



دانشگاه زنجان

دانشکده مهندسی

گروه برق

پایان نامه کارشناسی

کدهای زمان فضا

استاد راهنما :

دکتر محمد مصطفوی

دانشجو :

احسان خیاطان

پائیز 1391

فهرست مطالب

1- مقدمه	۱
2- پیشینه	۳
1.2- مدل کانال بی سیم باند پهن	۳
2.2- دایورسیتی ارسال	۷
3.2- مرتبه دایورسیتی	۹
4.2- مصالحه نرخ دایورسیتی	۱۳
3- کدهای زمان فضا	۱۵
1.3- معیارهای طراحی کدهای زمان فضا	۱۶
2.3- کدهای شبکه ای زمان فضا (STTC)	۱۸
3.3- کدهای بلوکی زمان فضا (STBC)	۲۰
4.3- یک کد چهارگانه ی غیر خطی جدید با حداکثر دایورسیتی	۲۴
5.3- کدهای زمان فضای دایورسیتی جاسازی شده	۲۶
کدهای دایورسیتی جاسازی شده خطی	۲۸
کدهای دایورسیتی جاسازی شده غیر خطی	۲۹
4- کاربرد	۳۳
1.4- پردازش سیگنال	۳۳
تخمین کانال برای کانال های شبه استاتیک	۳۳
یکپارچگی برابری و رمزگشایی	۳۵
تکنیک های انطباقی	۳۷
تکنیک های غیر منسجم	۴۰
2.4- کاربرد کدهای دایورسیتی جاسازی شده	۴۲
3.4- تعامل با لایه های شبکه	۴۶
دسترسی چندگانه : لغو تداخل	۴۶
لایه های فیزیکی ، گره و انتقال	۴۹
پیشینه سازی کارایی شبکه	۵۰
5- بحث و چالش های پیش رو	۵۲

کدگذاری زمان فضا در ارتباطات بی سیم (مبانی و اصول)

1- مقدمه

ویژگی اصلی انتقال بی سیم تصادفی بودن کانال های ارتباطی است که منجر به نوسانات تصادفی در سیگنال دریافتی می شود که از این قضیه معمولاً به عنوان محوشدگی یاد می شود.

از این تصادفی بودن می توان برای بالا بردن کارایی از طریق دایورسیتی بهره برد. ما دایورسیتی را به طور کلی به عنوان روش انتقال اطلاعات از طریق نمونه های مستقل متعدد این محوشدگی تصادفی معرفی می کنیم.

شکل های مختلفی از دایورسیتی وجود دارد که تمرکز ما در این فصل بر روی دایورسیتی فضایی از طریق آنتن های ارسال/ دریافت مستقل است.

از تئوری اطلاعات برای نشان دادن این که آنتن های متعدد این پتانسیل را دارند که به طور قابل ملاحظه ای نرخ بیت قابل دسترس را افزایش دهند استفاده می شود و بنابراین کانال های بی سیم را از لوله های باریک به لوله های پهن داده تبدیل می کنند.

ابتدایی ترن شکل از دایورسیتی ارسال فضایی طرح دایورسیتی تأخیری است که در آن یک سیگنال از طریق یک آنتن ارسال و به اندازه یک بازه زمانی تأخیر و سپس از طریق آنتن دیگری فرستاده می شد [65;68].

پردازش سیگنال در گیرنده برای رمزگشایی انطباق سیگنالهای اصلی و تأخیر یافته بکار رفته است.

با مدنظر قرار دادن دایورسیتی چند آنتن به عنوان جریان های اطلاعات ، طرح های (کدگذاری) ارسال پیچیده تری را برای نزدیک شدن به محدودیت های عملی نظری می توان طراحی کرد. با استفاده از این روش ما تمرکزمان را بر روی طرح های کدگذاری زمان فضا (STC) می گذاریم [6;61]. این طرح ارتباط زمانی و فضایی بین سیگنال های فرستاده شده از آنتن های مختلف را معرفی می کند بدون آنکه توان ارسالی کل یا پهنای باند ارسالی را افزایش دهد. در واقع یک بهره دایورسیتی وجود دارد که از مسیرهای متعدد بین ایستگاه پایه و پایانه کاربر نشئت می گیرد و همچنین یک بهره کدگذاری وجود دارد که از این که چگونه سمبل ها در سراسر آنتن های ارسال به هم مربوط اند ناشی می شود. بهبود کارایی در این طرح تنها از طریق 2 آنتن در ایستگاه پایه و 1 یا 2 آنتن در پایانه کاربر با ساختارهای گیرندگی ساده به طور قابل ملاحظه ای حاصل می شود. آنتن دوم در پایانه کاربر می تواند برای افزایش بیشتر ظرفیت سیستم از طریق حذف تداخل به کار رود.

طرح کدگذاری زمان فضا تنها ظرف مدت چند سال از یک اختراع به یک پذیرش در استانداردهای اصلی بی سیم تبدیل شده است. برای WCDMA جایی که از دنباله های در حال گسترش کوتاه استفاده می شود دایورسیتی ارسال که بوسیله کدگذاری زمان فضا معرفی شده است تفاوت بین نرخ بیت داده 100 kb/s و 384 kb/s را نشان می دهد. تأکید ما بر روی راه حل هایی است که شامل تخمین ، کدگذاری مشترک و برابری کانال ها باشند تا جایی که پردازش سیگنال ناممکن نباشد. دنیای تازه آنتن های ارسال و دریافت متعدد نیاز به اصلاحات قابل ملاحظه ای بر روی تکنیک هایی که برای ارتباطات دریافت/ارسال واحد توسعه یافته اند دارد. چون قیمت و پیچیدگی گیرنده یک موضوع خیلی مهم است پس راهکار ما در نوآوری پردازش سیگنال بر سیستم هایی با 1، 2 یا 4 آنتن ارسال و 1 یا 2 آنتن دریافت استوار است. برای مثال تکنیک های حذف تداخل که در قسمت 4 معرفی می شوند قادر به انتقال 1 Mb/s بر روی یک کانال 200 kHz GSM/EDGE هستند که از 4 آنتن ارسال و 2 آنتن دریافت استفاده می کنند. از این رو محدودیت ما بر روی تعداد آنتن ها انتظارات کاربر را برآورده نمی سازد.

تلاش های اولیه تحقیقات STC بر روی کانال های محوشدگی تخت باند باریک متمرکز بود [6;61;52]. اجرای موفقیت آمیز STC بر روی کانال های فرکانس انتخابی باند پهن چند کاربره نیاز به الگوریتم های پردازش سیگنال جدید و عملی با کارایی بالا برای تخمین کدگذاری/برابری مشترک و حذف تداخل دارد.

این امر به نوبه خود چالش برانگیز است بخاطر گسترش تأخیر زیاد کانال های باند پهن که تعداد پارامترهای تخمین زده شده کانال و حالت های ترلیس (شبکه) را در کدگذاری/برابری مشترک افزایش می دهند ،
مخصوصاً در آنتن های ارسال متعدد ؛ که بدین ترتیب بارهای مصرفی توان و بارهای محاسباتی اضافی قابل توجهی بر روی پایانه های کاربر قرار می دهد.

