شود. چندگانگی ارسال باعث افزایش پوشش و کیفیت سرویس (QoS) می‌شود زیرا به ارسال کپی‌های چندگانه یک رشته داده به گیرنده تکیه دارد؛ در حالی که مالتی پلکس فضایی، راندمان طیفی (نسبت نرخ بیت به عرض باند) را افزایش می‌دهد زیرا به طور مستقل و جداگانه رشته‌های داده از هر کدام از آنتن‌های چندگانه ارسال می‌شوند. جدا از آن، MIMO ممکن است برای کاهش تداخل هم‌کانال^۳ و فراهم آوردن گین آرایه، در قالب آنچه که شکل‌دهی پرتو^۴ نامیده می‌شود، استفاده شود [۲].

OFDM (مالتی پلکس فرکانسی متعامد) یک تکنیک مدولاسیون چندحامل برای ارسال سیگنال بر روی کانال‌های بی‌سیم است که یک رشته داده‌ی نرخ بالا را به چند رشته داده‌ی موازی با نرخ پایین‌تر تقسیم می‌کند و باعث تجزیه کانال انتخابگر فرکانسی به یک مجموعه موازی از کانال‌های فیدینگ تخت می‌شود. فرکانس حامل‌ها در باندهای مجاور به نحوی انتخاب می‌شود که سیگنال‌های ارسالی در زیرباندهای مختلف در مدت زمان یک عرض سمبل OFDM، بر یکدیگر عمود باشند. این خاصیت باعث می‌شود تا بتوان بر روی باندهای فرکانسی که با یکدیگر همپوشانی دارند اطلاعات را ارسال نمود بدون آنکه از لحاظ تئوری تداخلی بین کانال‌های مجاور ایجاد شود که این خود باعث صرفه‌جویی در عرض باند می‌شود. تعداد زیرحامل‌ها در یک سیستم OFDM معمولاً به صورت توانی از ۲ انتخاب می‌شود، که اجازه استفاده از الگوریتم‌های مؤثر FFT و IFFT را در پیاده‌سازی این تکنیک به طور گسترده در سطح دیجیتال، امکان‌پذیر می‌سازد. علاوه بر آن، از مزیت انعطاف‌پذیری بالا در تنظیم پارامترهای سیستم چون انعطاف در تعداد زیرحامل‌های تخصیصی به هر کاربر، تخصیص تطبیقی توان در زیرحامل‌های مختلف، تخصیص تطبیقی مدولاسیون و کدینگ به رشته‌های اطلاعات در زیرحامل‌های مختلف و ... برخوردار است. یکی دیگر از جنبه‌های مهم سیستم OFDM تخمین کانال قابل اطمینان و دقیق آن است. از این

