

طراحی کدهای بهینه ترلیس فضا-زمان

مهرداد نادری^۱

غلامرضا نورمحمد نصرآبادی^۲

چکیده

برای دستیابی به سرعت‌های بالای انتقال داده و اطمینان از صحت عملکرد سامانه های انتقال، در سامانه های نسل جدید از کدبندی‌های فضا-زمان استفاده فراوانی می‌شود. کدهای ترلیس فضا-زمان یکی از انواع کدهای فضا-زمان است که علاوه بر بهره دایورسیتی کامل، بهره کدینگ (برخلاف کدهای بلوکی فضا-زمان) را نیز به‌طور همزمان بدنبال دارند. در این مقاله با توجه به آنالیز عملکرد کدهای ترلیس فضا-زمان و نتایج شبیه‌سازی‌ها پارامترهای موثر در طراحی بهینه کدهای ترلیس فضا-زمان را ارائه خواهیم نمود.

کلید واژه

بهره کدینگ، کدهای ترلیس فضا-زمان، معیار عملکرد کد، معیار مرتبه و دترمینان، معیار رد ماتریس.

۱. دانشگاه صنعتی مالک اشتر mehrdad.naderi@gmail.com

۲. دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ دریافت: ۸۹/۴/۲۷ تاریخ پذیرش: ۸۹/۷/۶

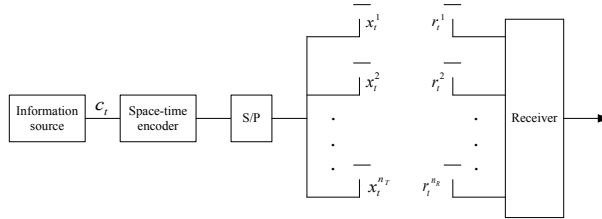
مقدمه

استفاده از کدینگ فضا-زمان^۱ یک روش مؤثر در دستیابی به کانال‌های بی‌سیم MIMO^۲ می‌باشد. در این روش با کدبندی درحوزه‌های زمان و مکان، به همبستگی بین سیگنال‌های چندین آنتن فرستنده در یک زمان خواهیم رسید. با بهره‌گیری از این همبستگی در فضا-زمان می‌توان بر تأثیر سوء فیدینگ کانال MIMO غلبه و همچنین خطای کانال انتقال در گیرنده را به حداقل می‌رساند. کدینگ فضا-زمان با به کارگیری آرایه‌های فضایی و سامانه‌های غیرکدشده بدون تلف کردن پهنای باند (برخلاف کدینگ کانال معمولی)، بهره کدینگ^۳ و همچنین بهره دایورسیتی^۴ را نتیجه می‌دهد. برخلاف سایر دایورسیتی‌ها، دایورسیتی در فضا (مکانی) عملکرد پهنای باند و در نتیجه ظرفیت کانال را افزایش می‌دهد. یک نمونه از دایورسیتی ارسال، که اخیراً استفاده فراوانی پیدا نموده کدینگ فضا-زمان است که بر پایه ارسال از طریق آنتن‌های چندگانه (دایورسیتی در فضا) و پردازش سیگنال مناسب درگیرنده برای حصول دایورسیتی و بهره کدینگ عمل می‌کند. کدینگ فضا-زمان به عنوان استاندارد نسل سوم مخابرات سیار پذیرفته شده است [۱] و کاربردهای فراوانی در مخابرات سیار دارد. کدهای ترلیس فضا-زمان^۵ بهره کدینگ و بهره دایورسیتی کاملی را بطور همزمان خواهند داشت. مهمترین مزیت این نوع کدها نسبت به کدهای بلوکی فضا-زمان^۶ بهره کدینگ آنها می‌باشد. عیب اصلی کدهای ترلیس فضا-زمان، طراحی مشکل آنها و پیاده سازی انکدر و دیکدرهای بسیار پیچیده است. در مقایسه با کدهای بلوکی تک آنتنه در کانال‌های AWGN، کدهای بلوکی فضا-زمان بهره کدینگ ندارند، مگر اینکه به یک کد کننده خارجی^۷ مجهز شوند. مهمترین مزیت کدهای بلوکی فضا-زمان دستیابی به دایورسیتی کامل با استفاده از یک طرح ساده کدگشایی می‌باشد. در کل برای دستیابی نسبی به کلیه مزیت‌ها از کدهای ترلیس ترکیبی و کدهای بلوکی بعنوان یک ایده عملی می‌توان استفاده کرد. همچنین بهره کدینگ ترکیبی فضا-زمان با سایر فنون کدینگ نظیر توربوکدها^۸ و فنون دیکدینگ بازگشتی^۹ قابل افزایش می‌باشد.

