بسم الله الرّحمن الرّحيم

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

رساله دوره دکتری مهندسی مخابرات

تحلیل سیستمهای مخابراتی چند ورودی- چند خروجی در محیطهای واقعی

خشایار صالحی نوبندگانی

استاد راهنما:

دکتر پاییز عزمی

اسفند ۱۳۸۸

تقدیم به پدر، مادر و خواهر عزیزم که همواره با بردباری و از خود گذشتگی، مشوق من در فراگیری، تحصیل و پژوهش بوده اند.

از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر عزمی که همواره راهنمای اینجانب بوده اند و نکات فراوانی را از ایشان آموخته ام صمیمانه سپاسگزارم.

بدینوسیله، از مرکز تحقیقات مخابرات ایران که این رساله را از نظر مالی حمایت نمودند تشکر می نمایم.

چکیده

سیستمهای مخابراتی چند آنتنه در سالهای اخیر به عنوان یک فن آوری مناسب برای پاسخگویی به تقاضاهای فزاینده برای دستیابی به نرخهای بیشتر تبادل اطلاعات و کیفیت سرویس بهتر مطرح شده اند. در یک محیط واقعی، این سیستمها با دو پدیده اجتناب ناپذیر خطای تخمین کانال و همبستگی محوشدگی مواجهند. با معلوم بودن زمان همدوسی کانال، توان ارسالی در دسترس، و توان نویز گیرنده، روشهای مبتنی بر آموزش برای تخمین کانال، بخشی از زمان و انرژی در دسترس را صرف آموزش گیرنده جهت تخمین کانال نموده و مابقی زمان و انرژی را به ارسال داده ها اختصاص می دهند که این کار، خود به خود منجر به پیدایش مصالحه ای بین میزان دقت تخمین کانال و احتمال خطای آشکارسازی از یک سو و نرخ ارسال اطلاعات از سوی دیگر می شود که باید آن را مد نظر قرار داد. چنین تخمینهایی بی درنگ و همزمان می باشند؛ بی درنگ به آن معنی که تخمین شکل گرفته در گیرنده مربوط به همان بازه زمانی ای است که طی آن کانال ثابت است و همزمان از آن نظر که در طی بازه همدوسی کانال، هم تخمین کانال صورت می پذیرد و هم ارسال داده ها انجام می شود. در طول این رساله، ما استفاده از تخمین زن عملی همزمان و بی درنگ MMSE کانال را فرض نموده و اثر خطای آن را از جهات گوناگون بر این سیستمها بررسی می نماییم. نخست اثر تخمین همزمان و بی درنگ MMSE کانال رابر عملکرد سیستمهای چند ورودی- چند خروجی V-BLAST استفاده کننده از گیرنده خطی ZF با فرض محوشدگی ریلی ناهمبسته بررسی می نماییم و نسبت سیگنال به تداخل و نویز و تابع چگالی احتمال آن را به صورت دقیق به دست می آوریم. همچنین، احتمال خطای سمبول با فرض استفاده ی فرستنده از مدولاسیونهای M-ary PAM و QPSK دقیقاً به دست می آید و احتمال قطع نیز به فرم بسته برای این سیستمها استخراج خواهد شد. در ادامه، عملکرد سیستمهای تک ورودی- چند خروجی بهره جوینده از تخمین همزمان و بی درنگ MMSE کانال و گیرنده خطی ZF، تحت بدترین وضعیت همبستگی محوشدگی یعنی محوشدگی کاملاً همبسته، از نظر نسبت سیگنال به نویز، احتمال خطا و احتمال قطع مورد واکاوی دقیق قرار خواهد گرفت. به علاوه، کران پایین ظرفیت اطلاعاتی سیستمهای تک ورودی- چند خروجی استفاده کننده از تخمین MMSE کانال را در محوشدگی کاملاً همبسته تعیین نموده و آن را بر حسب پارامترهای در دسترس یعنی نحوه توزیع توان و زمان بین بخشهای آموزش و ارسال داده ها در شرایط مختلف طراحی بهینه سازی می کنیم. در واپسین گام، گیرنده خطی کمینه کننده متوسط مربع خطا را در سیستمهای تک ورودی- چند خروجی در هنگام استفاده از تخمین همزمان و بی درنگ MMSE کانال تحت حالات حدی همبستگی محوشدگی یعنی محوشدگی ناهمبسته و کاملاً همبسته ریلی استخراج نموده و ثابت می نماییم که در سیستمهای تک ورودی- چند خروجی، بر خلاف سیستمهای چند ورودی- چند خروجی، همه گیرنده های خطی ای نظیر گیرنده ZF و گیرنده خطی کمینه کننده متوسط مربع خطا که ساختاری مشابه همبسته نگار داشته باشند، دارای نسبتهای سیگنال به نویز برابر بوده و ضمناً، تصمیم گیری بر اساس معیار کمینه فاصله اقلیدسی همواره دارای نتیجه یکسانی در این دسته از گیرنده ها خواهد بود. متوسط مربع خطا را نیز برای گیرنده خطی کمینه کننده متوسط مربع خطا در این دو حالت حدی به فرم بسته محاسبه می نماییم. گفتنی است تحلیل انجام گرفته درحالات حدی همبستگی محوشدگی، کرانهای بالا و پایین عملکرد سیستمهای تک ورودی- چند خروجی را از جهات گوناگون بر ما روشن می سازد.

واژگان کلیدی: تخمین همزمان و بی درنگ MMSE کانال بر اساس ارسال سمبولهای آموزشی، سیستمهای چند ورودی- چند خروجی، سیستمهای تک ورودی- چند خروجی، گیرنده ZF، گیرنده خطی کمینه کننده متوسط مربع خطا (LMMSE)، محوشدگی ناهمبسته، محوشدگی کاملاً همبسته، ظرفیت اطلاعاتی

فهرست مطالب

فهرست علائم و نشانه ها ..... ث

فهرست جداول ..... ج

فهرست شکلها ..... ح

فهرست کلمات اختصاری ..... د

۱- مقدمه ۱

۱-۱- ساختار رساله ۳

۱-۲- دست آوردهای رساله ٤

۲- بررسی اثر خطای تخمین MMSE بر روی سیستمهای V-BLAST دارای گیرنده ZF در محوشدگی ناهمبسته ۷

۲-۱ مقدمه ۷

۲-۲- مدل سیستم ۹

۲-۳- محاسبه ی دقیق نسبت سیگنال به تداخل و نویز و توزیع آماری آن ۱۲

۲-۳-۱- محاسبه ی دقیق نسبت سیگنال به تداخل و نویز گیرنده ی ZF ۱۲

۲-۳-۲ محاسبه ی توزیع آماری نسبت سیگنال به تداخل و نویز گیرنده ی ZF ۱۳

۲-۴ محاسبات احتمال خطا ۱٤

۲-۴-۱- مدولاسیون M-ary PAM ۱۵

۲-۴-۲- مدولاسیون QPSK ۱۷

۲-۵- محاسبه احتمال قطع ۲۰

۲-۶- شبیه سازیهای کامپیوتری ۲۱

۲-۷- نتیجه گیری ۲٦

۳- بررسی اثر محوشدگی کاملاً همبسته بر روی سیستمهای ZF SIMO با تخمین زن MMSE کانال؛ و بر روی ظرفیت اطلاعاتی سیستمهای SIMO دارای تخمین MMSE از کانال و بر روشهای نیل به بیشینه ظرفیت ۲۷

۳-۱- مقدمه ۲۷

۳-۲- مدل سیستم ۲۸

۳-۳- محاسبه ی دقیق نسبت سیگنال به نویز و توزیع آماری آن ۳۰

۳-۴ محاسبات احتمال خطا ۳۱

۳-۴-۱- مدولاسیون M-ary PAM ۳۲
۳-۴-۲- مدولاسیون QPSK ۳۳
۳-۵- محاسبه احتمال قطع ۳۵
۳-۶- اثر محوشدگی کاملاً همبسته بر روی ظرفیت اطلاعاتی سیستمهای تک ورودی - چند خروجی دارای تخمین MMSE از کانال و بر روشهای نیل به بیشینه ظرفیت ۳۵
۳-۶-۱- استخراج کران پایین ظرفیت اطلاعاتی ۳۷
۳-۶-۲- بهینه (بیشینه) سازی کران پایین ظرفیت ۳۸
۳-۶-۲-۱- بهینه سازی بر حسب x_t ۳۸
۳-۶-۲-۲- بهینه سازی بر حسب توزیع توان بین بخش آموزش و بخش ارسال داده ها ۳۸
۳-۶-۲-۳- بهینه سازی بر حسب طول بازه آموزش ۳۹
۳-۶-۳- بیان کران پایین ظرفیت به فرم بسته ۳۹
۳-۶-۴- بهینه سازی کران پایین ظرفیت هنگامی که با محدودیت تساوی توانهای بخشهای آموزش و ارسال داده ها روبرو باشیم ٤٠
۳-۶-۵- نابرابریهای حاکم بر توانها در هنگام استفاده از توزیع توان بهینه و طول بهینه آموزش ٤٤
۳-۷- شبیه سازیهای کامپیوتری ٤٦
۳-۸- نتیجه گیری ۵۲
۴- بررسی اثر محوشدگی ناهمبسته و کاملاً همبسته بر روی سیستمهای SIMO با تخمین زن MMSE کانال و گیرنده ی خطی کمینه کننده متوسط مربع خطا ۵۵
۴-۱- مقدمه ۵۵
۴-۲- مدل سیستم ۵۸
۴-۳- استخراج گیرنده ی خطی کمینه کننده متوسط مربع خطا در حضور تخمین MMSE کانال برای محوشدگی ناهمبسته و کاملاً همبسته برای سیستمهای تک ورودی- چند خروجی ۵۹
۴-۴- تحلیل عملکرد گیرنده های دارای ساختار همبسته نگار از منظر نسبت سیگنال به نویز و احتمال خطا و قطع ٦۲
۴-۵- محاسبه ی متوسط مربع خطا ٦٦
۴-۵-۱- محاسبه ی متوسط مربع خطا در کانال محوشدگی ناهمبسته ٦۷
۴-۵-۲- محاسبه ی متوسط مربع خطا در کانال محوشدگی کاملاً همبسته ٦۷
۴-۶- شبیه سازیهای کامپیوتری ٦۸
۴-۷- نتیجه گیری ۷۰
۵- نتیجه گیری ۷۲