¹ Transmit diversity

² Spatial multiplexing

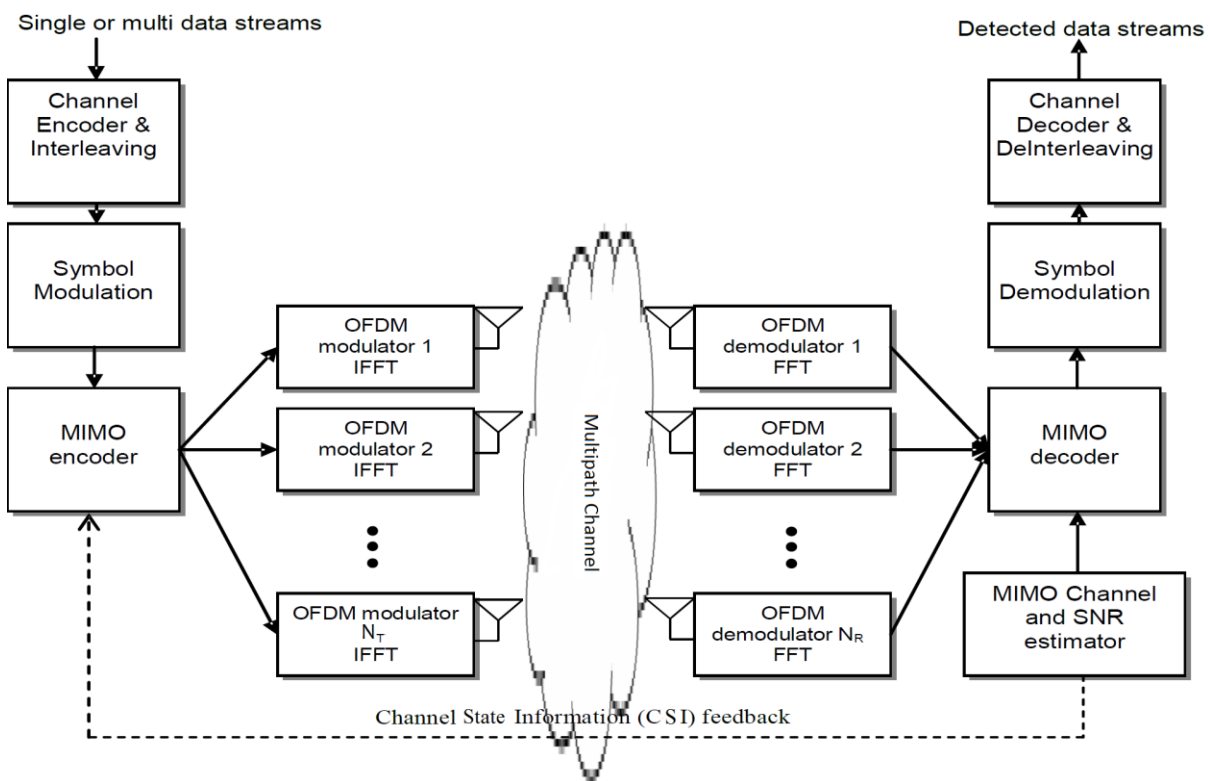
³ co-channel interference

⁴ beamforming

رو OFDM به عنوان یک تکنیک مدولاسیون مناسب برای دستیابی باندوسیع در یک محیط با تفرق بالا در نظر گرفته می‌شود. به علاوه OFDM قابلیت استفاده به عنوان یک تکنیک دستیابی چندگانه سودمند (OFDMA) را نیز دارد.

۲-۲- نگاهی به تکنولوژی های فراتر از نسل ۳

تکنیک MIMO به همراه OFDM (MIMO-OFDM) به عنوان یک روش کارآمد برای بالا بردن راندمان طیفی سیستم‌های باندوسیع نشان داده شده است. شکل ۱-۲ بلوک دیاگرام یک سیستم ارسال و دریافت مبتنی بر MIMO-OFDM را نشان می‌دهد که N_T تعداد آنتن‌های فرستنده و N_R تعداد آنتن‌های گیرنده است.



شکل ۱-۲: بلوک دیاگرام یک سیستم مبتنی بر MIMO-OFDM

سیستم‌های MIMO دو مد عملکرد ارائه می‌کنند، حلقه باز و حلقه بسته. سیستم‌های MIMO حلقه باز اطلاعات حالت کانال (CSI)^۱ را فقط در سمت گیرنده می‌دانند، سیستم‌های MIMO حلقه بسته همچنین در سمت فرستنده، CSI را می‌دانند و این می‌تواند راندمان و قابلیت اطمینان یک سیستم MIMO را افزایش دهد. با تخمین CSI بر اساس سنبل‌های پایلوت یا تکنیک‌های دیگر، گیرنده کاربرها می‌توانند CSI را برای ارسال بعدی به ایستگاه پایه (BS)^۲ گزارش کنند. CSI هرچه دقیق‌تر باشد، overhead فیدبک بیشتر می‌شود. یک روش برای کاهش این overhead استفاده از "کتاب کد" است [۲].