-
1. Space Time Coding
 2. Multi input Multi Output
 3. Coding Gain
 4. Diversity Gain
 5. Space Time Trellis Coding
 6. Space Time Block Coding
 7. Outer Encoder
 8. Turbo Codes
 9. Recursive Decoding

آنالیز عملکرد کدهای فضا-زمان

یک سامانه با مدولاسیون کد فضا-زمان با n_T آنتن در فرستنده و n_R آنتن درگیرنده توسط شکل ۱ نشان داده شده است. در آنالیز عملکرد، فرض می‌کنیم که طول فریم دیتای ارسال شده، L سمبل برای هر آنتن فرستنده باشد.



شکل ۱: یک مدل سامانه باند پایه فضا-زمان

یک ماتریس کلمه کد فضا-زمان با ابعاد $n_T \times L$ با مرتب کردن دنباله‌های ارسال شده در یک آرایه سطری به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_L] \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_L^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_L^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^{n_T} & x_2^{n_T} & \dots & x_L^{n_T} \end{bmatrix} \quad (1)$$

بطوریکه سطر i ام، $X^i = [x_1^i, x_2^i, \dots, x_L^i]$ دنباله دیتا ارسال شده از آنتن فرستنده i ام می‌باشد، و ستون t ام، سمبل فضا-زمان ارسال شده در لحظه t می‌باشد.

احتمال خطا دوتایی $P(X, \hat{X})$ ، احتمالی است که دیکدر هنگام تخمین، یک دنباله نادرست $\hat{X} = (\hat{X}_1, \hat{X}_2, \dots, \hat{X}_L)$ را به دلیل خطا به جای دنباله واقعی و درست $X = (x_1, x_2, \dots, x_L)$ انتخاب کند. در دیکدینگ به کمک الگوریتم بیشترین شباهت (ML₂)، این خطا وقتی رخ می‌دهد که [9]

$$\sum_{t=1}^L \sum_{j=1}^{n_R} \left| r_t^j - \sum_{i=1}^{n_T} h_{j,i}^t x_t^i \right|^2 \geq \sum_{t=1}^L \sum_{j=1}^{n_R} \left| r_t^j - \sum_{i=1}^{n_T} h_{j,i}^t \hat{x}_t^i \right|^2 \quad (2)$$

1. Pairwise Error Probability
2. Maximum Likelihood

از سوی دیگر در کانال‌های فیدینگ، ضرایب فیدینگ در هر فریم ثابت می‌باشند. ماتریس اختلاف کلمه کد^۱ بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$B(X, \hat{X}) = X - \hat{X} \quad (3)$$

$$= \begin{bmatrix} x_1^1 - \hat{x}_1^1 & x_2^1 - \hat{x}_2^1 & \cdots & x_L^1 - \hat{x}_L^1 \\ x_1^2 - \hat{x}_1^2 & x_2^2 - \hat{x}_2^2 & \cdots & x_L^2 - \hat{x}_L^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^{n_T} - \hat{x}_1^{n_T} & x_2^{n_T} - \hat{x}_2^{n_T} & \cdots & x_L^{n_T} - \hat{x}_L^{n_T} \end{bmatrix}$$