۵-۱- جمع بندی کارهای انجام شده در این رساله ۷۲
۵-۲- پیشنهاد برای ادامه پژوهش ۷۵
واژه نامه ۷۶
مراجع ۷۷
پیوست الف: محاسبه تخمین MMSE کانال چند ورودی- چند خروجی و خواص آماری آن در کانال محوشدگی ناهمبسته ۸۲
پیوست ب: اثبات قضیه ۲-۱ ..... ۸۶
پیوست ج: اثبات لم ۲-۱ ..... ۸۷
پیوست د: تخمین MMSE کانال تک ورودی- چند خروجی و خواص آماری آن در کانال محوشدگی کاملاً همبسته ۸۸
پیوست ه: بدست آوردن مرتبه دایورسیتی و بهره کدینگ برای سیستمهای تک ورودی- چند خروجی در حالات حدی همبستگی محوشدگی با فرض مدولاسیون BPSK ۹۰
پیوست و: مقایسه نسبت سیگنال به نویز موثر در سیستمهای تک ورودی- چند خروجی دارای محوشدگی کاملاً همبسته و سیستمهای تک ورودی- تک خروجی دارای محوشدگی ۹۳
پیوست ز: اثبات قضیه ۳-۲ ..... ۹۵
پیوست ح: اثبات تقعر $C_{etdp}(T_t)$ ۹۷
پیوست ط: آمارگان کافی برای تصمیم گیری در مورد بردار داده ها در سیستمهای چند آنتنه در غیاب خطای تخمین و در حضور آن ۹۸
مقالات ۱۰۴

فهرست علائم و نشانه ها

ماتریسها با حروف لاتین بزرگ برجسته و بردارها با حروف لاتین کوچک برجسته نمایش داده می شوند.

$\mathbf{I}_N$: ماتریس همانی $N\times N$.

$\mathbf{0}$: ماتریس یا بردار تمام صفر.

$\mathbf{ones}(m,n)$: ماتریسی $m\times n$ که تمامی عناصر آن واحد باشند.

بالانویسهای ^{T}، ^{H}، *، $^{-1}$، و $^+$ به ترتیب نمایشگر عملگرهای ترانهاده، مزدوج مختلط ترانهاده، مزدوج مختلط، معکوس، و شبه معکوس می باشند.

$\mathbf{X}_{i,j}$: بیانگر المان واقع بر سطر iام و ستون jام ماتریس $\mathbf{X}$.

$vec(\mathbf{X})$: عملگری که با پشت سر هم قراردادن ستونهای ماتریس $\mathbf{X}$، از آن یک بردار می سازد.

$E_{\mathbf{x}}\{.\}$: نمایانگر میانگین آماری آرگومان آن نسبت به متغیر تصادفی $\mathbf{x}$.

$E\{.|\mathbf{x}\}$: نشانگر میانگین آماری آرگومان آن به شرط دانستن متغیر تصادفی $\mathbf{x}$.

$E_{\mathbf{x}|\mathbf{y}}\{.\}$: نشان دهنده میانگین آماری آرگومان آن نسبت به متغیر تصادفی $\mathbf{x}$ به شرط دانستن متغیر تصادفی $\mathbf{y}$.

$\mathbf{R}_{\mathbf{x}}$ و $\mathbf{R}_{\mathbf{X}}$: نمایشگر ماتریسهای همبستگی بردار تصادفی $\mathbf{x}$ و ماتریس تصادفی $\mathbf{X}$ می باشند؛ به عبارت دیگر $\mathbf{R}_{\mathbf{x}}=E_{\mathbf{x}}\{\mathbf{x}\mathbf{x}^H\}$ و $\mathbf{R}_{\mathbf{X}}=E_{\mathbf{X}}\{vec(\mathbf{X})vec^H(\mathbf{X})\}$.

$\mathbf{R}_{\mathbf{X},\mathbf{Y}}$: ماتریس همبستگی متقابل ماتریسهای تصادفی $\mathbf{X}$ و $\mathbf{Y}$ که تعریف آن به صورت $\mathbf{R}_{\mathbf{X},\mathbf{Y}}=E\{vec(\mathbf{X})vec^H(\mathbf{Y})\}$ است.

$\otimes$: علامت ضرب کرونوکر.

$\mathbf{diag}(x_1,...,x_n)$: ماتریسی قطری که المانهای قطر اصلی آن x_1، ...، x_n باشند.