^۱ Channel State Information

^۲ Base Station

کانال‌های MIMO اغلب نمی‌توانند ارسال مرتبه کامل^۱ را پشتیبانی کنند. برای جلوگیری از ارسال بر روی نال‌های فضایی^۲، سمبل‌های منبع در یک ماتریس unitary به نام پیش‌کدر ضرب می‌شوند تا M پرتو ویژه قویتر کانال را انتخاب کنند. برای تعیین ماتریس پیش‌کدینگ^۳ بهینه، فرستنده نیاز دارد که دانش کامل یا جزئی از اطلاعات لحظه‌ای حالت کانال را در اختیار داشته باشد [۳]. در یک سیستم MIMO حلقه بسته، برای هر پیکربندی آنتن می‌توان یک مجموعه از ماتریس‌های پیش‌کدینگ طراحی کرده و اجازه داد که این مجموعه برای BS و گیرنده کاربر شناخته شده باشد [۴]. پیش‌کدینگ یک چارچوب کلی برای نگاشت سمبل‌ها بر روی آنتن‌هاست. گیرنده کاربر انتخاب ماتریس از میان یک مجموعه از ماتریس‌ها به نام "کتاب‌کد" را بر اساس تخمین کانال انجام می‌دهد و بهترین ماتریس پیش‌کدینگ را برای ماکزیمم کردن ظرفیت به فرستنده فیدبک می‌کند. لذا سیستم MIMO حلقه بسته می‌تواند بر اساس یک ماتریس وزن پیش‌کدینگ انتخاب شده از میان کتاب‌کد، یک پیش‌کدینگ MIMO در فرستنده برای جبران کانال انجام دهد [۵].

پروژه مشارکتی نسل ۳ (3GPP)^۴ مطالعه برای بهبود استاندارد UMTS^۵ تلفن همراه را به منظور پاسخ مناسب به نیازهای آینده بازار در دسامبر ۲۰۰۴ آغاز کرد، این پروژه E-UTRAN^۶ یا LTE (سیر تکاملی طولانی مدت) نام گرفت. اولین مشخصات 3GPP-LTE در قالب release-8 در پایان سال ۲۰۰۸ نهایی شد و هم‌اکنون نیز تکمیل جزئیات نسخه‌های جدیدتر آن با هدف تطبیق LTE به نیازهای نسل ۴ در قالب استاندارد LTE-Advanced تحت عنوان در حال اجراست. از نیازها و اهداف مورد انتظار سیستم LTE می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱، ۲، ۴]:

- این سیستم باید بتواند حداکثر نرخ ارسال داده برابر با 100 Mbps در DL^۷ و 50 Mbps در UL^۸ (در پهنای باند 20 MHz) را پشتیبانی کند. به بیان دیگر راندمان طیفی مورد انتظار در این سیستم به ترتیب در هر حالت معادل 5bps/Hz و 2.5bps/Hz است که در حالت DL سه تا چهار برابر و در حالت UL دو تا سه برابر استاندارد قبلی‌اش (HSPA) خواهد بود.
- حداکثر قابلیت حرکت کاربر در این سیستم‌ها افزایش چشم‌گیری نسبت به سیستم‌های قبل یافته به گونه‌ای که می‌تواند به مرز 350km/h برسد.
- عرض‌باند انعطاف‌پذیر بوده و بسته به شرایط می‌تواند مقادیر 1.25 MHz تا 20 MHz را در بر بگیرد.
- استفاده از آنتن‌های چندگانه در فرستنده و گیرنده در هر یک از مدهای 1×1 , 1×2 , 2×2 و 4×2 برای DL و 1×2 و 1×1 در UL قابل پشتیبانی خواهد بود.
- از جنبه ناحیه تحت پوشش سیستم، محدوده‌های زیر قابل دستیابی خواهند بود:

