

بهبود عملکرد مدولاسیون فضایی تعمیم یافته در کانال‌های با محوشدگی چندمسیری

علیرضا رضوانی، رضا سعادت و جمشید ابویی

جدول ۱: اطلاعات موجود در شماره آنتن فعال.

شماره آنتن ارسالی	بیت اطلاعات تخصیص یافته
آنتن اول	۰۰
آنتن دوم	۰۱
آنتن سوم	۱۰
آنتن چهارم	۱۱

اعضای منظومه^۴ و یک آنتن از مجموعه آنتن‌های فرستنده انتخاب و سمبل مورد نظر از آنتن انتخابی ارسال می‌شود. به عنوان نمونه در صورتی که از ۴ آنتن در فرستنده استفاده شود هر آنتن دارای ۲ بیت اطلاعات خواهد بود. جدول ۱ تخصیص بیت‌های اطلاعاتی فوق را نشان می‌دهد. بازده طیفی^۵ این روش برابر لگاریتم مبنای دو از اندازه منظومه به علاوه لگاریتم مبنای دو از تعداد آنتن‌های ارسالی می‌باشد [۳].

انتخاب این که چه تعداد بیتی از طریق واحد اول و چه تعداد از آن توسط واحد دوم ارسال شود به شرایط کانال و محدودیت‌های موجود در فرستنده بستگی دارد. به عنوان نمونه جهت دستیابی به بازده طیفی ۴ bps/Hz می‌توان از ۲ آنتن (یک بیت اطلاعات) و استفاده از مدولاسیون QAM ۸ (سه بیت اطلاعات)، ۴ آنتن (دو بیت اطلاعات) و مدولاسیون QAM ۴ (دو بیت اطلاعات) و یا ۸ آنتن (سه بیت اطلاعات) و استفاده از مدولاسیون BPSK (یک بیت اطلاعات) استفاده نمود. بدیهی است در صورتی که از یک آنتن در فرستنده استفاده شود جهت دستیابی به بازده طیفی ۴ bps/Hz باید از مدولاسیون QAM ۱۶ یا مدولاسیون‌های مشابه با همین اندازه منظومه استفاده نمود که در این صورت ارسال با روش مدولاسیون فضایی به روش ارسال مرسوم در مدولاسیون‌های دیجیتال تبدیل خواهد شد.

با استفاده از یک سیستم چندآنتنه می‌توان به سه بهره چندگانگی^۶، تسهیم^۷ و بهره آرایه^۸ دست یافت [۴]. چندگانگی حاصل از سیستم‌های چندآنتنه از نوع فضایی^۹ می‌باشد که نسبت به چندگانگی زمانی دارای این مزیت است که در چندگانگی فضایی بدون کاهش نرخ ارسال مؤثر، بهره چندگانگی حاصل می‌شود، در حالی که در چندگانگی زمانی این گونه نیست [۴]. مزیت مدولاسیون فضایی در مقایسه با روش تک‌آنتنه، ایجاد یک بهره تسهیم در حوزه فضایی می‌باشد که بازده طیفی را به میزان لگاریتم مبنای دو از تعداد آنتن‌های ارسالی افزایش می‌دهد [۳]. به عبارت بهتر در گیرنده علاوه بر تخمین سمبل ارسالی، شماره آنتن ارسالی نیز

چکیده: مدولاسیون فضایی یک روش جدید استفاده از سیستم‌های چندآنتنه است که ایده اصلی این روش، نگاشت بلوک اطلاعات به دو واحد حمل‌کننده اطلاعات می‌باشد: یک واحد سمبل ارسالی است که از اعضای منظومه انتخاب می‌شود و واحد دیگر، شماره آنتن فعال می‌باشد که در واقع نشان‌دهنده موقعیت آنتن ارسال‌کننده سمبل است. استفاده از موقعیت آنتن فعال به عنوان یک منبع ارسال اطلاعات اضافی سبب افزایش بازده طیفی می‌شود. همچنین عدم وجود تداخل بین آنتنی و بین کانالی در این روش سبب کاهش پیچیدگی در گیرنده می‌شود. در نتیجه مدولاسیون فضایی به رقیبی برای سایر روش‌های استفاده از چند آنتن مانند V-BLAST و کدینگ فضا-زمان تبدیل شده است. اخیراً روش مدولاسیون فضایی تعمیم یافته ارائه شده که در آن به جای استفاده از یک آنتن در هر دوره سمبل، از چند آنتن فعال استفاده می‌شود. ارسال یک سمبل از چندین آنتن، سبب به دست آمدن بهره چندگانگی خواهد شد. در این مقاله نشان داده می‌شود که با استفاده از روش‌های کدگذاری کانال مختلف در مدولاسیون فضایی تعمیم یافته و بدون کاهش در بازده طیفی، در عملکرد مدولاسیون فضایی تعمیم یافته از ۱۵ تا ۴۰ درصد بهبود در نسبت سیگنال به نویزهای متوسط و بالا حاصل خواهد شد.

کلید واژه: اطلاعات حالت کانال، سیستم‌های چندورودی- چندخروجی، کدگذاری کانال، مدولاسیون فضایی تعمیم یافته.

۱- مقدمه

مدل اولیه مدولاسیون فضایی^۱ (SM) برای نخستین بار در سال ۲۰۰۱ مطرح شد که به آن مدولاسیون جابه‌جایی فضا^۲ (SSK) گفته می‌شود که در واقع حالت خاصی از مدولاسیون فضایی می‌باشد [۱]. روش مرسوم مدولاسیون فضایی در سال ۲۰۰۶ مطرح شد [۲]. مدولاسیون فضایی یکی از روش‌های استفاده از سیستم‌های چندآنتنه است که در آن تنها یکی از آنتن‌های موجود در فرستنده در هر دوره سمبل^۳ فعال می‌باشد. در این روش، اطلاعات توسط دو واحد ارسال می‌شود: یک واحد سمبل ارسال شده از آنتن فعال و واحد دوم موقعیت فضایی آنتن ارسال‌کننده سمبل می‌باشد. به عبارت بهتر در این روش موقعیت فضایی آنتن نیز حاوی اطلاعات است و با توجه به دنباله ارسالی مورد نظر، یک سمبل از

این مقاله در تاریخ ