بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه بیرجند

دانشکده مهندسی

پایان‌نامه‌ی دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی برق – مخابرات

مدل‌سازی فضایی کانال‌های چند ورودی–چند خروجی (MIMO) در سیستم‌های نوین مخابراتی

جواد زراعتکارمقدم

استاد راهنما:

دکتر ناصر ندا

استاد مشاور:

دکتر رضا قاضی زاده

شهریور ۱۳۹۰

تقدیم به:

پدر و مادرم، دو اسطوره‌ی عشق و ایثار

که سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید

و گرمای امیدبخش وجودشان در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است

و **خواهر عزیزم** و **برادران مهربانم**

و همه‌ی کسانی که در راه فراگیری علم و دانش راهنما و مشوق من بوده‌اند
و توانستن را در وجود من نهادینه کرده‌اند.

تشکر و قدردانی

بر خود واجب می‌دانم به حکم «**مَن لم یَشکُرِ المخلوقَ لم یَشکُرِ الخالِق**»، از راهنمایی‌ها و تلاش‌های بی‌دریغ استاد محترم راهنما، جناب آقای **دکتر ناصر ندا** که با صبر و سعه‌ی صدر مثال‌زدنی و دلسوزی‌ها و پیگیری‌های فراوان، زحمات زیادی در تدوین این رساله متحمّل شده‌اند، تشکّر و قدردانی نمایم. حضور استاد محترم مشاور جناب آقای **دکتر رضا قاضی‌زاده** که با رهنمودها و مشاوره‌های ارزنده‌ی خود بر غنای پژوهش حاضر افزوده‌اند، نیز مراتب احترام و سپاس‌گزاری خود را اعلام می‌نمایم. همچنین سپاس‌دار سایر اساتید محترم گروه مخابرات دانشگاه بیرجند، آقایان **دکتر حسن فرسی** و **دکتر حمید فرخی** هستم که به گونه‌ای مرا در تدوین رساله یاری رسانده و از محضر آن‌ها مطالب زیادی آموختم.

چکیده

مدل‌سازی صحیح کانال‌های چندورودی-چندخروجی، مبحثی مهم در طراحی، شبیه‌سازی و توسعه‌ی این سیستم‌ها است. از آنجایی که رفتار آماری چند بعدی فیدینگ در این نوع کانال، در عملکرد سیستم بسیار مؤثر است، طراح سیستم مخابراتی بایستی یک مدل شبیه‌سازی شده از کانال را در دسترس داشته باشد. در این پایان نامه، سه تکنیک عمومی برای مدل‌سازی کانال مذکور بیان می‌شود. در ابتدا، انواع کانال‌های چند ورودی–چند خروجی معرفی و با در نظر گرفتن موقعیت دقیق پراکنده‌سازها، ظرفیت و درجه‌ی آزادی سیستم بررسی می‌شوند. در مرحله‌ی بعد، نمایشی از حوزه‌ی زاویه، برای کانال، معرفی و کانال در حوزه‌ی زاویه بررسی می‌گردد. سپس، مدل کانال فضایی معرفی می‌شود و پارامترهای مورد نیاز در مدل‌سازی و مراحل مدل‌سازی کانال بیان می‌شوند. در ادامه، با در نظر گرفتن آنتن‌های قطبی‌شده و پارامترهای جدید، مدل کانال اولیه ارتقا یافته و آنتن‌های با پلاریزاسیون عمودی و افقی در آن لحاظ می‌گردد. این مدل که فقط طیف افقی را در بر گرفته، به مدل کانال فضایی دو بعدی معروف است. در مرحله‌ی بعد، با در نظر گرفتن طیف عمودی و پرتو دریافتی در سطح عمود، مدل کانال سه بعدی و همچنین یک مدل ترکیبی از کانال دو بعدی و سه بعدی معرفی می‌شود. همبستگی بین بعضی پارامترهای کانال، از قبیل: زاویه‌ی گسترش، فیدینگ سایه و گسترش تاخیر، از دیگر نکات مهمی است که در این مدل‌سازی علاوه بر قطبی‌شدگی آنتن‌ها، در نظر گرفته شده است. چون این پارامترها همبستگی نسبتاً بالایی دارند، یک مدل کانال فضایی بایستی همبستگی بین آنها را در نظر بگیرد. در نهایت، به پیاده‌سازی نرم‌افزاری مدل‌های کانال فضایی مذکور می‌پردازیم. نتایج شبیه‌سازی مدل، در هر حالت تطابق خوبی با ملاحظات تئوری نشان می‌دهد.

کلید واژه ها: آرایه‌های قطبی‌شده، پراکنده‌ساز، سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی، ماتریس کانال، مدل کانال فضایی.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... ج
فهرست جدول‌ها ..... ه
فهرست شکل‌ها ..... و

فصل ۱- مقدمه... ..... ۱
۱-۱- سیستم‌های نسل چهار (LTE) ۱
۱-۲- سیستم‌های مبتنی بر MIMO ۲
۱-۳- روش‌های مدل‌سازی کانال MIMO ۳
۱-۴- ویژگی‌های مدل SCM ۳
۱-۵- ساختار گزارش ۴