از سوی دیگر اجرا و توسعه یک چنین الگوریتم های پیشرفته ای برای کانال های بی سیم نوید حتی بهره های عملیاتی بیشتری را نسبت به آنچه برای کانال های باند باریک ارائه شد را می دهد ، بخاطر دسترس پذیری بهره های دایورسیتی چند مسیره (علاوه بر فضایی) که می توانند تحقق پیدا کنند.

به موجب این طراحی سیگنال های زمان فضا کدگذاری شده از ساختار جبری غنی ای بهره می برند که می توانند برای الگوریتم های پردازش سیگنال تلفیق کننده ها با پیچیدگی کمتر و مطلوبیت بیشتر بررسی شوند.
ساختار این بخش به شرح زیر است :

بخش دوم را با اشاره ای از گذشته شروع می کنیم که در آن مدل فرضی کانال بی سیم باند پهن را ترسیم می کنیم و در ادامه به بحث هایی درباره ی دایورسیتی ارسال و مفهوم مرتبه دایورسیتی می رسیم.

در بخش سوم معیارهای طراحی را توضیح می دهیم و درباره مثال هایی از ساختار بلوکی و ساختار ترلیس (شبکه) بحث می کنیم. در این بخش ما همچنین به برخی از پیشرفت های اخیر در حوزه کدگذاری زمان فضا می پردازیم.

بخش چهارم از طریق مثال های مرتبط به هم درباره ی پردازش سیگنال ، نظریه کدگذاری ، و شبکه بندی ، این که چگونه یک ساختار جبری غنی می تواند باعث افزایش عملکرد سیستم و کاهش پیچیدگی پیاده سازی شود را نشان می دهد.

این مقاله در بخش پنجم با یک خلاصه و بحث راجع به چالش های آینده خاتمه می یابد.

2- پیشینه

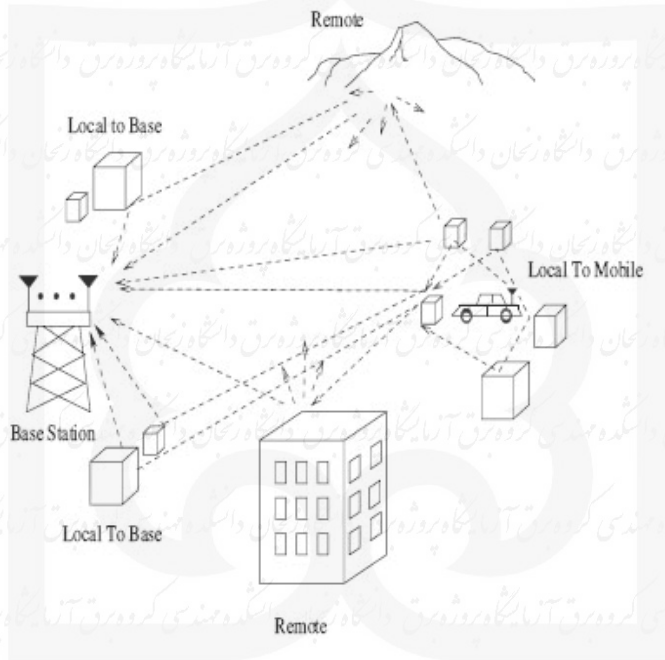
1.2- مدل کانال بی سیم باند پهن

دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان

یک محیط انتشار بی سیم خارجی معمولی در شکل 1.1 نشان داده شده است. در این شکل پایانه بی سیم متحرک با یک نقطه دسترسی بی سیم (ایستگاه پایه) در حال ارتباط است. سیگنالی که از جسم متحرک ارسال شده است ممکن است به طور مستقیم یا از طریق بازتاب های مختلف توسط پراکنده سازهای محلی (ساختمان ، کوه وغیره) به ایستگاه پایه رسیده باشد. در نتیجه ، سیگنال دریافتی حاصل ، از سیگنال هایی با میرایی و تأخیر زمانی متفاوتی تأثیر می پذیرد. آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان

به علاوه تحرک گره ها یا محیط اطراف می تواند باعث نوساناتی تصادفی که متغیر با زمان هستند بشود. بنابراین گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان

یک محیط بی سیم مشترک ممکن است باعث تداخل نامطلوب در سیگنال ارسال شود. ترکیب این عوامل محیط بی سیم را به یک محیط ارتباطی چالش برانگیز تبدیل کرده است.



شکل 1.1 : محیط انتشار رادیویی گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان

برای یک سیگنال ارسال شده $s(t)$ ، سیگنال دریافتی پیوسته در زمان $y_c(t)$ به صورت زیر تعریف می شود:

$$y_c(t) = \int h_c(t; \tau) s(t - \tau) d\tau + z(t) \quad (1.1)$$

دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آرایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان

که در این فرمول $h_c(t; \tau)$ پاسخ کانال متغیر با زمان به ضربه فرستاده شده در زمان $t - \tau$ و $z(t)$ نویز گوسی جمعی است.

برای جمع آوری آمار و ارقام گسسته در زمان کافی، نیاز به نمونه برداری فرمول (1.1) با نرخ بالاتر از نرخ نایکوئیست داریم.

یعنی این که ما با نرخ بالاتر از $2(w_i, w_s)$ ، (1.1) را نمونه برداری می کنیم. w_i پهنای باند ورودی و w_s پهنای باند کانال متغیر با زمان است.

در این مقاله فرض می کنیم که این نرخ نمونه برداری رعایت شده است و بنابراین تمرکز ما بر روی مدل گسسته در زمان آن است.

$$y(k) = y_c(kT_s) = \sum_{l=0}^{\nu} h(k; l)x(k-l) + z(k) \quad (1.2)$$

$x(k)$ و $z(k)$ به ترتیب خروجی، ورودی و نویز در نمونه k ام می باشند. و $h(k; l)$ پاسخ ضربه کانال (CIR) متغیر با زمان نمونه برداری شده با حافظه ν می باشد.

هر کمبودی در مدلسازی کانال، از آنجایی که یک پاسخ ضربه مدت-محدود دارد با انتخاب ν مناسب می تواند کاهش یابد. سه تا از ویژگی های کلیدی کانال های بی سیم متحرک باند پهن زمان انتخابی، فرکانس انتخابی، و فضا انتخابی بودن آن است.

زمان انتخابی بودن کانال از متحرک بودن، فرکانس انتخابی از انتقال باند پهن، و فضا انتخابی از الگوهای تداخل فضایی امواج ناشی می شود. پارامترهای مهم مربوط در توصیف کانال های بی سیم باند پهن متحرک زمان همبستگی، پهنای باند همبستگی، و فاصله همبستگی می باشد.

زمان همبستگی مدت زمانی است که در آن هر تپ پاسخ ضربه کانال را می توان ثابت فرض کرد. که تقریباً برابر عکس فرکانس دوپلر است. اگر دوره تناوب سمبل ها بیشتر از زمان همبستگی کانال باشد آن کانال را زمان انتخابی گویند.

پهنای باند همبستگی دوره فرکانسی است که بر روی آن پاسخ فرکانسی کانال تخت فرض می شود. که تقریباً برابر با عکس گسترش تأخیر کانال است. اگر دوره تناوب سمبل ها کوچکتر از گسترش تأخیر کانال باشد آن

کانال را فرکانس انتخابی می نامند. همچنین فاصله همبستگی ، فاصله فضایی ماکزیمی است که بر روی آن پاسخ کانال ثابت فرض می شود. که به رفتار مسیره‌های ورود امواج رادیویی منعکس شده می تواند مرتبط باشد [55;43]. که اگر فاصله ی بین دو آنتن از فاصله همبستگی بیشتر باشد آن کانال را فضا انتخابی می گویند.

حافظه کانال موجب ایجاد تداخل در بین سمبل های متوالی ارسال شده می شود که باعث کاهش قابل ملاحظه عملکرد می شود. مگر آن که اقدامات تصحیح کننده (شناخته شده به عنوان برابری) صورت پذیرد. در این مقاله از اصطلاحاتی نظیر کانال فرکانس محور ، کانال باند پهن ، و کانال با تداخل درون سمبلی (ISI) بجای هم استفاده خواهیم کرد.

معرفی M_r و M_t به عنوان آنتن های ارسال و دریافت ما را به تعمیم مدل ابتدایی کانال هدایت می کند.

$$y(k) = \sum_{l=0}^{\nu} \mathbf{H}(k; l)x(k-l) + z(k) \quad (1.3)$$

ماتریس $M_t \times M_r$ مختلط $\mathbf{H}(k; l)$ ، l امین تپ از پاسخ ماتریسی کانال را نشان می دهد که در آن ورودی $x \in \mathbb{C}^{M_t}$ و خروجی $y \in \mathbb{C}^{M_r}$ می باشند.

بردار ورودی ممکن است ورودی های مستقل از هم برای بدست آوردن گذردهی بالا (برای مثال از طریق مالتی پلکسینگ فضایی) یا ورودی های وابسته به هم از طریق کدگذاری یا فیلتر کردن برای بدست آوردن اطمینان بالا (ویژگی های فاصله بهتر ، دایورسیتی بالاتر ، شکل بندی طیفی یا مشخصات فضایی مطلوب) داشته باشد. به طور کلی در این مقاله ، ورودی به طور میانگین صفر در نظر گرفته می شود و یک محدودیت توان متوسط را

$$\mathbb{E}[\|x(k)\|^2] \leq p$$

برآورده می کند یعنی :

$z \in \mathbb{C}^{M_r}$ بردار تأثیرات نویز و تداخل را نشان می دهد. که به صورت مستقل از ورودی فرض می شود و با یک بردار گوسی متقارن- چرخشی افزایشی مختلط $z \sim \mathcal{CN}(0, \mathbf{R}_{zz})$ مدل می شود یعنی یک بردار گوسی مختلط با میانگین صفر و کوارینانس \mathbf{R}_{zz} .

در آخر ما مدل کانال باند پایه را برای تطبیق یک بلوک یا قاب از N سمبل متوالی اصلاح خواهیم کرد. در اینجا معادله (1.3) با نماد ماتریسی زیر نشان داده می شود:

$$y = Hx + z \quad (1.4)$$

$$y, z \in \mathbb{C}^{N \cdot M_r} ; \quad x \in \mathbb{C}^{M_t(N+v)} ; \quad H \in \mathbb{C}^{N \cdot M_r \times M_t(N+v)}$$

در هر بلوک ورودی، ما یک دنباله محافظ با طول برابر با حافظه کانال v قرار می دهیم تا تداخل درون بلوکی (IBI) را از بین ببرد. در عمل معمول ترین انتخاب ها برای دنباله محافظ، دنباله تمام صفر (شناخته شده به عنوان چاشنی صفر) و پیشوند حلقوی (CP) می باشد. زمانی که کانال در فرستنده شناخته می شود، افزایش گذردهی از طریق بهینه سازی انتخاب دنباله محافظ ممکن خواهد شد. مدل کانال در (1.4) شامل چندین موارد ویژه شناخته شده است.

اول این که مدل کانال شبه استاتیک با فرض نامتغیر در زمان بودن کانال در طول بلوک ارسالی صورت می پذیرد. در این مورد استفاده از پیشوند حلقوی ماتریس H کانال را به بلوک چرخشی تبدیل می کند و از این رو با استفاده از تبدیل فوریه (FFT) به ماتریس قطری تبدیل می شود.

دوم این که با تنظیم $v=0$ مدل کانال محوشدگی تخت بدست می آید که در این حالت ماتریس کانال H به صورت یک ماتریس قطری بلوکی در می آید.

سوم این که مدل کانال برای ارسال تک آنتنه، دریافت تک آنتنه، یا هر دوی آنها به ترتیب با تنظیم مقادیر M_r, M_t ، یا هر دو برابر 1 به صورت مستقیم بدست می آید.

2.2- دایورسیتی ارسال

دایورسیتی ارسال نسبت به دایورسیتی دریافت از نظر تهیه و تحقق چالش برانگیزتر است. بخاطر این که شامل طراحی سیگنال های همبسته متعدد از یک سیگنال اطلاعات واحد بدون بکارگیری CSI¹ (معمولاً به طور دقیق در فرستنده در دسترس نیست) می باشد.

علاوه بر این، دایورسیتی ارسال باید با تکنیک های پردازش سیگنال مؤثر گیرنده هماهنگ باشد تا بتوان سیگنال اطلاعات مطلوب را از سیگنال دریافتی منحرف و نویز دار استخراج کرد. دایورسیتی ارسال از دایورسیتی

¹ اطلاعات حالت کانال (Channel state information)

دریافت عملی تر است بخاطر بالا بردن مسیر اتصال پایین¹ تا از ویژگی های مصرف توان کم و اندازه کوچک پایانه کاربر محافظت کند.

یک ویژگی مشترک دایورسیتی ارسال و دریافت این است که هر دوی آنها " برگشت های تقلیل رونده² " (یعنی SNR کاهش بهره های SNR در یک خطای داده شده احتمال) را هر چقدر که تعداد آنتن ها بالا رود تجربه می کنند [43]. این امر موجب مؤثر شدن آنها از دیدگاه مصالحه ی کارایی- پیچیدگی برای تعداد کمتری از آنتن ها (معمولاً کمتر از 4 تا) می شود. این امر با بهره های مالتی پلکسینگ فضایی یعنی جایی که نرخ بهره به طور خطی همراه با افزایش آنتن ها افزایش می یابد در تضاد است (هر دو سر مساوی فرض می شوند).

دو دسته اصلی از تکنیک های ارسال چند آنتنه وجود دارد: حلقه بسته و حلقه باز. اولی از یک کانال فیدبک در طراحی سیگنال برای به عقب برگرداندن CSI بدست آمده در گیرنده به فرستنده استفاده می کند در حالی که دومی احتیاجی به CSI ندارد. با فرض CSI ایده آل (یعنی بدون خطا و آنی) در فرستنده تکنیک های حلقه بسته از نظر SNR یک برتری $10 \log_{10}(M_T)$ dB نسبت به تکنیک های حلقه باز بخاطر فاکتور بهره آرایه ای دارند [6].

با این وجود چندین فاکتور عملی عملکرد تکنیک های حلقه بسته را کاهش می دهند که شامل خطاهای تقریب کانال در گیرنده ، خطاهایی در گره فیدبک (بخاطر نویز ، تداخل ، و اثرات تدریجی) ، و تأخیر فیدبک که عدم تطابق بین CSI عملی و ایده آل را پدید می آورند می شود.

تمامی این فاکتورها که با منابع پیچیدگی سیستم و پهنای باند اضافی مورد نیاز گره فیدبک ترکیب شده اند ، تکنیک های حلقه باز را به عنوان یک ابزار بهتر برای بهبود عملکرد مسیر اتصال پایینی برای کاربردهای تحرک - بالا جذاب تر کرده اند در حالی که تکنیک های حلقه بسته (مثل شکل دهی گلبرگ آنتن³) تحت شرایط کم

تحرکی جذاب تر می باشند [32;33].

در این مقاله تمرکز ما منحصرأ بر روی تکنیک های دایورسیتی ارسال حلقه باز ، بخاطر کاربردشان در هر دو رویه ، می باشد.

¹ downlink

² diminishing returns

³ Beam-forming

تکنیکهای حذف تداخل که در قسمت 4.3 توصیف شد در مسیرهای مختلفی می توانند گسترش یابند. با در نظر گرفتن اهمیت شبکه های تک کاره متحرک و کمبود آنها از زیر بنای ثابت و کنترل متمرکز، فرض کاربران به صورت همزمان و بررسی مورد غیر همزمانی جذاب خواهد بود. به علاوه با توجه به علاقه تجاری به سیستم های بی سیم با 4 آنتن ارسالی، بررسی حذف تداخل بر مبنای کد بلوکی زمان فضای هشت گانه و بر مبنای کد چهارگانه غیر خطی توصیف شده در بخش 3.4 دارای اهمیت می باشد.

دیگر مسئله چالش برانگیز بررسی تعامل لایه-مقاطع بین کدگذاری دایورسیتی جاسازی شده و پروتکل درخواست تکرار خودکار (ARQ) لایه اتصال (که در شکلهای انتخابی و هایبرید ظاهر می شود) می باشد. به طور خاص زمانی که دایورسیتی فضایی برای نرخ مبادله می شود اطمینانی که از بین میرود بوسیله دایورسیتی زمانی که از طریق ارسال مجدد ARQ بهره می برد می تواند بازیافت شود. به طور عکس وقتی که نرخ برای دایورسیتی فضایی مبادله می شود مقدار دهی به ارزش رکود کاهش یافته در شرایط مصرف توان، تأخیر، و گذردهی جذاب خواهد بود.

6- تاریخچه

دهه گذشته شاهد پیشرفت های قابل ملاحظه ای در درک و طراحی کدهای زمان فضا بوده است. اساس تئوری اطلاعات کدهای زمان فضا در [63]؛ [27] که بنیان نهادند این که آنتن های متعدد می توانند مخابرات بی سیم را به لوله نرخ بالا تبدیل کند، داده شد. اگرچه مقدمات دایورسیتی فضایی ارسال در [65]؛ [68] پیشنهاد شد، پایه های کدگذاری زمان فضا مدرن در [61]؛ [6] گذاشته شد. از آن به بعد کدهای زمان فضا از طریق طراحی های خطی ([60]؛ [36]؛ [24] و بقیه ارجاعات) و غیر خطی ([25]؛ [50] و بقیه ارجاعات) توسعه داده شدند. در خط دیگری از کار، کدهای زمان فضای غیر منسجم، طراحی آنها، آنالیز و ویژگی های تئوری اطلاعاتی آنها در [39]؛ [73]؛ [40]؛ [38] و بقیه ارجاعات مورد مطالعه قرار گرفت.

مصالحه مالتی پلکسینگ - دایورسیتی ابتدا در [61] در زمینه اندازه ی الفبای ارسالی ثابت بنا نهاده شد. در [74] سوال تئوری اطلاعاتی مطرح و جواب داده شد. از آن به بعد یک تلاشی جدی در طراحی کدهایی که به مصالحه مالتی پلکسینگ - دایورسیتی می رسند صورت گرفت ([70]؛ [26]؛ [62] و ارجاعات را ببینید)

ایده کدهای زمان فضای دایورسیتی جاسازی شده ابتدا در [17] پیشنهاد شد که در آن معیارهای طراحی و برخی از ساختارها داده شده بودند. دایورسیتی جاسازی شده از یک دیدگاه تئوری اطلاعاتی مورد بررسی قرار

گرفت [21]. کارهای زیادی در زمینه تکنولوژی پردازش سیگنال برای کدهای زمان فضا (برای مثال مقاله هایی

درباره این موضوع خاص [5] و بقیه ارجاعات را ببینید) صورت گرفته است. مطالعه گسترده ی توسعه در زمان و

ارتباطات دایورسیتی را در [18] می توان یافت. خیلی از کتاب های درسی اخیر [64] ؛ [34] معرفی برتری

درباره ی ارتباطات بی سیم مدرن دارند.

ضمیمه

ساختار جبری : فرم های درجه دوم

ساده ترین شکل از دایورسیتی ارسال طرح دایورسیتی تأخیری است که بوسیله [68] برای دو آنتن ارسالی

پیشنهاد شد ، جایی که یک سیگنال از آنتن دوم ارسال می شود ، سپس یک بازه زمانی تأخیر داده می شود و

از آنتن اول ارسال می شود. طراحیهای متعامد [60] یک گروه از کدهای زمان فضای بلوکی هستند که به

دایورسیتی بیشینه با پیچیدگی رمزگشایی که در اندازه منظومه خطی است دست می یابند. معروف ترین مثال

بوسیله الموتی طراحی شد که با یک ماتریس 2×2 که ستون ها بازه زمانی متفاوت و سطرها آنتن های

مختلف را نشان می دهند و ورودی ها سمبل های ارسالی هستند ، توصیف می شود. قانون رمزگذاری به صورت

زیر است:

$$[c_1 \quad c_2] \rightarrow \begin{bmatrix} c_1 & c_2 \\ -c_2^* & c_1^* \end{bmatrix}$$

با فرض یک کانال محوشدگی تخت شبه استاتیک سیگنال های r_1 و r_2 دریافت شده بر روی دو بازه زمانی r_1 و r_2

متوالی در زیر داده شده اند:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ -r_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ -h_2^* & h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ -c_2^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ -w_2^* \end{bmatrix}$$

که در آن h_1 و h_2 بهره های مسیر از دو آنتن ارسالی به متحرک هستند و نمونه های نویز w_1 و w_2 نمونه های مستقلی از متغیر تصادفی گوسی مختلط با میانگین صفر با انرژی نویز N_0 در ابعاد مختلط می باشند. بنابراین $r = HC + w$ که در آن H ماتریس متعامد می باشد. دلیل علاقه گسترده تجاری به کد الموتی این است که هر دو آشکارسازی منسجم و غیر منسجم به طور قابل ملاحظه ای ساده هستند. اگر بهره های مسیر در متحرک شناخته شوند (به طور معمول با قرار دادن تن های راهنما در قاب داده برای تخمین کانال مقداری نرخ قربانی می شود)، آن گاه گیرنده قادر به تشکیل معادله زیر خواهد بود.

$$H^*r = \|h\|^2 c + w$$

عبارت نویز جدید w هنوز سفید است به طوری که C_1 و C_2 می توانند به صورت مجزا رمزگشایی شوند تا مشترکاً که خیلی پیچیده تر است.

اعداد صحیح مثبتی را به u_0, u_1, \dots, u_{s-1} اختصاص می دهیم و مجهولات x_0, x_1, \dots, x_{s-1} هستند که باید محاسبه شوند. یک طراحی متعامد حقیقی نوع $(u_0, u_1, \dots, u_{s-1})$ و اندازه N یک ماتریس $N \times N$ است با ورودی های 0 و $\pm x_0, \pm x_1, \dots, \pm x_{s-1}$ که رابطه زیر را برآورده می کنند:

$$xx^T = \left(\sum_{j=0}^{s-1} u_j x_j^2 \right) I_N$$

S مجهول و N بازه زمانی وجود دارد، بنابراین نرخ طراحی متعامد برابر است با S/N .

$N=2$: یک طراحی متعامد حقیقی نوع $(1,1)$ و اندازه $N=2$ مربوط می شود به نمایش اعداد مختلط C به عنوان یک جبر ماتریسی 2×2 بر روی اعداد حقیقی R . عدد مختلط $x_0 + ix_1$ مربوط به ماتریس $\begin{bmatrix} x_0 & x_1 \\ -x_1 & x_0 \end{bmatrix}$ می شود.

$N=4$: یک طراحی متعامد حقیقی نوع $(1,1,1,1)$ و اندازه $N=4$ مربوط به نمایش چهارگانه Q به عنوان یک جبر ماتریسی بر روی اعداد حقیقی R می باشد. چهارگانه $x_0 + ix_1 + jx_2 + kx_3$ مربوط به ماتریس زیر می باشد:

$$\begin{bmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & x_3 \\ -x_1 & x_0 & -x_3 & x_2 \\ -x_2 & x_3 & -x_0 & x_1 \\ -x_3 & -x_2 & x_1 & x_0 \end{bmatrix}$$

$$= x_0 I_4 + x_1 \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} + x_2 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$+ x_3 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$N=8$: یک طراحی متعامد حقیقی نوع $(1, 1, \dots, 1)$ و اندازه $N=8$ مربوط به نمایش هشت گانه ها یا اعداد

کایلی¹ به عنوان یک جبر 8 بعدی بر روی اعداد حقیقی \mathbf{R} می شود. این جبر همانطوری که غیر مبادله ای است ، غیرمشارکتی نیز می باشد.

یک طراحی متعامد مختلط با اندازه N و نوع $(u_0, u_1, \dots, u_{s-1}; v_1, v_2, \dots, v_t)$ یک ماتریس $\mathbf{Z} = \mathbf{X} + i\mathbf{Y}$ می باشد که در آن \mathbf{X} و \mathbf{Y} به ترتیب طراحی متعامد حقیقی نوع $(u_0, u_1, \dots, u_{s-1})$ و (v_1, v_2, \dots, v_t) هستند و در آن:

$$\mathbf{Z}\mathbf{Z}^* = \left(\left(\sum_{j=0}^{s-1} u_j x_j^2 \right) + \left(\sum_{j=1}^t v_j y_j^2 \right) \right) \mathbf{I}_N$$

$$\mathbf{Z}\mathbf{Z}^* = (\mathbf{X} + i\mathbf{Y})(\mathbf{X}^T - i\mathbf{Y}^T) = (\mathbf{X}\mathbf{X}^T + \mathbf{Y}\mathbf{Y}^T) + i(\mathbf{Y}\mathbf{X}^T - \mathbf{X}\mathbf{Y}^T)$$

$\mathbf{Z}\mathbf{Z}^*$ جفت موافق نامیده می شوند [31]. توجه کنید که اگر $t = s$ آن گاه ورودی های $\mathbf{X} + i\mathbf{Y}$ ترکیب خطی از مجهولات مختلط $z_k = x_k + iy_k$ و مزدوج آن $z_k^* = x_k - iy_k$ می باشد. در واقع تعریف طراحی متعامد

¹ Cayley

مختلط در شرایط حضور این مجهولات داده شده است [60]. نرخ طراحی متعامد مختلط برابر است با $(s+t) / 2N$.

یک طراحی مختلط از اندازه N با $t = s + 1$ ، یک طراحی متعامد حقیقی با اندازه $2N$ را از طریق جانشینی اسکله مندی زیر معین می کند:

$$x_0 + ix_1 \rightarrow \begin{bmatrix} x_0 & x_1 \\ -x_1 & x_0 \end{bmatrix}$$

$N=2$: این یک کد زمان فضای بلوکی الموتی است و ممکن است چهارگانه ها را به عنوان جفت های اعداد مختلط ببینیم، که در آن حاصلضرب چهارگانه های (a, b) و (c, d) بوسیله $(ac - bd^*, ad + bc^*)$ بدست می آید. این ها چهارگانه های دوتایی همیلتون¹ هستند. و اگرما جفت (a, b) را با ماتریس 2×2 مختلط $\begin{bmatrix} a & b \\ -b^* & a^* \end{bmatrix}$ مرتبط کنیم، آن گاه خواهیم دید که قانون ضرب چهارگانه های دوتایی با قانون ضرب ماتریسی با هم روی می دهد.

$N=4$: کد زمان فضای الموتی، طراحی متعامد حقیقی 4×4 با نرخ حداکثر را از طریق جانشینی بالا نشان می دهد. با این وجود طراحی متعامد حقیقی 8×8 با نرخ حداکثر را از یک طرح مختلط 4×4 نمی توان بدست آورد.