$tr(\mathbf{X})$: عملگری است که جمع عناصر قطر اصلی ماتریس مربعی $\mathbf{X}$ را به دست می دهد.

$\det(\mathbf{X})$: دترمینان ماتریس مربعی $\mathbf{X}$

$|.|$: نشانگر اندازه (نورم) اقلیدسی آرگومان آن.

$\mathrm{Re}(x)$ و $\mathrm{Im}(x)$: به ترتیب نمایش دهنده قسمت حقیقی و قسمت موهومی عدد مختلط x.

$\Pr(A)$: احتمال رخ دادن پیشامد تصادفی A.

$n!$: فاکتوریال عدد حسابی n

$\in$ و $\notin$: نمادهای عضویت و عدم عضویت.

$\log(x)$: لگاریتم طبیعی عدد حقیقی x.

فهرست جداول

جدول ۳-۱ کمینه P/s^2 لازم برای مقادیر مختلف T و N_R که منجر به بهینگی $T_t=1$ شده یا موجب اکیداً نزولی شدن $C_{etdp}(T_t)$ به ازای همه مقادیر حقیقی T_t بین 1 و $1-T$ می شوند..... ۵۲

جدول ۳-۱- الف، $N_R=2$ ۵۲
جدول ۳-۱- ب، $N_R=5$ ۵۲
جدول ۳-۱- ج، $N_R=10$ ۵۲

فهرست شکلها

شکل ۲-۱ مقایسه احتمال خطای یک سیستم چند آنتنه بهره گیرنده از مدولاسیون BPSK با گیرنده ZF و تخمین زن MMSE در حضور خطای تخمین و در نبود آن در حالتی که $N_T = 4$ ، $N_R = 6$ ، $T = 8$ ، $T_t = T_d = 4$ و $P = P_t = P_d = 4$ ۲۲

شکل ۲-۲ مقایسه احتمال خطای یک سیستم چند آنتنه بهره گیرنده از مدولاسیون BPSK با گیرنده ZF و تخمین زن MMSE کانال و برای $N_T = 4$ ، $N_R = 6$ ، $T = 8$ ، $T_t = T_d = 4$ و $P = 4$ در دو حالت: ۱- $T_t = T_d = 4$ و $P_t = P_d = 4$ ۲- هنگامی که $T_t = 6$ ، $T_d = 2$ و با استفاده از مقادیر بهینه P_t و P_d که با استفاده از (۲-۹) تنظیم شده اند..... ۲۳

شکل۲-۳ احتمال خطای یک سیستم چند آنتنه بهره گیرنده از مدولاسیون QPSK با گیرنده ZF و تخمین زن MMSE کانال در حالتی که $N_T = 4$ ، $N_R = 5$ ، $T = 8$ ، $T_t = T_d = 4$ ، و $P = P_t = P_d = 4$ ۲۴

شکل ۲-۴ مقایسه احتمال خطای دو سیستم چند آنتنه بهره گیرنده از مدولاسیون BPSK با گیرنده ZF و تخمین زن MMSE کانال و دارای $T = 8$ و $P = 4$ که یکی از $N_T = 4$ ، $N_R = 6$ ، $T = 8$ ، $T_t = T_d = 4$ و $P_t = P_d = 4$ استفاده می کند و دیگری که از $N_T = 2$ ، $N_R = 4$ و یکی از دو استراتژی زیر استفاده می کند: ۱- $T_t = 2$ ، $T_d = 6$ و با استفاده از مقادیر بهینه P_t و P_d که با استفاده از (۲-۹) تنظیم شده اند؛ ۲- $T_t = 2$ ، $T_d = 6$ ، $P_t = 4$ و $P_d = 2$ ۲۵

شکل ۳-۱ مقایسه احتمال خطای یک سیستم تک ورودی- چند خروجی بهره گیرنده از مدولاسیون BPSK با گیرنده ZF و تخمین زن MMSE کانال در محوشدگی ناهمبسته و کاملاً همبسته ریلی در حضور خطای تخمین و در نبود آن در حالتی که $N_R = 2$ ، $T = 2$ ، $T_t = T_d = 1$ ، و $P = P_t = P_d = 1$ ۴۶

شکل ۳-۲ مقایسه احتمال خطای یک سیستم تک ورودی- چند خروجی بهره گیرنده از مدولاسیون BPSK با گیرنده ZF و تخمین زن MMSE کانال در محوشدگی ناهمبسته و کاملاً همبسته ریلی در حضور خطای تخمین و در نبود آن در حالتی که $N_R = 2$ ، $T = 50$ ، $T_t = 1$ ، $P = 1$ ، $T_d = 49$ و با تنظیم بهینه P_t و P_d ۴۷

شکل ۳-۳ مقایسه احتمال خطای یک سیستم تک ورودی- چند خروجی بهره گیرنده از مدولاسیون QPSK با گیرنده ZF و تخمین زن MMSE کانال در محوشدگی ناهمبسته و کاملاً همبسته ریلی در حضور خطای تخمین و در نبود آن در حالتی که $N_R = 2$، $T = 2$، $T_t = T_d = 1$، و $P = P_t = P_d = 1$ ۴۸

شکل ۳-۴ مقایسه کران پایین ظرفیت یک سیستم تک ورودی- چند خروجی بهره گیرنده از تخمین زن MMSE کانال در محوشدگی ناهمبسته و کاملاً همبسته ریلی در حضور خطای تخمین و در نبود آن در حالتی که $N_R = 2$، $P = 1$، و $s^2 = 0.01$ به عنوان تابعی از T در حالتی که از توزیع توان بهینه استفاده شود و در حالتی که از توانهای مساوی در بخش آموزش و داده استفاده گردد و در حالتهای متناظر که دسترسی دقیق به اطلاعات کانال داریم..... ۴۹

شکل ۳-۵ کران پایین ظرفیت یک سیستم تک ورودی- چند خروجی بهره گیرنده از تخمین زن MMSE کانال در محوشدگی کاملاً همبسته ریلی در حضور خطای تخمین بر حسب طول بازه آموزش در حالتی که $N_R = 2$، $T = 20$، $P = P_t = P_d = 1$، و $s^2 = 10^{-5}, 4.1687\times10^{-5}, 0.001, 0.0035, 0.1, 1, 10, 100$. توجه نمایید که واحد محور عمودی nats/channel use بوده و $a = P / s^2$ ۵۱

شکل ۴-۱ مقایسه متوسط MSE یک سیستم تک ورودی- چند خروجی بهره گیرنده از مدولاسیون BPSK با گیرنده LMMSE و تخمین زن MMSE کانال در محوشدگی ناهمبسته و کاملاً همبسته ریلی در حضور خطای تخمین و در نبود آن در حالتی که $N_R = 2$، $T = 2$، $T_t = T_d = 1$، و $P = P_t = P_d = 1$ ۶۹

شکل ۴-۲ مقایسه متوسط MSE یک سیستم تک ورودی- چند خروجی بهره گیرنده از مدولاسیون BPSK با گیرنده LMMSE و تخمین زن MMSE کانال در محوشدگی ناهمبسته و کاملاً همبسته ریلی در حضور خطای تخمین و در نبود آن در حالتی که $N_R = 2$، $T = 20$، $P = 1$، $T_t = 1$، $T_d = 19$ و با تنظیم بهینه P_t و P_d ۷۰

فهرست کلمات اختصاری

اختصار	اصل عبارت
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BFSK	Binary Frequency Shift Keying
CDMA	Code Division Multiple Access
CSI	Channel State Information
ML	Maximum Likelihood
(L)MMSE	(Linear) Minimum Mean Square Error
MIMO	Multiple Input-Multiple Output
MPSK	M-ary Phase Shift Keying
MQAM	M-ary Quadrature Amplitude Modulation
MSE	Mean Square Error
PAM	Pulse Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
SEP	Symbol Error Probability
SIMO	Single Input-Multiple Output
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SISO	Single Input-Single Output
SNR	Signal to Noise Ratio
V-BLAST	Vertical Bell Laboratories Space-Time
ZF	Zero-Forcing
ZF-SIC	Zero-Forcing with Successive Interference Cancellation

فصل اول

مقدمه

سیستمهای مخابراتی چند ورودی- چند خروجی[1]، از بدو پیدایششان، چنان توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده اند که تحقیق پیرامون جنبه های گوناگون نظری و کاربردی آنها بی وقفه ادامه دارد (برای مثال، [۱] تا [۷] و مراجع موجود در آنها را ملاحظه فرمایید.) دلیل اصلی این سیل توجه آن است که این سیستمها قادر به افزایش چشمگیر نرخ تبادل اطلاعات و کاهش قابل ملاحظه احتمال خطا بدون نیاز به پهنای باند و توان ارسالی اضافی که دو محدودیت گران قیمت در طراحی هستند؛ می باشند[۸ و ۹].

از بین انواع سیستمهای چند ورودی- چند خروجی، سیستمهای V-BLAST[2] دارای پیچیدگی قابل قبولی می باشند و در عین حال بدون نیاز به داشتن اطلاعات حالت کانال[3] در فرستنده، به کسر قابل توجهی از ظرفیت کانال دست می یازند [۱۰]. در این سیستمها، سمبولهای آنتنهای فرستنده مختلف، چه در بعد زمان و چه در بعد مکان مستقل می باشند.