فصل ۲- معرفی کانال‌های MIMO ۶
۲-۱- کانال LOS SIMO ۶
۲-۲- کانال LOS MISO ۹
۲-۳- کانال LOS MIMO ۹
۲-۳-۱- آنتن‌های جدا از همدیگر ۱۰
۲-۳-۱-۱- آنتن‌های فرستنده مجزا از همدیگر ۱۱
۲-۳-۱-۲- آنتن‌های گیرنده مجزا از همدیگر ۱۱
۲-۳-۱-۳- آنالیز زوایای ارسال و دریافت ۱۲
۲-۴- LOS همراه با یک مسیر منعکس شده ۱۶
۲-۵- کانال‌های فیدینگ MIMO ۱۸
۲-۵-۱- کانال چندمسیره‌یMIMO ۱۹
۲-۶- نمایش سیگنال‌ها در حوزه‌ی زاویه ۲۰
۲-۷- نمایش حوزه‌ی زاویه برای کانال‌های MIMO ۲۱
۲-۷-۱- درجه‌ی آزادی ۲۳
۲-۷-۱-۱- مدل کلارک ۲۴
۲-۷-۱-۲- مدل پاسخ کلاستری عمومی ۲۵
۲-۷-۲- دایورسیتی ۲۷
۲-۷-۳- اثر فرکانس حامل ۲۷
۲-۸- بررسی فاصله‌ی بین آرایه‌های آنتن ۲۸
۲-۹- محاسبه‌ی ظرفیت کانال MIMO ۳۱

فصل ۳- معرفی مدل SCM ۳۴

۳-۱- انواع محیط ۳۴
۳-۲- همبستگی بین AS، DS ،SF ۳۵
۳-۳- معرفی پارامترهای مدل ۳۷
۳-۳-۱- پترن آنتن ۳۸
۳-۳-۲- طیف توان افقی ۳۹
۳-۳-۳- پارامترهای وابسته به محیط Macro ۴۰
۳-۴- محاسبه‌ی ضرایب کانال ۴۴
۳-۴-۱- همبستگی زمانی ضرایب کانال ۴۶
۳-۴-۲- همبستگی فضایی ضرایب کانال ۴۷
فصل ۴- آرایه‌های قطبی‌شده ۴۹
۴-۱- پیکربندی آنتن‌های قطبی‌شده ۴۹
۴-۲- مدل دو بعدی SCM ۵۰
۴-۳- مدل سه بعدی SCM ۵۳
۴-۴- مدل کانال ترکیبی ۵۵
فصل ۵- پیاده‌سازی نرم‌افزاری کانال ۵۶
۵-۱- پیاده‌سازی SCM بدون در نظر گرفتن آنتن‌های قطبی‌شده ۵۶
۵-۲- پیاده‌سازی دو بعدی SCM با در نظر گرفتن آنتن‌های قطبی‌شده ۶۰
۵-۳- پیاده‌سازی مدل سه بعدی SCM با در نظر گرفتن آنتن‌های قطبی‌شده ۶۶
نتایج ۶۸
ضمیمه أ -برنامه‌ی نرم‌افزاری کانال ۶۹
فهرست مراجع ۷۷
واژه نامه فارسی به انگلیسی ۷۸
واژه نامه انگلیسی به فارسی ۸۱

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
طول موج	λ
عدد موج	k
فیدینگ سایه	σ_{SF}
زاویه‌ی گسترش	σ_{AS}
انتشار تاخیر	σ_{DS}
فاصله‌ی نرمالیزه شده‌ی آنتن‌های گیرنده	Δ_r
فاصله‌ی نرمالیزه شده‌ی آنتن‌های فرستنده	Δ_t
سرعت موج	c
تلفات مسیر	a
نویز سفید گوسی	w
تعداد آنتن‌های گیرنده	n_r
تعداد آنتن‌های فرستنده	n_t
طول موج	λ
طول آرایه‌ی آنتنی گیرنده	L_r
طول آرایه‌ی آنتنی فرستنده	L_t
ماتریس کانال	$\mathbf{H}$
ماتریس کانال در حوزه‌ی زاویه	$\mathbf{H}^{\mathrm{a}}$
عدد وضعیت	CN
پهنای بیم 3dB بر حسب درجه	$\theta_{3\mathrm{dB}}$
زاویه‌ی خروج n امین مسیر از BS	$\delta_{n,\mathrm{AoD}}$
زاویه‌ی ورود n امین مسیر به MS	$\delta_{n,\mathrm{AoA}}$
زاویه‌ی خروج m امین زیرمسیر از n امین مسیر در BS	$\Delta_{n,m,\mathrm{AoD}}$
زاویه‌ی خروج m امین زیرمسیر از n امین مسیر در MS	$\Delta_{n,m,\mathrm{AoA}}$
تاخیر مسیر n ام	τ_n
توان مسیر n ام	P_n
تلفات مسیر	PL
زاویه‌ی مسیر LOS بین BS و MS با خط عمود بر محور آرایه‌ی آنتنی BS	θ_{BS}
زاویه‌ی مسیر LOS بین BS و MS با خط عمود بر محور آرایه‌ی آنتنی MS	θ_{MS}
جهت آرایه‌ی آنتنی MS	Ω_{MS}
جهت آرایه‌ی آنتنی BS	Ω_{BS}

سرعت	υ
گین آنتن MS	G_{MS}
گین آنتن BS	G_{BS}
AoD برای m امین زیرمسیر از n امین مسیر اصلی	$\theta_{n,m,\mathrm{AoD}}$
AoA برای m امین زیرمسیر از n امین مسیر اصلی	$\theta_{n,m,\mathrm{AoA}}$
زاویه‌ی حرکت	θ_v
متغیر تصادفی گوسی	η
ارتفاع آنتن BS	h_{BS}
ارتفاع آنتن MS	h_{MS}
فرکانس	f
عرض زمانی یک چیپ	T_c
فاز m امین زیرمسیر n امین مسیر اصلی	$\Phi_{n,m}$
فاصله‌ی s امین المان آنتن BS از آنتن مرجع	d_s
فاصله‌ی s امین المان آنتن MS از آنتن مرجع	d_u
فاصله‌ی بین آرایه‌های آنتنی BS	r_s
فاصله‌ی بین آرایه‌های آنتنی MS	r_u
نسبت توان اختصاص داده شده به هر مسیر در جهت افقی به عمودی	XPD
زاویه‌ی m امین زیرمسیر از n امین مسیر اصلی بین عنصر x از BS و عنصر y از MS	$\Phi_{n,m}^{\mathrm{x,y}}$
پاسخ مختلط آنتن BS	$\boldsymbol{\chi}_{\mathrm{BS}}$
پاسخ مختلط آنتن MS	$\boldsymbol{\chi}_{\mathrm{MS}}$
ماتریس کانال ۲ بعدی	$\mathbf{H}^{\mathrm{2D}}$
ماتریس کانال ۳ بعدی	$\mathbf{H}^{\mathrm{3D}}$