نمایش هشت گانه ها به عنوان چهارتایی های اعداد مختلط، یک مثالی از یک طراحی مختلط افزایشی را فراهم می کنند. حاصلضرب $c = ab$ از هشت گانه های $a = (a_0, a_1, a_2, a_3)$ و $b = (b_0, b_1, a_2, 0)$ داده شده است:

$$c_0 = a_0 b_0 - b_1^* a_1 - b_2^* a_2 - a_3^* b_3$$

$$c_1 = b_1 a_0 + a_1 b_0^* - a_3 b_2^* + b_3 a_2^*$$

$$c_2 = b_2 a_0 - a_1^* b_3 + a_2 b_0^* + b_1^* a_3$$

این نشان می دهد که حاصلضرب راست یک هشت گانه \mathbf{a} بوسیله هشت تایی شکل $\mathbf{b} = (b_0, b_1, a_2, 0)$ می تواند به عنوان $\mathbf{ab} = \mathbf{aR}(b_0, b_1, b_2, 0)$ نشان داده می شود که در آن:

$$R(b_0, b_1, b_2, 0) = \begin{bmatrix} b_0 & b_1 & b_2 & 0 \\ -b_1^* & b_0^* & 0 & b_2 \\ -b_2^* & 0 & b_0^* & -b_1 \\ 0 & -b_2^* & b_1^* & b_0 \end{bmatrix} \quad (A.1)$$

ستون های این ماتریس متعامد هستند؛ از این رو $R(b_0, b_1, a_2, 0)$ یک طراحی متعامد مختلط با نرخ $\frac{3}{4}$ است.

با در نظر گرفتن t به صورت متقارن، یعنی ماتریسهای متعامد ضد تبدیل با اندازه N ، $\rho_t(N) - 1$ تعداد متقارن-مورب را مشخص می کند، یعنی ماتریسهای متعامد ضد تبدیل با اندازه N که با مجموعه اولیه ماتریسهای t ضد تبدیل می شوند. به دو قضیه زیر توجه کنید [12;69]:

قضیه A.1: یک جفت موافق \mathbf{X}, \mathbf{Y} از طراحی های متعامد حقیقی با اندازه N وجود دارد که در آن نوع $(1, \dots, 1)$ بر روی متغیرهای x_0, x_1, \dots, x_{s-1} و \mathbf{Y} نوع $(1, \dots, 1)$ بر روی متغیرهای y_1, y_2, \dots, y_t می باشد اگر و تنها اگر $s \leq \rho_t(N) - 1$ باشد.

قضیه A.2: اگر \mathbf{X}, \mathbf{Y} یک جفت موافق از طراحی های متعامد حقیقی با اندازه $N = 2^h N_0$ باشند که در آن N_0 فرد است آن گاه تعداد کل متغیرهای حقیقی در \mathbf{X} و \mathbf{Y} حداکثر برابر $2h + 2$ است و این محدوده با طراحی های \mathbf{X}, \mathbf{Y} که هر کدام شامل $h + 1$ متغیر هستند بدست می آید.

در واقع گروهی از ماتریس های پاولی¹ که در ساختار کدهای تصحیح کننده خطای کوانتومی ظاهر می شوند، می توانند برای ساخت جفت های \mathbf{X}, \mathbf{Y} که ورودی های \mathbf{X} برابر با $0, \pm x_0, \dots, \pm x_{s-1}$ و ورودی های \mathbf{Y} برابر $0, \pm y_1, \dots, \pm y_t$ است استفاده شوند [9].

مراجع

[۱] Al-Dhahir, N., A.R. Calderbank, S.N. Diggavi. Space-time Coding for Wireless Communication : Principles and Applications

[۲] Al-Dhahir, N. (۲۰۰۱). Single-Carrier Frequency-Domain Equalization for Space-Time Block-Coded Transmissions over Frequency-Selective Fading Channels. IEEE Communications Letters, pages ۳۰۴-۳۰۶.

[۳] Al-Dhahir, N. (۲۰۰۲). Overview and Comparison of Equalization Schemes for Space-Time-Coded Signals with Application to EDGE. IEEE Transactions on Signal Processing, pages ۲۴۷۷-۲۴۸۸.

[۴] Al-Dhahir, N., Fragouli, C., Stamoulis, A., Younis, Y., and Calderbank, A.R. (۲۰۰۲a). Space-Time Processing for Broadband Wireless Access. IEEE Communications Magazine, pages ۱۳۶-۱۴۲.

[۵] Al-Dhahir, N., Giannakis, G., Hochwald, B., Hughes, B., and Marzetta, T (۲۰۰۲b). Editors, Special Issue of IEEE Transactions on Signal Processing on Space-Time Coding.

[۶] Alamouti, S. (۱۹۹۸a). A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, pages ۱۴۵۱-۱۴۵۸.

[۷] Balakrishnan, Hari, Padmanabhan, Venkata N., Seshan, Srinivasan, and Katz, Randy H. (۱۹۹۷). A comparison of mechanisms for improving TCP performance over wireless links. IEEE/ACM Transactions on Networking, ۵(۶):۷۵۶-۷۶۹.

[۸] Calderbank, A R., Diggavi, S N., and Al-Dhahir, N. (۲۰۰۴). Space-time signaling based on kerdock and delarte-goethals codes. In Proc. ICC, pages ۴۸۳-۴۸۷.

[۹] Calderbank, A. R. and Naguib, A. F. (۲۰۰۱). Orthogonal designs and third generation wireless communication. In Hirschfeld, J. W. P., editor, Surveys in

Combinatorics ۲۰۰۱, London Mathematical Society Lecture Note Series #۲۸۸, pages ۷۵-۱۰۷. Cambridge Univ. Press.

[۱۰] Calderbank, A.R., Das, S., Al-Dhahir, N., and Diggavi, S. (۲۰۰۵). Construction and Analysis of a New Quaternionic Space-Time Code for ξ Transmit Antennas. *Communication in Information and Systems*, ۵(۱):۹۷-۱۲۱.

[۱۱] Chu, D. (۱۹۷۲). Polyphase Codes with Good Periodic Correlation Properties. *IEEE Transactions on Information Theory*, IT-۱۸:۵۳۱-۵۳۲.

[۱۲] Clifford, W.K. (۱۸۷۸). Applications of Grassman's Extensive Algebra. *American J. Math.*, ۱:۳۵۰-۳۵۸.

[۱۳] Damen, M O., Abed-Meraim, K., and Belfiore, J.-C. (۲۰۰۲). Diagonal algebraic space-time block codes. *IEEE Transactions on Information Theory*, ۴۸(۳):۶۲۸-۶۳۶.

[۱۴] Damen, M O., Chkeif, A., and Belfiore, J.-C. (۲۰۰۰). Lattice codes decoder for space-time codes. *IEEE Communication Letters*, ۴:۱۶۱-۱۶۳.

[۱۵] Diggavi, S., Al-Dhahir, N., Stamoulis, A., and Calderbank, A.R. (۲۰۰۲). Differential Space-Time Coding for Frequency-Selective Channels. *IEEE Communications Letters*, pages ۲۵۳-۲۵۵.

[۱۶] Diggavi, S. N., Al-Dhahir, N., and Calderbank, A. R. (۲۰۰۳a). Diversity embedded space-time codes. In *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages ۱۹۰۹-۱۹۱۴.