عملکرد ساختارهای مختلف چند ورودی- چند خروجی از جمله سیستمهای V-BLAST با فرض دسترسی دقیق به اطلاعات حالت کانال در گیرنده پیشتر مورد تحقیق و پژوهش قرار گرفته است (به عنوان مثال، [۱۱] تا [۱۳] را ملاحظه نمایید.) اما ناگفته پیداست که تمامی روشهای مختلف تخمین، خواه ناخواه دارای خطا بوده و داشتن تخمین دقیق کانال امری ناممکن است و بنابراین باید خطای تخمین را در تحلیل عملکرد این سیستمها لحاظ کرد. گفتنی است روشهای مبتنی بر ارسال دنباله های آموزشی در زمره پر کاربردترین روشها در تخمین کانال می باشند که در آنها، تخمین کانال یک فرایند همزمان و بی درنگ[4] است و لذا نباید با مسئله خطای تخمین به نحوی برخورد نمود که گویی پیشاپیش

---

[1] Multiple Input-Multiple Output (MIMO) Communication Systems

[2] Vertical Bell Laboratories Space-Time

[3] Channel State Information (CSI)

[4] Online

تخمینی از کانال با خطایی به میزان دلخواه کوچک در جایی دیگر محاسبه شده و به گیرنده تحویل داده شده است؛ به عبارت دیگر همزمان و بی درنگ بودن امر تخمین را همواره باید لحاظ نمود.

از طرف دیگر، در کانالهای با محوشدگی[۱] ناهمبسته، ظرفیت اطلاعاتی[۲] سیستمهای چند آنتنه، وابستگی مستقیم خطی با کمینه ی تعداد آنتنهای فرستنده و گیرنده دارد [۸] و [۹]. اما همانطور که مطالعات انجام شده در [۱۴] نشان می دهد، فرض محوشدگی ناهمبسته به دلایل گوناگونی از جمله عدم امکان مراعات فاصله ی کافی بین آنتنهای فرستنده و گیرنده به علت محدودیت ابعاد دستگاههای سیار مخابراتی نظیر گوشیهای تلفن همراه و همچنین وجود پراکنده سازها[۳] در محیط و علل دیگر برآورده نمی شود. بنابراین، می باید در بررسی و ارزیابی عملکرد این سیستمها، اثر همبستگی[۴] محوشدگی لحاظ شود. تاثیر همبستگی محوشدگی بر ظرفیت اطلاعاتی سیستمهای چند ورودی- چند خروجی توسط بسیاری از پژوهشگران با فرض آنکه گیرنده اطلاعات حالت کامل را بداند و هیچ نوع خطای تخمینی وجود نداشته باشد بررسی شده است (به عنوان نمونه، [۱۵] تا[۲۱] را ملاحظه فرمایید).

بنابراین در یک محیط واقعی، خطای تخمین کانال و همبستگی محوشدگی، دو پدیده همیشه حاضر در سیستمهای مخابراتی چند آنتنه می باشند.

با پیدایش سیستمهای چند آنتنه، نیاز به استفاده از گیرنده های خطی که از پیچیدگی قابل قبولی برخوردارند بر پژوهشگران مسلم گشت چرا که گیرنده بهینه (گیرنده ML[۵]) در این سیستمها دارای پیچیدگی بسیار زیادی می باشد و معمولاً آشکارسازی توسط این گیرنده، احتیاج به $\prod_{i=1}^{N_T} M_i$ جستجو دارد که در آن M_i تعداد اعضای Constellation مورد استفاده توسط آنتن فرستنده iام است. در این میان، گیرنده خطی ZF[۶] و گیرنده خطی کمینه کننده متوسط مربع خطا[۷] (LMMSE) به دلیل سادگی ساختار و در عین حال، داشتن عملکرد قابل قبول، از وجوه گوناگون مورد تحقیقات فراوان قرار گرفته اند. مطالعه گیرنده های خطی ZF و LMMSE در ابتدا در آشکارسازی چند کاربره سیگنالهای CDMA[۸]

---

[1] Fading

[2] Information Capacity

[3] Scatterers

[4] Correlation

[5] Maximum Likelihood

[6] Zero-Forcing (ZF) Receiver

[7] Linear Minimum Mean Square Error (LMMSE) Receiver

[8] Code Division Multiple Access (CDMA)

مطرح گردیده و مفصلاً مباحث آن در [۲۲] توسط آقای سرجیو وردو[1] که پیشگام این زمینه بوده است، تبیین شده است. به ویژه، گیرنده ZF توسط [۲۳] و گیرنده LMMSE توسط [۲۴] مطرح گردیدند که گیرنده ی ZF در شرایط مد نظر ما در فصلهای دوم و سوم مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت و گیرنده خطی کمینه کننده متوسط مربع خطا در فصل چهارم بررسی می شود.

۱-۱- ساختار رساله

ترتیب فصول رساله به شرح زیر می باشد:

در فصل دوم، با فرض محوشدگی ناهمبسته ریلی[2]، عملکرد یک سیستم کدنشده V-BLAST که از گیرنده ZF و تخمین همزمان و بی درنگ MMSE کانال بر اساس ارسال داده های آموزشی[3] استفاده می کند را مطالعه می کنیم- امری که تا کنون مغفول مانده است. عبارت دقیق نسبت سیگنال به تداخل و نویز و توزیع آماری آن را یافته و بر خلاف روند حاکم بر بسیاری از تحقیقهای انجام شده، به جای ارائه کران، روابط دقیق احتمال خطای سمبول[4] را برای مدولاسیونهای M-ary PAM[5] و QPSK[6] بدست می آوریم. به علاوه، احتمال قطع[7] نیز حساب خواهد شد.