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱ : زوایای انحراف AoD و AoA برای M=20 زیرمسیر برای هر کدام از N=6 مسیر اصلی در محیط Macro ۴۴
جدول ۳-۲: پارامترهای وابسته به محیط [۱۳،۷] ۴۶
جدول ۵-۱: مقادیر پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی ۵۶

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲–۱: (a)کانال LOS با یک آنتن فرستنده و چند آنتن گیرنده ، (b) کانال LOS با چند آنتن فرستنده و یک آنتن گیرنده [۵] ۸

شکل ۲–۲ : آنتن‌های فرستنده جدا از همدیگر از لحاظ فاصله‌ی جغرافیایی که هر کدام دارای یک LOS با آرایه‌ی آنتنی گیرنده می‌باشند [۵]. ۱۱

شکل ۲–۳ : آنتن‌های گیرنده جدا از همدیگر از لحاظ فاصله‌ی جغرافیایی با LOS از آرایه‌ی آنتنی فرستنده[۵] ۱۲

شکل ۲–۴ : $\left|f\left(\Omega_r\right)\right|$ به صورت تابعی از Ω_r برای $L_r=8$ و تعداد آنتن‌های گیرنده متفاوت ۱۴

شکل ۲–۵ : پترن BF دریافتی در زاویه‌ی ۹۰ درجه با طول $L_r=2$ و تعداد آنتن‌های دریافتی متفاوت ۱۵

شکل ۲–۶ : پترن BF برای طول‌های متفاوت از آرایه‌ی آنتنی. ۱۵

شکل ۲–۷: (a) یک کانال MIMO با یک مسیر مستقیم و یک مسیر منعکس شده ، (b) کانال به صورت ترکیبی از دو کانال با بازپخش کننده‌های مجازی A و B نشان داده شده است [۵]. ۱۷

شکل ۲–۸: (a) منعکس کننده‌ها و پراکنده‌سازها به صورت یک حلقه اطراف گیرنده قرار دارند، Ω_tآنها کوچک است، (b) منعکس کننده‌ها و پراکنده‌سازها به صورت یک حلقه اطراف فرستنده قرار دارند، Ω_r آنها کوچک است [۵]. ۱۸

شکل ۲–۹: نمایشی از کانال MIMO در حوزه‌ی زاویه. مسیرهای فیزیکی به نواحی زاویه‌ای قابل تفکیک با پهنای $1/L_t$ و $1/L_r$ تقسیم بندی شده‌اند. در اینجا ۴ آنتن گیرنده و ۶ آنتن فرستنده وجود دارد [۵].۱۹

شکل ۲–۱۰: پترن BF دریافتی برای بردارهای پایه‌ی زاویه‌ای ۲۲

شکل ۲–۱۱ : ناحیه‌ی R_k مجموعه‌ی تمام مسیرهایی است که در جهت لوب اصلی پترن BF بردار $\mathbf{e}(k/L_r)$ دریافت می‌شوند. در این شکل $L_r=2, n_r=4$ می‌باشد. ۲۳

شکل ۲–۱۲: مثال‌هایی از $\mathbf{H}^{\mathbf{a}}$. (a) زاویه‌ی گسترش کوچک در سمت فرستنده. زاویه گسترش کوچک در سمت گیرنده. (b) زاویه‌ی گسترش کوچک در هر دو سمت فرستنده و گیرنده. (c) بیشترین زاویه‌ی گسترش در هر دو سمت فرستنده و گیرنده [۵]. ۲۴

شکل ۲–۱۳: مثال‌هایی از $\mathbf{H}^{\mathbf{a}}$. (a) ۲ کلاستر از پراکنده‌سازها، همه‌ی مسیرها در یک جهت می‌باشند. (b) مسیرهای پراکنده شده در جهت‌های مختلف می‌باشند [۵]. ۲۵

شکل ۲–۱۴: مدل کلاستری برای محیط چندگانه. هر کلاستر مجموعه ای از مسیرها را در بر می‌گیرد [۵]. ۲۶

شکل ۲–۱۵: افزایش طول آرایه باعث افزایش تفکیک‌پذیری مسیر در حوزه‌ی زاویه و همچنین افزایش درجه‌ی آزادی سیستم می‌شود [۵]. ۲۶