[۱۷] Diggavi, S. N., Al-Dhahir, N., and Calderbank, A. R. (۲۰۰۴a). Diversity embedding in multiple antenna communications. In Gupta, P., Kramer, G., and van Wijngaarden, A J., editors, *Network Information Theory*, pages ۲۸۵-۳۰۲. AMS volume ۶۶, Series on Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science. Appeared as a part of DIMACS workshop on Network Information Theory, March ۲۰۰۳.

[۱۸] Diggavi, S N., Al-Dhahir, N., Stamoulis, A., and Calderbank, A R. (۲۰۰۴b). Great expectations: The value of spatial diversity to wireless networks. *Proceedings IEEE*, ۹۲:۲۱۷-۲۷۰.

[۱۹] Diggavi, S. N., Dusad, S., Calderbank, A R., and Al-Dhahir, N. (۲۰۰۵). On embedded diversity codes. In *Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*.

[۲۰] Diggavi, S. N. and Tse, D N C. (۲۰۰۴). On successive refinement of diversity. In *Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*.

[۲۱] Diggavi, S. N. and Tse, D N C. (۲۰۰۵). Fundamental limits of diversity embedded codes over fading channels. In *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, pages ۵۱۰-۵۱۴.

[۲۲] Diggavi, S.N., Al-Dhahir, N., and Calderbank, A.R. (۲۰۰۳b). Algebraic Properties of Space-Time Block Codes in Intersymbol Interference Multiple Access Channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, pages ۲۴۰۳{۲۴۱۴}.

- [۲۳] El-Gamal, H., Caire, G., and Damen, O. (۲۰۰۴). Lattice coding and decoding achieve the optimal diversity-multiplexing of MIMO channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, ۵۰(۶):۹۶۸-۹۸۵.
- [۲۴] El-Gamal, H. and Damen, O. (۲۰۰۳). Universal space-time coding. *IEEE Transactions on Information Theory*, ۴۹(۵):۱۰۹۷-۱۱۱۹.
- [۲۵] El-Gamal, H. and Hammons, A.R. (۲۰۰۱). A New Approach to Layered Space-Time Coding and Signal Processing. *IEEE Transactions on Information Theory*, pages ۲۳۲۱-۲۳۳۴.
- [۲۶] Elia, P., Kumar, K R., Pawar, S A., Kumar, P V., and Lu, H-F. Explicit minimum-delay space-time codes achieving the diversity-multiplexing gain tradeoff. Submitted September ۲۰۰۴.
- [۲۷] Foschini, G.J. (۱۹۹۶). Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. *Bell Labs Technical Journal*, ۱(۲):۴۱-۵۹.
- [۲۸] Fragouli, C., Al-Dhahir, N., and Turin, W. (۲۰۰۲). Effect of Spatio-Temporal Channel Correlation on the Performance of Space-Time Codes. In *ICC*, volume ۲, pages ۸۲۶-۸۳۰.
- [۲۹] Fragouli, C., Al-Dhahir, N., and Turin, W. (۲۰۰۳). Training-Based Channel Estimation for Multiple-Antenna Broadband Transmissions. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, pages ۳۸۴-۳۹۱.
- [۳۰] Gallager, R G. (۱۹۶۳). *Low density parity check codes*. MIT Press, Cambridge, Mass.
- [۳۱] Geramita, A.V. and Seberry, J. (۱۹۷۹). *Orthogonal Designs, Quadratic Forms and Hadamard Matrices*. *Lecture Notes in Pure and Applied Mathematics*, volume ۴۳. Marcel Dekker.
- [۳۲] Godara, L. (۱۹۹۷a). Applications of Antenna Arrays to Mobile Communications. Part I. Performance Improvement, Feasibility, and System Considerations. *Proceedings of the IEEE*, ۸۵:۱۰۳۱-۱۰۶۰.
- [۳۳] Godara, L. (۱۹۹۷b). Applications of Antenna Arrays to Mobile Communications. Part II. Beamforming and Direction-of-Arrival Considerations. *Proceedings of the IEEE*, ۸۵:۱۱۹۵-۱۲۴۵.
- [۳۴] Goldsmith, A. (۲۰۰۵). *Wireless Communications*. Cambridge University Press.
- [۳۵] Guey, Jiann-Ching, Fitz, Michael P., Bell, Mark R., and Kuo, Wen-Yi (۱۹۹۹). Signal design for transmitter diversity wireless communication systems over Rayleigh fading channels. *IEEE Transactions on Communications*, ۴۷(۴):۵۲۷-۵۳۷.
- [۳۶] Hassibi, B. and Hochwald, B. (۲۰۰۲). High-Rate Codes That Are Linear in Space and Time. *IEEE Transactions on Information Theory*, pages ۱۸۰۴-۱۸۲۴.
- [۳۷] Haykin, S. (۱۹۹۱). *Adaptive Filter Theory*. Prentice Hall. ۲nd Edition.

- [۳۸] Hochwald, B. and Sweldens, W. (۲۰۰۰). Differential unitary space-time modulation. IEEE Trans. Comm., pages ۲۰۴۱-۲۰۵۲.
- [۳۹] Hochwald, B M. and Marzetta, T L. (۱۹۹۹). Capacity of a mobile multiple-antenna communication link in Rayleigh at fading. IEEE Transactions on Information Theory, ۴۵(۱):۱۳۹-۱۵۷.
- [۴۰] Hughes, B. L. (۲۰۰۰). Differential Space-Time Modulation. IEEE Transactions on Information Theory, ۴۶(۷):۲۵۶۷-۲۵۷۸.
- [۴۱] Jafarkhani, H. (۲۰۰۱). A Quasi-Orthogonal Space-Time Block Code. IEEE Communications Letters, pages ۱-۴.
- [۴۲] Jafarkhani, H. and Tarokh, V. (۲۰۰۱). Multiple transmit antenna differential detection from generalized orthogonal designs. IEEE Trans. on Information Theory, ۴۷(۶):۲۶۲۶-۲۶۳۱.
- [۴۳] Jakes, W.C. (۱۹۷۴). Microwave Mobile Communications. IEEE Press.
- [۴۴] Komminakis, C., Fragouli, C., Sayed, A., and Wesel, R. (۲۰۰۲). Multi-input multi-output fading channel tracking and equalization using Kalman estimation. IEEE Transactions on Signal Processing, ۵۰(۵):۱۰۶۵-۱۰۷۶.
- [۴۵] Lindskog, E. and Paulraj, A. (۲۰۰۰). A Transmit Diversity Scheme for Delay Spread Channels. In International Conference on Communications (ICC), pages ۳۰۷-۳۱۱.
- [۴۶] Liu, Youjian, Fitz, M P., and Takeshita, O Y. (۲۰۰۱b). Full rate space-time turbo codes. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, ۱۹(۵):۹۶۹-۹۸۰.
- [۴۷] Liu, Z., Giannakis, G., Scaglione, A., and Barbarossa, S. (۱۹۹۹). Decoding and Equalization of Unknown Multipath Channels Based on Block Precoding and Transmit-Antenna Diversity. In Asilomar Conf on Signals, Systems, and Computers, pages ۱۵۵۷-۱۵۶۱.
- [۴۸] Lu, B., Wang, Xiaodong, and Narayanan, K.R. (۲۰۰۲). LDPC-based space-time coded OFDM systems over correlated fading channels: Performance analysis and receiver design. IEEE Trans. on Communications, ۵۰(۱):۷۴-۸۸.
- [۴۹] Lu, H F. and Kumar, P V. (۲۰۰۳). Rate-diversity trade-off if space-time codes with fixed alphabet and optimal constructions for PSK modulation. IEEE Transactions on Information Theory, ۴۹(۱۰):۲۷۴۷-۲۷۵۲.
- [۵۰] Lu, H F. and Kumar, P V. (۲۰۰۵a). A unified construction of space-time codes with optimal rate-diversity tradeoff. IEEE Transactions on Information Theory, ۵۱(۵):۱۷۰۹-۱۷۳۰.
- [۵۱] Lu, H.F. and Kumar, P.V. (۲۰۰۵b). A Unified Construction of Space-Time Codes with Optimal Rate-Diversity Tradeo_. IEEE Trans. on Information Theory, ۵۱(۵):۱۷۰۹-۱۷۳۰.