می‌توان یک ماتریس مسافت کلمه کد با ابعاد $n_T \times n_R$ را به صورت زیر تعریف کرد [۹]:

$$A(X, \hat{X}) = B(X, \hat{X}) \cdot B^H(X, \hat{X}) \quad (4)$$

روشن است که $A(X, \hat{X})$ یک ماتریس هرمیتین معین غیر منفی است به طوریکه $A(X, \hat{X}) = A^H(X, \hat{X})$ و مقادیر ویژه ماتریس $A(X, \hat{X})$ به نام λ_i ها اعداد حقیقی غیر منفی می‌باشند [9].

با آنالیز عملکرد کدهای فضا-زمان و احتمال خطا در کانال‌های فیدینگ کند می‌توان با فرض دانستن CSI کامل در گیرنده معیار کارایی کدهای فضا-زمان در کانال‌های فیدینگ رایلی را بصورت زیر تشریح کرد [2].

معیار مرتبه و دترمینان

وقتی بهره دایورسیتی n_R کوچک باشد (وقتی که $n_R < 4$ که r مرتبه ماتریس $A(X, \hat{X})$ می‌باشد) معیار مرتبه و دترمینان، کارایی را مشخص می‌کند [3]. در این حالت محدوده خطای دوتایی توسط نامساوی زیر بدست می‌آید [۹].

$$P(X, \hat{X}) \leq \left(\prod_{i=1}^r \lambda_i \right)^{-n_R} \left(\frac{E_s}{4N_0} \right)^{-r n_R} \quad (5)$$

معیار رد ماتریس (فاصله اقلیدسی)

وقتی بهره دایورسیتی بزرگ باشد (وقتی که $n_R \geq 4$ یا به عبارت دیگر با دو یا بیشتر از دو آنتن درگیرنده)، معیار رد ماتریس یا فاصله اقلیدسی، عملکرد کد را تعیین می‌کند [۹].

$$P(X, \hat{X}) \leq \frac{1}{2} \exp \left(\frac{1}{2} \left(\frac{E_s}{4N_0} \right)^2 n_R \sum_{i=1}^r \lambda_i^2 - \frac{E_s}{4N_0} n_R \sum_{i=1}^r \lambda_i \right) \quad (۶)$$

$$Q \left(\frac{E_s}{4N_0} \sqrt{n_R \sum_{i=1}^r \lambda_i^2} - \frac{\sqrt{n_R} \sum_{i=1}^r \lambda_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^r \lambda_i^2}} \right)$$

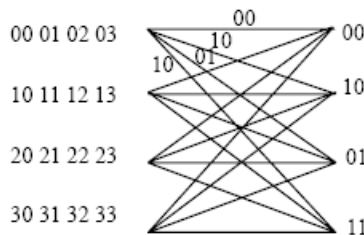
به طور کلی وقتی آنتن‌های فرستنده زیاد باشند، کانال به صورت یک کانال گوسی تقریب زده می‌شود [9]. به همین دلیل است که معیار رد ماتریس یا فاصله اقلیدسی بیشتر از زده می‌گردد.

جستجوی کد با استفاده از معیار عملکرد

به طور معمول معیارهای دترمینان/ مرتبه و رد ماتریس راهنمای مناسبی جهت جستجوی کامپیوتری کدهای ترلیس فضا- زمان می باشند به دلیل پیچیدگی حل معادلات تعیین کننده احتمال خطای دوتایی اشاره شده در بالا، از شبیه سازی کامپیوتری برای ارزیابی دقیق کارایی کدها استفاده می‌گردد [5].

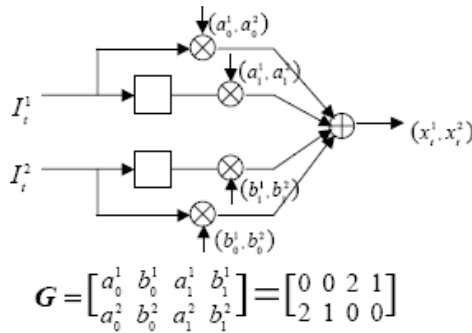
کدهای ترلیس فضا- زمان

کدهای ترلیس فضا- زمان اغلب توسط دیاگرام ترلیس یا ماتریس مولد^۱ بیان می‌گردند، به عنوان نمونه در شکل‌های ۲ و ۳ کد ترلیس فضا- زمان ۴ حالت ساده‌ای، با دو آنتن در فرستنده نشان داده شده است.

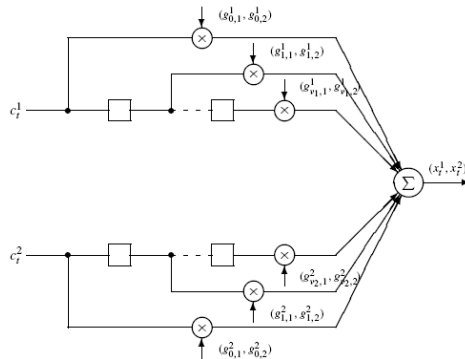


شکل ۲: دیاگرام ترلیس ۴ حالت ساده

دیاگرام ترلیس، کدهای ترلیس-فضا-زمان شبیه موارد استفاده شده این کد در مدولاسیون کدبندی ترلیس (TCM)¹ می باشد. در دیاگرام نشان داده شده بیت های حالت، در سمت راست ترلیس نشان داده شده اند، هر خط یک حالت انتقال ممکن با بیت های ورودی نشان داده شده در آن طرف خط را نشان می دهد، خروجی ها برای حالت جاری و ورودی ها، در ماتریس شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است. خروجی ها برای آنتن های ارسالی مختلف گروه بندی شده اند.



شکل ۳. ماتریس مولد یک کد ترلیس-فضا-زمان ساده



شکل ۴: کد کننده STTCM برای یک ساختار ۴-PSK

بیت های سمبل ورودی برای شاخه های بالاتر و پایین تر به عنوان ورودی تلقی می گردند. ضرایب شاخه ها به طور متناوب در ماتریس مولد دسته بندی می شوند که a_p بیت با ارزش (MSB) را نشان می دهد خروجی کد کننده توسط رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$X_t^k = \left(\sum_{p=0}^{V/1} I_{t-p}^1 \cdot a_p^k + \sum_{q=0}^{V/2} I_{t-q}^2 \cdot b_{t-q}^k \right) \text{ mod } 4, \quad k=1,2 \quad (V)$$

مدل سامانه مورد استفاده در شبیه‌سازی

سمبل های QPSK تصادفی در فریم‌هایی جمع‌آوری می‌شوند. کدکننده فضا-زمان فریم را به عنوان ورودی تلقی و برای هر سمبل ورودی زوج کلمه کدها را تولید و به سمت آنتن های فرستنده گسیل می‌دارد. شکل دهنده پالس و فیلتر منطبق برای شبیه سازی کانال‌های تحت اثر فیدینگ فرکانس گزین به کار گرفته می‌شوند. به این ترتیب، سیگنال‌های مختلط در کانال MIMO گسیل می‌گردند. همچنین فرض بر این است که اطلاعات وضعیت کانال درگیرنده به‌طور کامل موجود می‌باشد. در گیرنده از یک آشکارساز دنباله‌ای ML برای کدگشایی سیگنال دریافتی استفاده می‌گردد. در این زمینه دیکدر ویتربی برداری اصلاح شده به کار گرفته می‌شود. احتمال خطا بعد از کدگشایی فریم صورت محاسبه می‌شود [7].

نتایج شبیه‌سازی‌ها

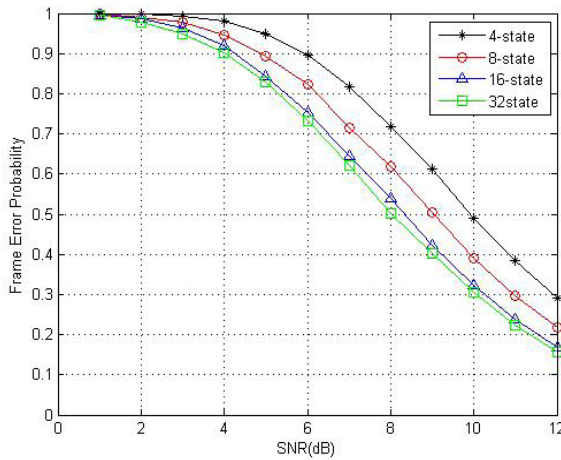
مقایسه عملکرد براساس انتخاب تعداد حالات کد

عملکرد کدهای ترلیس فضا-زمان با تعداد حالات مختلف ترلیس تحت کانال‌های فیدینگ رایلی تخت با ۲ آنتن در فرستنده برای ساختارهای 4-PSK و 8-PSK در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند. این کدها بر اساس معیار مرتبه و دترمینان می‌باشند [3].

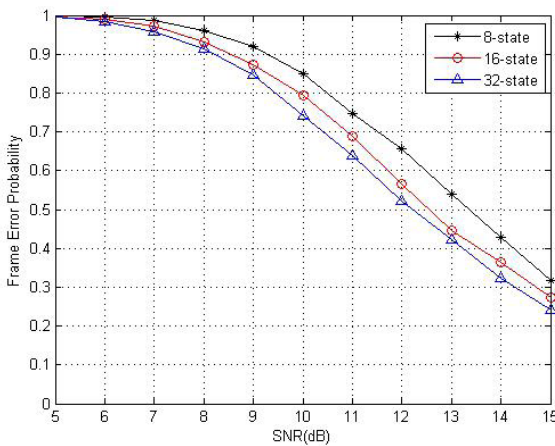
همچنان که شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهند، هر چه تعداد حالات ترلیس افزایش یابند، عملکرد بهتری به دست خواهد آمد، این بهبود عملکرد در 4-PSK با تغییر حالت از ۴ به ۸، نمود بیشتری دارد، همچنین کدهایی بازده پهنای باند در حدود 2 bits/S/HZ را نتیجه می‌دهند. و اگر تعداد حالت‌ها بیشتر از ۱۶ گردد بهبود عملکرد کد به اشباع می‌رود.

برای 8-PSK تغییر تعداد حالت از ۸ به ۱۶ نمود بیشتری خواهد داشت. عملکرد کدهای ۴، ۸، ۱۶ و ۳۲ حالت 8-PSK روندی شبیه 4-PSK دارند. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که در طراحی کدهای بر اساس معیار مرتبه و دترمینان کد 4-PSK عملکرد بهتری نسبت به کد 8-PSK خواهد داشت، بازده پهنای باند کد 8-PSK به مقدار 3 bit/S/HZ افزایش می‌یابد. از دو شکل بالا این گونه استنباط می‌گردد، که در این نوع کدبندی با افزودن تعداد حالات ترلیس بهینه‌سازی آن چنان مناسبی عاید نمی‌گردد. در این راستا براساس جستجوهای کامپیوتری می‌توان کدهایی با بهینگی بهتر به دست آورد [5].

از سویی دیگر با تغییر روند طراحی می توان بر اساس معیار رد ماتریس یا فاصله اقلیدسی کدهایی بهینه‌ای معرفی نمود [4]. عملکرد کدهای 4-PSK ترلیس فضا-زمان بر اساس معیار رد ماتریس یا فاصله اقلیدسی با تعداد حالات مختلف تحت کانال‌های فیدینگ رایلی تخت با ۲ آنتن در فرستنده و در گیرنده در شکل ۷ نشان داده شده است. خطوط مقطع نشان دهنده عملکرد کدهای ۴ حالتی براساس معیار مرتبه و دترمینان می‌باشند، که برای مقایسه ترسیم شده است.