شکل ۲–۱۶: نمایش حوزه‌ی زاویه برای ۳ کانال MIMO. همگی دارای ۴ درجه‌ی آزادی اما به ترتیب دارای دایورسیتی برابر ۴، ۸ و ۱۶ می‌باشند. ۲۷
شکل ۲–۱۷: (a) زاویه‌ی گسترش کل برای محیط پراکنده‌ساز (در سمت فرستنده و گیرنده یکسان است) با فرکانس حامل کاهش می‌یابد؛ طول نرمالیزه‌ی آرایه متناسب با $1/\lambda_c$ افزایش می‌یابد. (b) مقدار درجه‌ی آزادی کانال MIMO، متناسب با $\Omega_{\text{total}}/\lambda_c$ ، ابتدا با فرکانس حامل افزایش و سپس کاهش می یابد [۵]. ۲۸
شکل ۲–۱۸: یک آرایه‌ی آنتنی با طول L_r، اطراف گیرنده را به $2L_r$ پنجره‌ی زاویه‌ای تقسیم بندی کرده است. در اینجا، $L_r = 3$ و ۶ پنجره وجود دارد. به دلیل تقارن نسبت به محور ۰-۱۸۰ درجه، هر پنجره شامل یک جفت می‌باشد [۵]. ۲۹
شکل ۲–۱۹: آنتن‌ها دارای فاصله‌ی بحرانی می‌باشند. هر ناحیه‌ی متناسب با یک پنجره‌ی زاویه‌ای می باشد. در این شکل ۶ پنجره‌ی زاویه‌ای و ۶ ناحیه وجود دارد [۵]. ۲۹
شکل ۲–۲۰: (a) فاصله‌ی آنتنی پراکنده. بعضی از نواحی شامل مسیرهایی از پنجره‌های زاویه‌ای متفاوت می‌باشد. (b) فاصله‌ی آنتن‌ها خیلی پراکنده است. همه‌ی نواحی شامل چندین پنجره‌ی زاویه‌ای می‌باشند [۵]. ۳۰
شکل ۲–۲۱ : فاصله‌ی آنتنی متراکم. بعضی نواحی شامل هیچ مسیر فیزیکی نمی‌باشد [۵]. ۳۱
شکل ۲–۲۲ : $\mathbf{H}^{\mathbf{a}}$ برای فاصله‌ی آنتنی متراکم [۵] ۳۱
شکل ۲–۲۳: مثالی از کانال با پاسخ کلاستری. افزایش فاصله‌ی بین تعداد ثابتی از آنتن‌ها باعث افزایش درجه‌ی آزادی از ۲ به ۳ شده است [۵]. ۳۲
شکل ۲–۲۴ : تبدیل کانال MIMO به کانال‌های موازی با استفاده از تبدیل SVD [۵] ۳۳
شکل۳–۱: تلفات مسیر برای محیط macrocell بر اساس مدل انتشار شهری COST231 Hata..... ۳۵
شکل ۳–۲: پارامترهای زاویه ای برای MS و BS [۱۰،۹،۷] ۳۷
شکل۳–۳: جهت محور آنتن برای سناریوی ۳ سکتور در هر سل [۷] ۳۸
شکل۳–۴: جهت محور آنتن برای سناریوی ۶ سکتور در هر سل [۷] ۳۸
شکل ۳–۵: پترن آنتن برای سناریوی ۳ سکتوری و سناریوی ۶ سکتوری ۳۹
شکل ۴–۱: پیکربندی آنتن‌ها برای قطبیت‌های مختلف [۱۷] ۵۰
شکل ۴–۲: ساختار مورد استفاده برای کاهش طول آرایه [۱۶] ۵۰
شکل ۴–۳ : مختصات کروی سیستم برای مدل ۳ بعدی [۱۴،] ۵۱
شکل ۵–۱: هیستوگرام ضرایب کانال غیر قطبی MIMO ۵۷
شکل ۵–۲: خود همبستگی ضرایب کانال غیر قطبی MIMO ۵۷
شکل ۵–۳: نمایش حوزه‌ی زاویه‌ی کانال غیر قطبی MIMO، برای تعداد ۳۲ آنتن فرستنده و ۳۲ آنتن گیرنده و فاصله‌ی بین آنتنی بحرانی ۵۸
شکل ۵–۴: نمودار ظرفیت سیستم برای کانال غیر قطبی MIMO بر حسب SNR برای تعداد متغیری از آنتن‌های فرستنده و گیرنده ۵۸

شکل ۵–۵: نمودار تابع توزیع تجمعی ظرفیت سیستم برای کانال غیر قطبی MIMO بر حسب مجموع ظرفیت ارسالی بر روی آرایه‌ی آنتنی برای تعداد متغیری از آنتن‌های فرستنده و گیرنده ۵۹
شکل ۵–۶: نمودار مجموع ظرفیت سیستم برای کانال غیر قطبی MIMO 4×4 بر حسب SNR برای فاصله‌ی بین آرایه‌های آنتنی متغیر در سمت فرستنده ($r_u = 0.5\lambda$ در نظر گرفته شده است) ۵۹
شکل ۵–۷: نمودار تابع توزیع تجمعی ظرفیت سیستم برای کانال غیر قطبی MIMO 4×4 بر حسب SNR برای فاصله‌ی بین آرایه‌های آنتنی متغیر در سمت فرستنده ($r_u = 0.5\lambda$ در نظر گرفته شده است) ۶۰
شکل ۵–۸: نمودار مجموع ظرفیت سیستم برای کانال غیر قطبی MIMO 4×4 بر حسب SNR برای فاصله‌ی بین آرایه‌های آنتنی متغیر در سمت گیرنده ($r_s = 0.5\lambda$ در نظر گرفته شده است) ۶۰
شکل ۵–۹: نمودار تابع توزیع تجمعی ظرفیت سیستم برای کانال غیر قطبی MIMO 4×4 بر حسب SNR برای فاصله‌ی بین آرایه‌های آنتنی متغیر در سمت گیرنده ($r_s = 0.5\lambda$ در نظر گرفته شده است) ۶۱
شکل ۵–۱۰: هیستوگرام ضرایب کانال قطبی‌شده‌ی دو بعدی MIMO ۶۱
شکل ۵–۱۱: خود همبستگی ضرایب کانال قطبی‌شده‌ی دو بعدی MIMO ۶۲
شکل ۵–۱۲: نمایش حوزه‌ی زاویه برای ضرایب کانال قطبی‌شده‌ی دو بعدی MIMO برای تعداد ۳۲ آنتن فرستنده و ۳۲ آنتن گیرنده و فاصله‌ی بین آنتنی بحرانی ۶۲
شکل ۵–۱۳: نمودار ظرفیت سیستم برای کانال قطبی‌شده‌ی دو بعدی MIMO بر حسب SNR برای تعداد مختلفی از آنتن‌های فرستنده و گیرنده ۶۳
شکل ۵–۱۴: نمودار تابع توزیع تجمعی ظرفیت سیستم برای کانال قطبی‌شده‌ی دو بعدی MIMO بر حسب مجموع ظرفیت ارسالی بر روی آرایه‌ی آنتنی برای تعداد مختلفی از آنتن‌های فرستنده و گیرنده۶۳
شکل ۵–۱۵: نمودار مجموع ظرفیت سیستم برای کانال قطبی‌شده‌ی دو بعدی MIMO 4×4 بر حسب SNR برای فاصله‌ی بین آرایه‌های آنتنی مختلف در سمت فرستنده ($r_u = 0.5\lambda$ در نظر گرفته شده است) ۶۴
شکل ۵–۱۶: نمودار تابع توزیع تجمعی ظرفیت سیستم کانال قطبی‌شده‌ی دو بعدی MIMO 4×4 بر حسب SNR برای فاصله‌ی بین آرایه‌های آنتنی مختلف در سمت فرستنده ($r_u = 0.5\lambda$ در نظر گرفته شده است) ۶۴
شکل ۵–۱۷: نمودار مجموع ظرفیت سیستم برای کانال قطبی‌شده‌ی دو بعدی MIMO 4×4 بر حسب SNR برای فاصله‌ی بین آرایه‌های آنتنی مختلف در سمت گیرنده ($r_s = 0.5\lambda$ در نظر گرفته شده است) ۶۵
شکل ۵–۱۸: نمودار تابع توزیع تجمعی ظرفیت سیستم برای کانال قطبی‌شده‌ی دو بعدی MIMO 4×4 بر حسب SNR برای فاصله‌ی بین آرایه‌های آنتنی مختلف در سمت گیرنده ($r_s = 0.5\lambda$ در نظر گرفته شده است) ۶۵
شکل ۵–۱۹: مقایسه ظرفیت کانال MIMO 4×4 برای ۲ حالت مدل غیر قطبی و مدل قطبی‌شده‌ی دو بعدی($r_s = r_u = 0.5\lambda$) ۶۶

شکل ۵–۲۰: نمودار تابع توزیع تجمعی ظرفیت کانال MIMO 4×4 برای ۲ حالت مدل غیر قطبی و مدل قطبی‌شده‌ی دو بعدی ($r_s = r_u = 0.5\lambda$) ۶۶
شکل ۵–۲۱: هیستوگرام ضرایب کانال مدل قطبی شده‌ی سه بعدی MIMO ۶۷
شکل ۵–۲۲: نمایش حوزه‌ی زاویه برای ضرایب کانال مدل قطبی شده‌ی سه بعدی MIMO برای تعداد ۳۲ آنتن فرستنده و ۳۲ آنتن گیرنده و فاصله‌ی بین آنتنی بحرانی ۶۷

فصل ۱– مقدمه

۱–۱– سیستم‌های نسل چهار (LTE)

در سال‌های اخیر، افزایش تقاضا برای سرویس‌های مخابراتی پیشرفته، بازار جهانی و تعمیم تکنولوژی‌های بیسیم IEEE 802 در ارتباطات موبایل، باعث تحریک سیر تکاملی ارتباطات موبایل شده است. کاربردهایی که در سیستم‌های سلولار جدید مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارت از: VoIP[۱]، ویدئو کنفرانس، پیام‌های چند رسانه‌ای، دانلود آهنگ و کلیپ‌های ویدئویی، دسترسی به اینترنت و ... می‌باشند. پشتیبانی همزمان همه‌ی کاربردها با کیفیت سرویس متفاوت، از مهمترین چالش‌هایی است که در سیستم‌های سلولار با آن مواجه هستند. کمبود پهنای باند موجود باعث شده است که سیستم‌های سلولار باند پهن با بهره‌وری طیفی خیلی بالایی طراحی شوند. افزایش تقاضای بازار، فواید اقتصادی هنگفت و تراکم سرویس‌ها که نیازمند بهره‌وری طیفی بالایی هستند، نیاز به کانال‌های فرکانسی جدید را برای سیستم‌های ارتباطی موبایل، افزایش داده‌اند؛ به همین خاطر ITU-R WP 8F در اکتبر ۲۰۰۵ موبایل نسل چهار را معرفی کرد. هدف از این ابتکار، فراهم آوردن ظرفیت بالا و کیفیت سرویس مطلوب در جهت رفع نیازها بود. 3GPP LTE[۲] نامی است که به استانداردهای جدید اختصاص داده شده است. LTE قدم بعدی در سیر تکاملی سیستم‌های نسل دوم و سوم می‌باشد.

دستورالعمل‌های متفاوتی در معماری یک شبکه سلولار وجود دارد که پایه و اساس همه‌ی آنها بدین صورت است که به دو بخش شبکه دستیابی رادیوئی[۳] و شبکه‌ی هسته[۴] تقسیم می‌شود. در LTE، شبکه‌ی دستیابی رادیوئی و شبکه‌ی هسته را به ترتیب E-UTRAN[۵] و EPC[۶] نام‌گذاری کرده‌اند. فلسفه‌ی اصلی LTE کاهش تعداد گره‌هاست؛ از این رو، معماری تک گرهی را برای آن انتخاب کرده‌اند. ایستگاه پایه در LTE پیچیده‌تر از ایستگاه پایه‌ی موجود در شبکه‌های WCDMA/HSPA می‌باشد که eNB[۷] نامیده شده است. تکنولوژی‌هایی چون OFDM[۸]، MIMO[۹]، HARQ[۱۰] و توربو کدینگ[۱۱] از مهم‌ترین تکنولوژی‌هایی هستند که در شبکه دستیابی رادیویی جدید استفاده شده‌اند. در LTE UL[۱۲] از SC-FDMA[۱۳] همراه با باند محافظ و در LTE DL[۱۴] از OFDMA همراه با باند محافظ استفاده می‌شود. سه مدولاسیون QPSK، 16QAM و 64QAM نیز در LTE به صورت تطبیقی استفاده می‌شوند. از