¹ full rank

² null-space

³ precoding

⁴ 3rd generation partnership project

⁵ Universal Mobile Telecommunications System

⁶ Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network

⁷ Down link

⁸ Up link

- عملکرد کاملاً مطلوب تا شعاع 5km از ایستگاه پایه.
 - کاهش نامحسوس عملکرد تا شعاع 30km از ایستگاه پایه.
- جداسازی سیگنال‌های DL و UL با هر دو تکنیک FDD و TDD پشتیبانی می‌شود.
- برای رسیدن به این اهداف، LTE فن‌آوری‌های متنوع MIMO را به همراه OFDM اتخاذ کرده که در اینجا به بررسی مختصر آنها می‌پردازیم.

۲-۳ - تکنیک‌های MIMO به کار رفته در LTE

۲-۳-۱ - MIMO تک کاربره (SU-MIMO) در DL

طرح SU-MIMO با ۲ یا ۴ آنتن فرستنده و ۲ آنتن گیرنده فقط در DL اعمال می‌شود که ارسال چندین لایه فضایی با حداکثر ۴ لایه برای یک گیرنده کاربر خاص را پشتیبانی می‌کند. با مالتی پلکس فضایی SU-MIMO، سیستم LTE حداکثر نرخ 150 Mbps برای ۲ آنتن فرستنده و 300 Mbps برای ۴ آنتن فرستنده را فراهم می‌کند [۱]. دو مد عملی برای مالتی پلکس فضایی SU-MIMO وجود دارد: SM^۱ حلقه بسته و SM حلقه باز.

برای پشتیبانی از SM حلقه بسته در DL، گیرنده کاربر باید شاخص مرتبه (RI^۲)، شاخص ماتریس پیش‌کدینگ (PMI^۳) و شاخص کیفیت کانال (CQI^۴) را در UL فیدبک کند. RI تعداد لایه‌های فضایی که می‌تواند توسط کانال جاری در گیرنده کاربر حمایت شود را نشان می‌دهد و بیان می‌کند چند رشته داده‌ی مختلف در گیرنده کاربر به طور موازی می‌تواند دریافت شود. تعداد لایه‌ها به شرایط فیزیکی کانال بستگی داشته و همواره از حداقل تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده کمتر است. BS، PMI یا همان شاخص پیش‌کدینگ گزارش شده توسط گیرنده کاربر را بر روی سیگنال ارسالی اعمال می‌کند که باعث تطبیق آن با کانال فضایی می‌شود. CQI یک ترکیب از نرخ کدینگ کانال و طرح مدولاسیون از میان QPSK، 16QAM و 64QAM را نشان می‌دهد که BS باید استفاده کند تا مطمئن شود احتمال خطای بدست آمده در گیرنده از ۱۰٪ تجاوز نخواهد کرد [۵]. مد SM حلقه بسته با M لایه و N_t آنتن فرستنده ($N_t \geq M$) در شکل ۲-۲ نشان داده می‌شود.

عمل پیش‌کدینگ برای SM حلقه بسته به این صورت تعریف می‌شود:

$$\mathbf{s} = \mathbf{W} \mathbf{x} \quad (1-2)$$

که در آن $\mathbf{s} = [s_0, \dots, s_{N_t-1}]^T$ ، s_n سمبل مختلط ارسالی بر روی n امین آنتن است، $\mathbf{x} = [x_0, \dots, x_{M-1}]^T$ ، x_m سمبل مدولاسیون ارسالی بر روی m امین لایه را نشان می‌دهد و \mathbf{W} ماتریس پیش‌کدینگ با سایز $N_t \times M$ می‌باشد. ماتریس‌های پیش‌کدینگ، unitary هستند یعنی $\mathbf{W}^H \mathbf{W} = \mathbf{I}$. با توجه به تعداد آنتن‌های

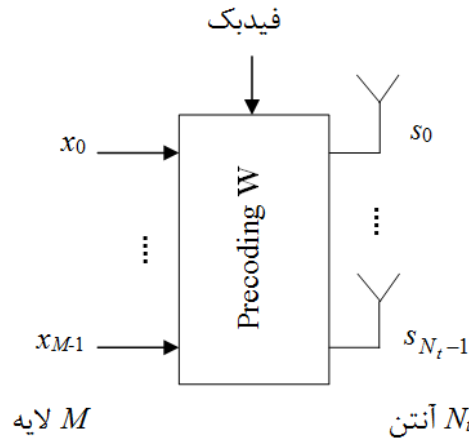
^۱ Spatial Multiplexing

^۲ Rank Indicator

^۳ Precoding Matrice Indicator

^۴ Channel Quality Indicator

ارسال (۲ یا ۴ آنتن)، کتاب کدهایی موجود است که ماتریس پیش‌کدینگ از میان آن انتخاب می‌شود. اطلاعات بیشتر در این زمینه را در [۱] می‌توان مشاهده کرد.



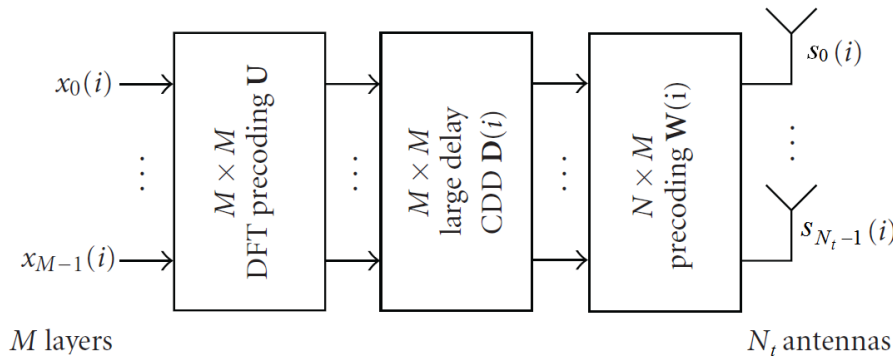
شکل ۲-۲: ماتری پلکس فضایی حلقه بسته با N_t آنتن و M لایه

SM حلقه باز ممکن است زمانی که فیدبک PMI قابل اطمینان در BS در دسترس نیست اعمال شود؛ به عنوان مثال وقتی سرعت گیرنده کاربر به اندازه کافی آرام نیست یا وقتی overhead فیدبک در UL خیلی بالاست. این طرح با M لایه و N_t آنتن فرستنده ($N_t \geq M$) در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. در SM حلقه باز، فیدبک شامل RI و CQI می‌باشد. بر خلاف SM حلقه بسته، BS فقط مرتبه ارسال و یک مجموعه ثابت از ماتریس‌های پیش‌کدینگ که به طور دوره‌ای بر روی تمامی زیرحامل‌ها در حوزه فرکانس اعمال می‌شود را تعیین می‌کند. در این مد کاری انتقال‌های مرتبه ۱ با چندگانگی ارسال و انتقال‌های مرتبه بالاتر با Large Delay CDD^۱ پشتیبانی می‌شوند [۱]. در CDD نمونه‌های تأخیر یافته یک سمبل OFDM یکسان، از آنتن‌های متفاوت ارسال می‌شود. پیش‌کدینگ برای مد SM حلقه باز توسط عبارت زیر تعیین می‌شود:

$$\mathbf{s}(i) = \mathbf{W}(i)\mathbf{D}(i)\mathbf{U}\mathbf{x}(i) \quad (2-2)$$