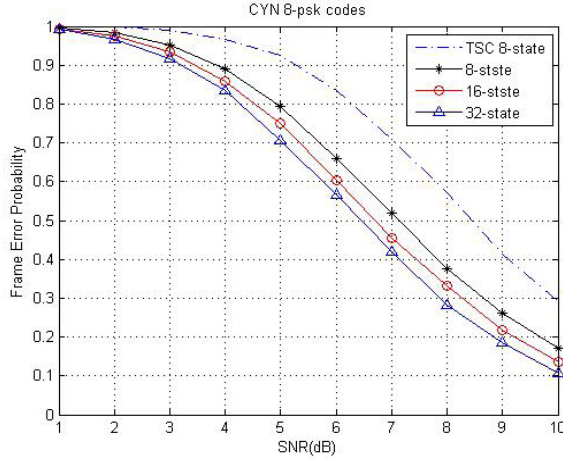


شکل ۵: کدهای ترلیس فضا-زمان ۴-PSK براساس معیار مرتبه و دترمینان

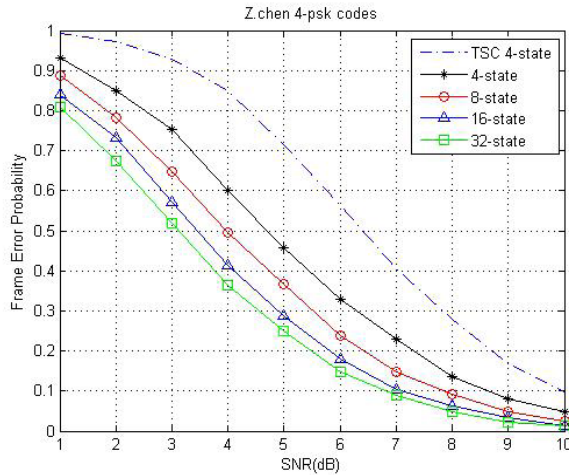


شکل ۶: کدهای ترلیس فضا-زمان ۸-PSK براساس معیار مرتبه و دترمینان

همان طور که قابل مشاهده است این نوع کدها در حدود 1dB بهبود عملکرد نسبت به کدهای قبلی را به همراه خواهند داشت.



شکل ۷: کدهای ترلیس فضا-زمان ۴-PSK براساس معیار رد ماتریس

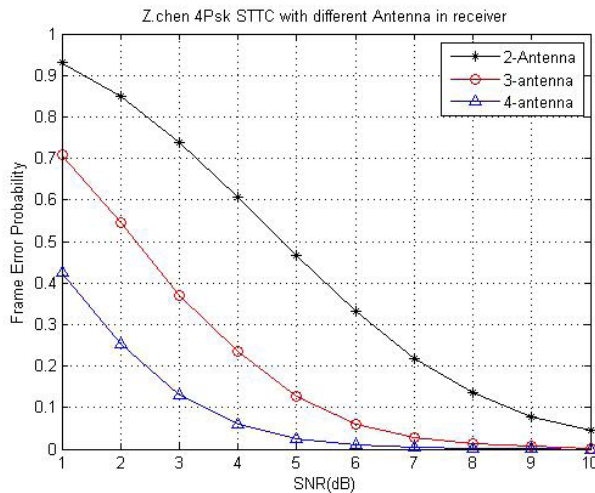


شکل ۸: کدهای ترلیس فضا-زمان ۸-PSK براساس معیار رد ماتریس

عملکرد کدهای 8-PSK بهینه، با ۲ آنتن در گیرنده و فرستنده در شکل ۸ نشان داده شده است. در اینجا نیز خطوط مقطع نشان دهنده عملکرد کد ۴ حالت 8-PSK براساس معیار مرتبه و دترمینان می باشد که برای مقایسه ارائه شده است.