[1] Voice over Internet Protocol
[2] Long Term Evolution
[3] radio access network
[4] core network
[5] Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
[6] Evolved Packet Core
[7] enhanced Node B
[8] Ortogonal Frequency Division Multiplexing
[9] Multiple Input Multople Output
[10] Hybrid Automatic Repeat reQuest
[11] turbo coding
[12] LTE Uplink
[13] Single Carrier Frequency Division Multiple Access
[14] LTE Downlink

خصوصیات ذاتی LTE این است که علاوه بر باندهای فرکانسی تعریف شده برای UMTS، باندهای فرکانسی بیشتری نیز به آن اضافه شده است و از هر دو مورد داپلکس تقسیم فرکانسی[1](FDD) و داپلکس تقسیم زمانی[2](TDD) برای مجزا ساختن ترافیک در UL و DL استفاده می‌شود.

MIMO تکنولوژی مهم دیگری است که در استانداردهای بی‌سیم جدید از قبیل 3GPP LTE و WIMAX استفاده شده است. تکنولوژی MIMO اولین بار در سال ۱۹۹۵ مطرح شد و این نتیجه بدست آمد که سیگنال ارسالی بر روی کانال‌های مستقل از همدیگر، محوشدگی متفاوتی خواهند داشت. آنتن‌های چندگانه در فرستنده و گیرنده، باعث افزایش نرخ ارسال اطلاعات، بهبود پوشش و ظرفیت شده است. در LTE DL، از یک، دو و یا چهار آنتن ارسالی در eNB و یک، دو و یا چهار آنتن دریافتی در UE استفاده می‌شود؛ و در LTE UL، از یک، دو و یا چهار آنتن گیرنده در eNB و فقط یک آنتن ارسالی در UE استفاده می‌شود. ترکیب تکنولوژی‌های MIMO و OFDM (MIMO-OFDM) به عنوان روشی برای افزایش بهره‌وری طیفی در سیستم‌های باند پهن معرفی شده است [۴،۳،۲،۱].

۱-۲- سیستم‌های مبتنی بر MIMO

افت سیگنال از جمله مشکلات مطرح در مخابرات سیار امروزی است و باعث کاهش ظرفیت سیستم می‌شود که به دلیل محدودیت پهنای باند سبب کاهش تعداد مشترکین خواهد شد. یکی از مهم‌ترین روش‌هایی که برای کاهش اثرات ناشی از افت سیگنال استفاده می‌شود، دایورسیتی[3] نام دارد که دایورسیتی مکانی یکی از انواع آن می‌باشد. استفاده از آنتن‌های چندگانه باعث ایجاد چندین مسیر بین فرستنده و گیرنده می‌شود و در سمت گیرنده، سیگنال از کانال‌های مختلف دریافت خواهد شد. بنابراین احتمال اینکه سیگنال دریافتی از مسیرهای مختلف بطور همزمان محو شوند، کم است، از این رو می‌توان سیگنال مطلوب را استخراج کرد. اگر شرایط محیط و سایر پارامترهای وابسته به کانال طوری باشند که بین فرستنده و گیرنده چندین کانال مستقل بوجود آید، در این صورت فرستنده قادر است به تعداد کانال‌های مستقل، بطور همزمان سیگنال ارسال نماید و درجه‌ی آزادی[4] سیستم افزایش می‌یابد. درجه‌ی آزادی برابر تعداد بیت‌هایی است که گیرنده بطور همزمان آشکار می‌کند و سبب افزایش ظرفیت سیستم می‌شود. سیستم‌های مبتنی بر MIMO، کاندیدای مناسبی برای استفاده در مخابرات نسل جدید به شمار می‌روند. کانال انتشار رادیویی در این سیستم‌ها، ویژگی‌های مهمی را از قبیل: بهره‌ی دایورسیتی، افزایش انعطاف‌پذیری شبکه، افزایش بهره‌ی توان بوسیله شکل دادن به پرتو ارسالی[5](BF)، افزایش درجه‌ی آزادی و افزایش ظرفیت[6]، فراهم آورده است [۵].

[1] Frequency Division Doplex
[2] Time Division Doplex
[3] diversity
[4] degree of freedom
[5] beamforming
[6] capacity

۱-۳-روش‌های مدل‌سازی کانال MIMO

سه روش عمومی، برای مدل‌سازی کانال MIMO استفاده می‌شود که عبارت از مدل ردیابی اشعه[۱]، مدل همبستگی[۲] و مدل پراکندگی[۳] می‌باشند. درمدل ردیابی اشعه، موقعیت دقیق پراکنده‌سازها، انعکاس[۴]، انکسار[۵] و پراکندگی[۶]، به هر یک از مسیرهای انتشار در کانال، مدل می‌شود. این روش به دلیل پیش‌بینی خوب و معقولانه برای محیط‌های داخل ساختمان[۷] و محیط‌های بیرون ساختمان با محدوده‌ی کم[۸] مورد استفاده قرار می‌گیرد، ولی به هر حال، برای اکثر محیط‌های outdoor خیلی پیچیده و برای شبیه‌سازی سیستم‌ها غیر عملی است. در مدل همبستگی، تغییرات زمانی کانال در نظر گرفته نمی‌شود و یا بطور مجزا از همبستگی زمانی مدل می‌شود. در نتیجه، بین حوزه‌های زمانی و فضایی، از لحاظ مشخصات آماری، هیچ‌گونه همبستگی وجود ندارد. در مدل پراکندگی، توزیعی از پراکنده‌سازها فرض می‌شود و کانال براساس اثر متقابل پراکنده‌سازها و جبهه‌های موج سطحی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین ویژگی آماری کانال‌ها، وابسته به نحوه‌ی توزیع پراکنده‌سازها می‌باشد که این توزیع‌ها می‌توانند به شکلی انتخاب شوند که محیط‌های متنوعی از کانال MIMO را نشان دهند. مدل پراکندگی، به مدل کانال فضایی[۹](SCM) نیز مشهور است.