که $\mathbf{s}(i) = [s_0(i), \dots, s_{N_t-1}(i)]^T$ بوده و $s_n(i)$ ، i امین سمبل مختلط ارسالی بر روی n امین آنتن را نشان می‌دهد، $\mathbf{W}(i)$ ماتریس پیش‌کدینگ با سایز $N_t \times M$ می‌باشد. $\mathbf{x}(i) = [x_0(i), \dots, x_{M-1}(i)]^T$ و $x_m(i)$ i امین سمبل مدولاسیون ارسالی بر روی لایه m ام را نشان می‌دهد. \mathbf{U} ماتریس پیش‌کدینگ با سایز $M \times M$ می‌باشد و ماتریس $\mathbf{D}(i)$ با سایز $M \times M$ تأخیر بزرگ CDD را پشتیبانی می‌کند. برای توضیحات بیشتر به [۱] و [۶] مراجعه شود.

^۱ cyclic delay diversity



شکل ۲-۲: مالتی پلکس فضایی حلقه باز با N_t آنتن و M لایه [۱]

۲-۳-۲ - چندگانگی ارسال (TD)

به جای افزایش نرخ داده یا ظرفیت، MIMO می‌تواند برای بهره بردن از چندگانگی استفاده شود. در حالتی که شرایط کانال اجازه استفاده از SM را ندهد، طرح چندگانگی ارسال به جای آن استفاده خواهد شد، لذا سوئیچ بین این دو مد MIMO بسته به شرایط کانال امکان‌پذیر است. چندگانگی ارسال زمانی انتخاب می‌شود که مرتبه برابر ۱ باشد [۱]. در این روش از چند آنتن فرستنده و تنها یک آنتن در گیرنده استفاده می‌شود. با استفاده از کدینگ فضا-فرکانسی اطلاعات ارسالی، علاوه بر چندگانگی فضایی، از مزایای چندگانگی فرکانسی نیز در این تکنیک استفاده می‌شود.

برای LTE-DL طرح TD می‌تواند برای همه کانال‌های فیزیکی با استفاده از ۲ یا ۴ آنتن فرستنده اعمال شود. به کارگیری این روش سبب بهبود پوشش و کیفیت سرویس می‌شود زیرا کپی‌های چندگانه از یک رشته داده‌ی ارسالی را به گیرنده رله می‌کند. یک گیرنده کاربر می‌تواند توسط دکد کردن کورکورانه، تعداد آنتن‌های فرستنده در BS را از میان $\{1, 2, 4\}$ آنتن تشخیص دهد چون سیگنالینگ معینی برای آن وجود ندارد. زمانی که تعداد آنتن‌های فرستنده در BS آشکار شد، یک طرح TD معین قابل اعمال به کانال‌های DL فیزیکی دیگر مشخص می‌شود [۱].

یک گیرنده کاربر زمانی که BS چند آنتن فرستنده بکار می‌گیرد، برای یک طرح ارسال خاص از میان مدهای مختلف پیکربندی می‌شود. هنگامی که شرایط کانال دیگر برای طرح ارسال مورد استفاده مساعد نیست BS سعی می‌کند آن را تغییر دهد. ممکن است ارسال پیام کنترلی مورد نیاز با استفاده از طرح ارسال پیکربندی شده امکان‌پذیر نباشد، به عنوان مثال SU-MIMO برای بیان تغییر طرح ارسال مناسب نیست. برای تغییر قابل اطمینان طرح ارسال صرف نظر از اینکه کدام طرح ارسال برای گیرنده کاربر در نظر گرفته شده، TD همیشه می‌تواند برای تحویل پیام کنترلی مورد نیاز به گیرنده کاربر استفاده شود. از این رو گیرنده کاربر باید همواره سعی کند پیام کنترلی ارسال شده با استفاده از TD را دریافت کند [۱].

چندگانگی در UL با انتخاب دو آنتن فرستنده برای گیرنده کاربر تعیین می‌شود. در حالت حلقه بسته، BS آنتنی را که باید برای ارسال UL استفاده شود، انتخاب می‌کند و این انتخاب را به گیرنده کاربر

¹ Transmit Diversity

با استفاده از پیام کنترلی DL مخابره می‌کند. برای انتخاب آنتن فرستنده حلقه باز، گیرنده کاربر به طور مستقل و بدون مداخله BS آنتن فرستنده را انتخاب می‌کند.