- [۵۲] Naguib, A., Tarokh, V., Seshadri, N., and Calderbank, A.R. (۱۹۹۸). A Space-Time Coding Modem for High-Data-Rate Wireless Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, pages ۱۴۵۹-۱۴۷۷.
- [۵۳] Ozarow, L H., Shamai, S, and Wyner, A. D. (۱۹۹۴). Information theoretic considerations for cellular mobile radio. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, ۴۳(۲):۳۵۹-۳۷۸.
- [۵۴] Parkvall, S., Karlsson, M., Samuelsson, M., Hedlund, L., and Goransson, B. (۲۰۰۰). Transmit Diversity in WCDMA : Link and System Level Results. In *Vehicular Technology Conference*, pages ۸۶۴-۸۶۸.
- [۵۵] Rappaport, T. (۱۹۹۶). *Wireless Communications*. IEEE Press.
- [۵۶] Sari, H., Karam, G., and Jeanclaude, I. (۱۹۹۵). Transmission Techniques for Digital Terrestrial TV Broadcasting. *IEEE Communications Magazine*, pages ۱۰۰-۱۰۹.
- [۵۷] Seshadri, N. and Winters, J. (۱۹۹۳). Two Signaling Schemes for Improving the Error Performance of Frequency-Division-Duplex (FDD) Transmission Systems Using Transmitter Antenna Diversity. In *Vehicular Technology Conference (VTC)*, pages ۵۰۸-۵۱۱.
- [۵۸] Siwamogsatham, S., Fitz, M.P., and Grimm, J.H. (۲۰۰۲). A new view of performance analysis of transmit diversity schemes in correlated Rayleigh fading . *IEEE Transactions on Information Theory*, ۴۸(۴):۹۵۰-۹۵۶.
- [۵۹] Stamoulis, A. and Al-Dhahir, N. (۲۰۰۳). Impact of Space-Time Block Codes on $\lambda \cdot \mu$ Throughput. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, pages ۱۰۲۹-۱۰۳۹.
- [۶۰] Tarokh, V., Jafarkhani, H., and Calderbank, A.R. (۱۹۹۹a). Space-Time Block Codes from Orthogonal Designs. *IEEE Transactions on Information Theory*, pages ۱۴۵۶- ۱۴۶۷.
- [۶۱] Tarokh, V., Seshadri, N., and Calderbank, A.R. (۱۹۹۸a). Space-Time Codes for High Data Rate Wireless Communications : Performance Criterion and Code Construction. *IEEE Transactions on Information Theory*, pages ۷۴۴-۷۶۵.
- [۶۲] Tavildar, S. and Viswanath, P. (۲۰۰۶). Approximately universal codes over slow fading channels.
- [۶۳] Telatar, I. (۱۹۹۹). Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels. *European Transactions on Telecommunications*, pages ۵۸۵-۵۹۵.
- [۶۴] Tse, D N C. and Viswanath, P. (۲۰۰۵). *Fundamentals of wireless communication*. Cambridge University Press.
- [۶۵] Uddenfeldt, J. and Raith, A. (۱۹۹۲). Cellular Digital Mobile Radio System and Method of Transmitting Information in a Digital Cellular Mobile Radio System. US Patent no. ۵,۰۸۸,۱۰۸.

- [۶۶] Uysal, M., Al-Dhahir, N., and Georghiades, C. N. (۲۰۰۱). A space-time block-coded OFDM scheme for unknown frequency-selective fading channels. *IEEE Communications Letters*, ۵(۱۰):۳۹۳-۳۹۵.
- [۶۷] Vaughan-Nichols, S. (۲۰۰۴). Achieving Wireless Broadband with WiMAX. *IEEE Computer Magazine*, pages ۱۰-۱۳.
- [۶۸] Wittneben, A. (۱۹۹۳). A New Bandwidth Efficient Transmit Antenna Modulation Diversity Scheme for Linear Digital Modulation. In *ICC*, pages ۱۶۳۰-۱۶۳۴.
- [۶۹] Wolfe, W. (۱۹۷۶). Amicable orthogonal designs - Existence. *Canadian J. Math.*, ۲۸:۱۰۰۶-۱۰۲۰.
- [۷۰] Yao, H. and Wornell, G. (۲۰۰۳). Achieving the full MIMO diversity-multiplexing frontier with rotation based space-time codes. In *Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*.
- [۷۱] Younis, W., Sayed, A., and Al-Dhahir, N. (۲۰۰۳). Efficient Adaptive Receivers for Joint Equalization and Interference Cancellation in Multi-User Space-Time Block-Coded Systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, pages ۲۸۴۹-۲۸۶۲.
- [۷۲] Zheng, L. and Tse, D. (۲۰۰۲a). Diversity and Multiplexing: A Fundamental Tradeoff in Multiple Antenna Channels. *IEEE Transactions on Information Theory*.
- [۷۳] Zheng, Lizhong and Tse, D N C. (۲۰۰۲b). Communication on the Grassmann manifold: a geometric approach to the noncoherent multiple-antenna channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, ۴۸(۲):۳۰۹-۳۸۳.
- [۷۴] Zheng, Lizhong and Tse, D N C. (۲۰۰۳). Diversity and multiplexing: A fundamental tradeoff in multiple antenna channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, ۴۹.
- [۷۵] Zhou, A. and Giannakis, G B. (۲۰۰۱). Space-time coding with maximum diversity gains over frequency-selective fading channels. *IEEE Signal Processing Letters*, ۸(۱۰):۲۶۹-۲۷۲.