۱-۴- ویژگی‌های مدل SCM

در این مدل، چون محیط انتشار به طور واضح مدل نشده، پیچیدگی آن به طور قابل توجهی کمتر از دو مدل دیگر است. پیچیدگی در پارامتربندی و تولید توزیع‌های پراکندگی برای محیط‌های متنوع و تعیین تعداد زیادی از پارامترها، از معایب این روش می‌باشد [۶]. مدل در نظر گرفته شده در این پایان‌نامه نیز همین مدل است. در این مدل، بین هر آنتن فرستنده و هر آنتن گیرنده، N مسیر اصلی وجود دارد. برای مدل کردن این مسیرها، هر مسیر اصلی را به صورت برآیند M زیرمسیر در نظر گرفته که با یک توزیع زاویه‌ای خاص حول مسیر اصلی قرار گرفته‌اند؛ این زیرمسیرها یک کلاستر از پراکنده‌سازها را تشکیل می‌دهند [۱۲،۱۱،۱۰،۹،۸،۷].

از نکاتی که در این مدل در نظر گرفته شده، همبستگی بین بعضی از پارامترهای کانال است. تاخیر انتشار[۱۰](DS)، گسترش تاخیر[۱۱](AS) و فیدینگ سایه[۱۲](SF) توزیع نرمال لگاریتمی[۱۳] دارند. آزمایشات و مباحث تئوری نشان داده‌اند که بین این پارامترها، معمولاً نوعی همبستگی وجود دارد. چون

---

[1] ray-tracing model
[2] correlation model
[3] scattering model
[4] reflection
[5] diffraction
[6] scattering
[7] indoor
[8] short-range outdoor
[9] Spatial Channel Model
[10] Delay Spread
[11] Angle Spread
[12] Shadow Fading
[13] lognormal

همبستگی بین این پارامترها نسبتاً بالاست، بنابراین یک مدل کانال فضایی، بایستی همبستگی بین پارامترهای مذکور را در نظر بگیرد [۱۳،۷].

امروزه استفاده از آنتن‌های با قطبی‌شدگی متفاوت، در سیستم‌های سلولار پیشرفته، به تدریج متداول می‌گردد که باعث کاهش فاصله‌ی مورد نیاز بین آرایه‌های آنتنی در دستگاه موبایل[1](MS) و ایستگاه پایه[2](BS) می‌شود. از این رو، این شیوه در سیستم‌های MIMO مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل‌سازی دو بعدی کانال، چون با در نظر گرفتن طیف سطح افقی[3] می‌توان تعداد زیادی از اثرات انتشار را برای محیط‌های outdoor نشان داد، طیف سطح عمودی[4] در نظر گرفته نمی‌شود. هنگامی که در بعضی از محیط‌های انتشار، طیف زاویه‌ای اهمیت دارد، آنگاه فرض انتشار دو بعدی امواج دیگر کارایی نخواهد داشت. در این مورد، اگر فقط بر روی پرتو دریافتی در سطح افقی توجه شود، نتایج غلطی بدست می‌آید. بنابراین برای رسیدن به نتایج مورد نظر، مدل دو بعدی اصلاح شده و به مدل سه بعدی ارتقا می‌یابد[۱۴].

۱–۵– ساختار گزارش

در این گزارش، در فصل ۲، انواع کانال MIMO معرفی و تاثیر استفاده از آنتن‌های متعدد در فرستنده و گیرنده و همچنین فاصله‌ی بین آنتن‌ها بر روی ظرفیت سیستم بررسی می‌شود. در ادامه، با در نظر گرفتن زوایای ارسالی و دریافتی سیگنال، تخمین زده می‌شود که زوایای مسیرها بایستی تا چه حد بزرگ باشد، تا ماتریس کانال شرایط مناسب داشته و ظرفیت بالایی را فراهم آورد. نمایشی از سیگنال‌ها، در حوزه‌ی زاویه بیان می‌شود و بر روی نقش زوایای ورود و خروج سیگنال‌ها، بر روی ظرفیت بحث می‌شود. با ارائه‌ی مثال‌هایی در حوزه‌ی زاویه، به بررسی فاصله‌ی بین آنتن‌های فرستنده و گیرنده می‌پردازیم. در مرحله‌ی بعد، درجه‌ی آزادی و دایورسیتی سیستم در مختصات زاویه‌ای معرفی می‌شوند و بعضی از پارامترهای مؤثر در مقدار درجه‌ی آزادی و دایورسیتی، بررسی می‌شوند. در نهایت، با تجزیه ماتریس کانال به مقادیر ویژه، ظرفیت سیستم محاسبه می‌شود.