تأثیر انتخاب تعداد آنتن در گیرنده

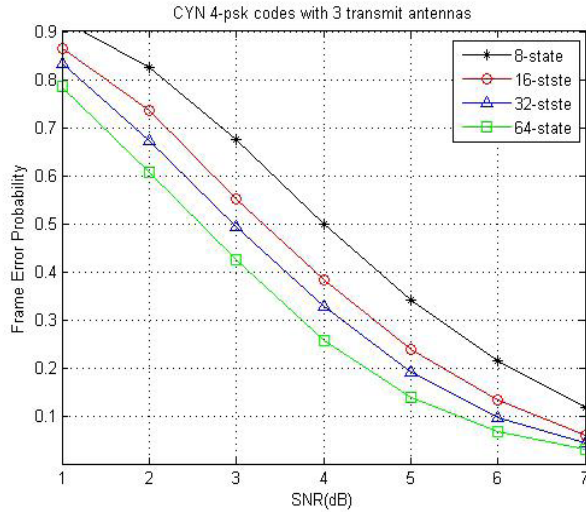
شکل ۹ سه کد 4-PSK با طراحی یکسان ۴ حالتی که در گیرنده ۲، ۳ و ۴ آنتن خواهند داشت تحت کانال با فیدینگ رایلی تخت را با هم مقایسه نموده است، مشاهده می‌کنیم که با به کارگیری تعداد آنتن‌های بیشتر در گیرنده، بهبود عملکرد قابل توجهی به دست خواهد آمد. به طور کلی وقتی تعداد آنتن‌های دریافتی افزایش می‌یابد بهره دیوارسیتی نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه به همین نسبت نیز بهبود عملکرد خواهیم داشت.



شکل ۹: مقایسه تعداد آنتن‌ها در گیرنده برای یک کد ترلیس فضا-زمان ۴-PSK

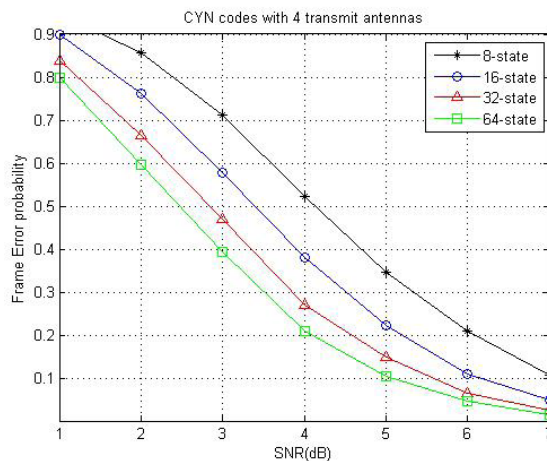
تأثیر انتخاب تعداد آنتن در فرستنده

عملکرد کدهای ترلیس فضا-زمان بر اساس رد ماتریس 4-psk با تعداد حالات مختلف تحت کانال‌های فیدینگ رایلی تخت با ۳ آنتن در فرستنده و ۲ آنتن در گیرنده، که در اینجا بر اساس معیار رد ماتریس یا فاصله اقلیدسی طراحی شده‌اند، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد در حدود 0.9dB بهبود عملکرد نسبت به وضعیت دو آنتن در فرستنده وجود خواهد داشت.