در فصل سوم، عملکرد سیستمهای تک ورودی- چند خروجی که از تخمین همزمان و بی درنگ MMSE کانال بر اساس ارسال سیگنالهای آموزشی و گیرنده ZF بهره می گیرند را در بدترین شرایط همبستگی محوشدگی یعنی محوشدگی کاملاً همبسته[8] مطالعه خواهیم کرد و ضمن یافتن نسبت سیگنال به نویز و توزیع آماری آن، احتمال خطای این سیستمها را با فرض استفاده ی فرستنده از مدولاسیونهای M-ary PAM و QPSK محاسبه نموده و احتمال قطع را نیز برای این سیستمها بدست می آوریم. به علاوه، با معلوم بودن زمان همدوسی کانال[9] که طی آن کانال ثابت باقی می ماند و توان ارسالی در دسترس، کران پایینی را برای ظرفیت اطلاعاتی این سیستمها معین نموده و طریقه بهینه تقسیم توان و زمان بین بخشهای آموزش و ارسال داده ها را جهت بیشینه نمودن کران پایین مزبور بیان می نماییم.

---

[1] Sergio Verdu

[2] Rayleigh

[3] Online training-based minimum mean square error (MMSE) channel estimation

[4] Symbol Error Probability (SEP)

[5] M-ary Pusle Amplitude Modulation (M-ary-PAM)

[6] Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

[7] Outage Probability

[8] Fully-Correlated Fading

[9] Channel Coherence Time

همچنین با بررسی دقیق خواص کران استخراج شده در وضعیتی که محدودیت تساوی توانها بین دو بخش آموزش و ارسال داده ها وجود داشته باشد، به بحث پیرامون طول بهینه بازه آموزش خواهیم پرداخت.

در فصل چهارم، یک سیستم تک ورودی- چند خروجی که در آن گیرنده از تخمین همزمان و بی درنگ MMSE کانال استفاده می کند اما فرستنده هیچ اطلاعی از اطلاعات حالت کانال ندارد را تحت شرایط حدی همبستگی محوشدگی یعنی محوشدگی ناهمبسته و محوشدگی کاملاً همبسته در نظر گرفته و گیرنده کمینه کننده متوسط مربع خطا را برای آن به دست می آوریم. با بیان قضیه ای، هم ارز بودن همه گیرنده های خطی ای نظیر گیرنده های ZF و LMMSE که مضربی از یک همبسته نگار[1] می باشند را در سیستمهای تک ورودی- چند خروجی دارای کانال محوشدگی با ماتریس همبستگی دلخواه از نظر نسبت سیگنال به نویز و از دید تصمیم گیری در مورد سیگنال ارسالی بر اساس معیار کمینه فاصله اقلیدسی روشن می سازیم و در عین حال تصریح می کنیم که این گیرنده ها در سیستمهای چند ورودی- چند خروجی، از دو منظر اخیر یکسان نمی باشند. ناگفته پیداست که سایر پارامترهای عملکرد از قبیل متوسط مربع خطا[2] برای گیرنده های مختلف، چه در سیستمهای تک ورودی- چند خروجی و چه در سیستمهای چند ورودی- چند خروجی، متفاوت خواهند بود. در ادامه، ضمن به دست آوردن متوسط مربع خطای گیرنده LMMSE به شرط مشخص بودن تخمین کانال، متوسط آن را بر روی تخمین کانال محاسبه و به فرم بسته بیان خواهیم کرد. گفتنی است به دلیل ساختار تک ورودی- چند خروجی و اطلاع نداشتن فرستنده از اطلاعات حالت کانال، طراحی پیش کد کننده[3] در این وضعیت بی معنی می باشد.

نهایتاً در فصل پنجم، ضمن تشریح نتایج، پیشنهادهایی را جهت ادامه تحقیقات ارائه خواهیم کرد.

۱-۲- دست آوردهای رساله

مهمترین دست آوردهای رساله حاضر را می توان به صورت زیر برشمرد:

لحاظ کردن خطای تخمین **همزمان و بی درنگ** MMSE کانال بر اساس ارسال سمبولهای آموزشی و

- در نظر گرفتن سیستمهای چند ورودی- چند خرو جی کدنشده V-BLAST استفاده کننده از گیرنده ZF تحت محوشدگی ناهمبسته که منجر به موارد زیر گردیده است:
  - به دست آوردن نسبت سیگنال به تداخل و نویز و توزیع آماری آن

[1] Correlator

[2] Mean Square Error (MSE)