۲-۳-۳- پیش‌کدینگ مرتبه ۱ حلقه بسته

این طرح در واقع همان طرح SM حلقه بسته است با این محدودیت که BS، انتخاب یک ماتریس پیش‌کدینگ مرتبه ۱ برای ارسال به یک گیرنده کاربر با استفاده از ۲ یا ۴ آنتن فرستنده را برای بهبود پوشش داده در لبه سلول بدون تکیه بر سیگنال مرجع مختص کاربر اعمال می‌کند. از آنجایی که مرتبه ارسال در این مد ثابت و برابر ۱ است، overhead سیگنالینگ کنترلی DL مربوطه کمتر از حالتی است که طرح SU-MIMO حلقه بسته اجرا می‌شود، چون در آن سیگنالینگ کنترلی اجازه انتخاب مرتبه ارسال از میان همه مقادیر مرتبه ممکن را دارد [۱].

۲-۳-۴- MIMO چند کاربره (MU-MIMO)

طرح MU-MIMO اجازه تخصیص لایه‌های فضایی مختلف به کاربرهای مختلف در منابع زمان-فرکانس یکسان و به صورت برهم افتاده را می‌دهد. به عبارت ساده‌تر، در هر المان منبع زمان-فرکانس یک ترکیب خطی از اطلاعات چند کاربر ارسال می‌شود. برای بهره‌گیری کامل از این تکنیک، لازم است که رشته‌های ارسالی اطلاعات، چه در سمت فرستنده و چه در سمت گیرنده، به خوبی از یکدیگر مجزا باشند. به این منظور لازم است که در سمت فرستنده از تکنیک‌های مناسب پیش‌کدینگ و زمان‌بندی برای افزایش توان سیگنال کاربر مطلوب و نیز کاهش تداخل ناشی از سیگنال سایر کاربر(های) واقع در همان المان منبع، استفاده کرد. در سمت گیرنده نیز لازم است از یک الگوریتم مناسب جهت آشکارسازی بهره برد. این طرح که می‌تواند سبب افزایش چشم‌گیر نرخ ارسال اطلاعات شود، هم در UL و هم در DL پشتیبانی می‌شود. این تکنیک فقط به یک آنتن در سمت گیرنده کاربر نیاز دارد لذا در DL فقط ارسال مرتبه ۱ می‌تواند برای آن برنامه‌ریزی شود. در UL، BS همیشه می‌تواند بیشتر از یک گیرنده کاربر را برای ارسال همزمان و هم فرکانس پشتیبانی کند، که یک قالب ارسال MU-MIMO را شکل می‌دهد. اما برای اینکه BS قادر باشد به درستی سیگنال‌های گیرنده کاربر را تشخیص داده و دمدوله کند نیاز دارد تا سیگنال‌های مرجع متعامدی برای کاربرهایی که برای انتقال MU-MIMO در نظر گرفته شده‌اند، تعیین کند [۱].

باید توجه داشت که گیرنده کاربر فقط اطلاعات مربوط به ماتریس پیش‌کدینگ خود را دریافت می‌کند، سپس داده را با استفاده از سیگنال مرجع مشترک همراه با اطلاعات پیش‌کدینگ به دست آمده از سیگنالینگ کنترل دکد می‌کند. گیرنده کاربر فیدبک PMI/CQI را بدون هیچ دانشی از سایر کاربرهای همزمان مورد نظر تولید می‌کند، از این رو ممکن است بین CQI گیرنده کاربر و CQI واقعی یک عدم تطابق ناشی از عدم آگاهی از تداخل به وجود آمده توسط کاربرهای دیگر که به طور همزمان در نظر گرفته شده‌اند وجود داشته باشد.