شکل ۱۰: کدهای ترلیس فضا-زمان ۴-psk با ۳ آنتن در فرستنده

در ادامه دوباره عملکرد کدهای ترلیس فضا-زمان بهینه 4-psk ۸، ۱۶، ۳۲ و ۶۴ حالتی تحت کانال‌های فیدینگ رایلی تخت با ۴ آنتن در فرستنده و ۲ آنتن در گیرنده که بر اساس معیار رد ماتریس یا اقلیدسی طراحی شده‌اند در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با ۴ آنتن در فرستنده در حدود 1.5dB نسبت به ۲ آنتن بهبود عملکرد خواهیم داشت و این عدد نسبت به ۳ آنتن در حدود 0.6dB است.



شکل ۱۱: کدهای ترلیس فضا-زمان ۴-psk با ۴ آنتن در فرستنده

همچنان که از نتایج بر می آید با ۳ یا ۴ آنتن در فرستنده عملکرد کدهای با معیار رد ماتریس یا فاصله اقلیدسی بهتر از کدهای با معیار مرتبه و دترمینان عمل می کنند.

نتیجه گیری

برای دستیابی به مزایای کانال بی سیم می توان از کدهای ترلیس فضا-زمان استفاده نمود. برای طراحی همچنین سامانه ای می بایست شرایط متفاوتی را در نظر گرفت از جمله، نوع معیار طراحی کد و تعداد آنتن های مورد استفاده در فرستنده/ گیرنده. بنابراین در این مقاله با توجه به نتایج شبیه سازی حاصل این پارامترها و نوع سامانه مورد نیاز می توان به ساختار بهینه ای برای طراحی دست یافت.

مراجع

1. Third Generation Partnership Project (3GPP), Technical specification 1 group radio access network," 1999; downloadable at <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/March 00>
2. Space-time Coding: Branka Vucetic, Jinhong Yuan By Branka Vucetic, Jinhong Yuan Published by John Wiley and , 302 pages, Sons, 2003
3. V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criterion and code construction," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 44, pp. 744-765, Mar. 1998.
4. Chen Z, Yuan J, Vucetic B. Improved space-time trellis coded modulation scheme on slow Rayleigh fading channels. 29 March 2001, pp.440-1. Publisher: IEE, UK.
5. S. Baro, G. Bauch and A. Hansmann, "Improved codes for spacetime trellis coded modulation", IEEE Commun. Lett., vol. 4, No. 1, Jan. 2000.
6. Yi Gong, Letaief K. B., Performance evaluation and analysis of space-time coding in unequalized multipath fading links. IEEE Transactions on

Communications, vol.48, no.11, Nov. 2000, pp.1778-82. IEEE, USA.

7.Heikkila MJ, Majonen E, Lilleberg J. Decoding and performance of space-time trellis codes in fading channels with intersymbol nterference. 11th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. PIMRC 2000. Proceedings. IEEE. Part vol.1, 2000, pp.490-4 vol.1. Piscataway, NJ, USA

8.Yi Gong, Letaief K. B., Performance of Space-Time Trellis Coding over Nakagami Fading channels. EEE VTS 53rd Vehicular Technology Conference, Spring 2001. Proceedings. IEEE. Part vol.2, 2001, pp.1405-9 vol.2. Piscataway, NJ, USA.

9.B. Vucetic, J. Yuan, Space Time Coding, 1st ed. pp 65-82, John

10.T. S. Rappaport, Wireless Communications: Principles and Practice, 1st ed. pp 172-173, Prentice Hall, 1997.

11.Nakagami fading channels. IEEE, WCC 2000 - ICCT 2000. 2000 International Conference on Communication Technology Proceedings. IEEE. Part vol.2, 2000, pp.1680-4 vol.2. Piscataway, NJ, USA.

12.Matthias Patzold, etc., Design of High-Speed Simulation Models for Mobile Fading Channels by Using Table Look-Up Techniques, IEEE transactions on vehicular technology vol. 49,no.4,july 2002

13.Stefanov A, Duman TM. Performance analysis of space-time trellis codes over quasi-static fading channels. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng. Proceedings of Spie - the International Society for Optical Engineering, vol.4531, 2001, pp 191-203. USA.