[3] Precoder

- به دست آوردن دقیق احتمال خطای سمبول به فرم بسته در این سیستمها با فرض استفاده فرستنده از مدولاسیون M-ary PAM
- به دست آوردن دقیق احتمال خطای سمبول با فرض استفاده فرستنده از مدولاسیون QPSK به شکل انتگرالی که اگر تعداد آنتنهای گیرنده برابر و یا یکی بیشتر از تعداد آنتنهای فرستنده باشد پاسخ فرم بسته داشته و در سایر موارد به شکل عددی قابل محاسبه است
- به دست آوردن دقیق احتمال قطع به فرم بسته برای سیستمهای فوق

- در نظر گرفتن سیستمهای تک ورودی- چند خرو جی کدنشده ی استفاده کننده از گیرنده ZF تحت محوشدگی کاملاً همبسته که منجر به موارد زیر گردیده است:
  - به دست آوردن نسبت سیگنال به نویز و توزیع آماری آن
  - به دست آوردن دقیق احتمال خطای سمبول به فرم بسته در این سیستمها با فرض استفاده فرستنده از مدولاسیون M-ary PAM
  - به دست آوردن دقیق احتمال خطای سمبول به فرم بسته در این سیستمها با فرض استفاده فرستنده از مدولاسیون QPSK
  - به دست آوردن دقیق احتمال قطع به فرم بسته برای سیستمهای فوق

- استخراج کران پایین ظرفیت سیستمهای تک ورودی- چند خرو جی دارای تخمین همزمان و بی درنگ خطادار MMSE کانال و بیشینه کردن کران مذکور از طریق:
  - تعیین روش بهینه تخصیص توان به بخشهای آموزش و ارسال داده ها با معلوم بودن زمان همدوسی کانال و توان ارسالی در دسترس
  - تعیین روش بهینه تخصیص زمان به بخشهای آموزش و ارسال داده ها با معلوم بودن زمان همدوسی کانال و توان ارسالی در دسترس به شرط استفاده از توانهای بهینه برای دو بخش آموزش و ارسال داده ها
  - بحث دقیق در مورد روش بهینه تخصیص زمان به بخشهای آموزش و ارسال داده ها با معلوم بودن زمان همدوسی کانال و توان ارسالی در زمانی که با محدودیت استفاده از توانهای برابر برای دو بخش آموزش و ارسال داده ها مواجه باشیم. این کار با

بررسی دقیق ویژگیهای ریاضی کران پایین ظرفیت در این شرایط انجام خواهد شد. حالات مجانبی که نسبت توان در دسترس به توان نویز بسیار کوچک یا بسیار بزرگ باشد، منجر به نتایج مشخصی در مورد طول بهینه بازه آموزش خواهند شد.

- در نظر گرفتن سیستمهای تک ورودی- چند خروجی کدنشده ی استفاده کننده از گیرنده خطی کمینه کننده متوسط مربع خطا تحت حالات حدی محوشدگی یعنی محوشدگی ناهمبسته و محوشدگی کاملاً همبسته با فرض مطلع نبودن فرستنده از اطلاعات حالت کانال که منجر به موارد زیر گردیده است:
  - استخراج گیرنده خطی کمینه کننده متوسط مربع خطا در حالات حدی همبستگی محوشدگی در حضور تخمین همزمان و بی درنگ MMSE کانال
  - روشن ساختن این موضوع که همه گیرنده های خطی ای نظیر ZF و گیرنده خطی کمینه کننده متوسط مربع خطا که ساختاری شبیه همبسته نگار دارند، دارای سیگنال به نویزهای برابر بوده و آشکارساز کمینه گر فاصله اقلیدسی ML برای همگی آنها همسان خواهد بود- امری که در سیستمهای چند ورودی- چند خروجی برقرار نیست.
  - محاسبه متوسط مربع خطای گیرنده خطی کمینه کننده متوسط مربع خطا مشروط بر معلوم بودن تخمین MMSE کانال تک ورودی- چند خروجی و استخراج متوسط این کمیت بر روی تخمین کانال برای کانالهای دارای محوشدگی ناهمبسته و کاملاً همبسته به فرم بسته

- ارزش تحلیل انجام شده در حالات حدی در آن نهفته است که بهترین و بدترین وضعیت عملکرد سیستمهای تک ورودی- چند خروجی دارای تخمین خطادار همزمان و بی درنگ MMSE کانال بر اساس ارسال سمبولهای آموزشی را در یک محیط واقعی که همبستگی بین ضرائب کانال موجود است، چه از دیدگاه احتمال خطا و احتمال قطع، چه از نظر ظرفیت اطلاعاتی و چه از منظر کمینه متوسط مربع خطای گیرنده خطی کمینه کننده متوسط مربع خطا به ما می نمایاند. در یک محیط فیزیکی، عملکرد این سیستمها از لحاظ نرخ خطای سمبول چیزی بین نتایج تحلیلی فصل دوم و فصل سوم، از دیدگاه ظرفیت، بینابین نتایج بیان شده در فصل سوم و نتایج [۲۵] و از نظر کمینه متوسط مربع خطای گیرنده خطی کمینه کننده متوسط مربع خطا، بین نتایج بیان شده در زیربخشهای ۴-۵-۱ و ۴-۵-۲ خواهد بود.