در فصل ۳، مدل کانال فضایی مورد استفاده در شبیه‌سازی (بدون در نظر گرفتن آنتن‌های قطبی‌شده)، معرفی می‌شود. در ادامه، مراحل مدل‌سازی کانال و پارامترهای مورد نیاز در مدل‌سازی، به خصوص پارمترهای زاویه‌ای مورد نیاز، بیان می‌شود. انواع محیط استفاده شده در مدل‌سازی معرفی و پارامترهای وابسته به این محیط‌ها نیز ذکر می‌شود. در نهایت به محاسبه‌ی ضرایب کانال می‌پردازیم و همبستگی زمانی و فضایی ضرایب کانال اولیه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل ۴، با در نظر گرفتن آنتن‌های قطبی‌شده، بعضی از ساختارهای آنتنی که در سیستم‌های MIMO استفاده می‌شود، بیان می‌گردد. در ادامه، به معرفی پارامترهای مورد نیاز در مدل‌سازی دو بعدی کانال‌های MIMO با در نظر گرفتن آنتن‌های قطبی‌شده می‌پردازیم و با اعمال این پارامترها، مدل اولیه

[1] Mobile Station
[2] Base Station
[3] azimuth
[4] elevation

ارتقاء می‌یابد. در مرحله‌ی بعد، پارامترهای مورد نیاز در مدل سه بعدی معرفی شده و مدل‌سازی سه بعدی کانال‌های MIMO بیان می‌شود. در نهایت یک مدل ترکیبی، به صورت ترکیبی از مدل دو بعدی و مدل سه بعدی معرفی می‌شود.

در فصل ۵، به پیاده‌سازی نرم‌افزاری مدل‌های معرفی شده می‌پردازیم و خروجی‌های برنامه‌ی شبیه‌سازی شده را با همدیگر مقایسه می‌کنیم. برای اطمینان از صحت مدل‌های شبیه‌سازی شده، نتایج بدست آمده را با مطالب تئوری بیان شده در فصل ۲- مقایسه می‌کنیم.

فصل ۲– معرفی کانال‌های MIMO

استفاده از آنتن‌های چندگانه باعث ایجاد بهره‌ی دایورسیتی و همچنین درجه‌ی آزادی سیستم خواهد شد. دایورسیتی و درجه‌ی آزادی به عنوان دو پارامتر مهم کانال‌های MIMO مطرح هستند. با استفاده از چندین آنتن، کانال‌های متفاوتی بین فرستنده و گیرنده بوجود می‌آید به طوریکه سیگنال ارسالی بر روی این کانال‌ها دچار فیدهای متفاوتی می‌شوند و احتمال اینکه این سیگنال‌ها همزمان محو شوند کاهش می‌یابد؛ که این ویژگی دایورسیتی نام دارد. همچنین استفاده از آنتن‌های چندگانه سبب خواهد شد که فرستنده در یک لحظه بتواند چندین بیت اطلاعات را به طور همزمان ارسال نماید و گیرنده نیز تحت شرایط مناسب قادر خواهد بود به طور همزمان چندین بیت را آشکار نماید؛ که این ویژگی درجه‌ی آزادی سیستم نام دارد. بنابراین افزایش درجه‌ی آزادی سبب افزایش ظرفیت سیستم می‌شود.

در این فصل انواع کانال MIMO بررسی و برای هر حالت، پارامتر مهم درجه‌ی آزادی سیستم ارزیابی می‌شود. در ابتدا فقط با در نظر گرفتن مسیرهای مستقیم بین آنتن‌های فرستنده و گیرنده به بررسی ظرفیت سیستم می‌پردازیم و مشاهده خواهیم کرد که این نوع کانال‌ها هیچ‌گونه درجه‌ی آزادی را فراهم نمی آورند و تنها باعث ایجاد بهره‌ی توان خواهند شد. در مرحله‌ی بعد با افزایش فاصله‌ی بین آرایه‌های آنتی در سمت فرستنده و گیرنده، به طوریکه این فاصله از مرتبه‌ی فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده باشد، شرایطی بررسی خواهد شد که بتوان درجه‌ی آزادی را افزایش داد و سپس کانال MIMO همرا با یک مسیر غیر مستقیم مطرح می‌شود و مشاهده خواهیم کرد که تحت شرایط مناسب درجه‌ی آزادی افزایش می‌یابد؛ بنابراین چندمسیره بودن کانال، در سیستم‌های سیار نسل جدید نه تنها مشکل ساز نیست بلکه از این ویژگی به عنوان یک مزیت استفاده می‌شود. در ادامه، کانال‌های فیدینگ MIMO بیان خواهند شد و با آنالیز زوایای ارسال و دریافت سیگنال‌ها، برای افزایش درجه‌ی آزادی شرایط زاویه‌ای مطرح می‌شوند. بنابراین مختصات جدیدی در حوزه‌ی زاویه مطرح می‌شود و شرایط کانال در مختصات جدید ارزیابی خواهد شد. با معرفی ماتریس کانال در حوزه‌ی زاویه، اثر فرکانس حامل و طول آرایه‌های آنتنی بر روی درجه‌ی آزادی بررسی می‌شود.

۲–۱– کانال LOS SIMO[1]

منظور از LOS مسیر مستقیم بین فرستنده و گیرنده بدون در نظر گرفتن مسیرهای منعکس شده می‌باشد و همچنین منظور از SIMO، یک آنتن فرستنده و چندین آنتن گیرنده است. بنابراین، در این قسمت به معرفی ساده ترین کانال SIMO می‌پردازیم (شکل ۲–۱(a))؛ بطوریکه بین هر آنتن فرستنده و هر آنتن گیرنده فقط یک مسیر مستقیم وجود دارد. آرایه‌های آنتنی بیان شده در این فصل از نوع خطی یکنواخت هستند. ابتدا به بیان ریاضی مسئله پرداخته و ضرایب کانال، محاسبه می‌شوند. از روی ضرایب بدست آمده، ظرفیت محاسبه می‌شود و فاکتور مهم درجه‌ی آزادی، بررسی خواهد شد. اگر λ_c، طول موج

[1] Single Input Multiple Output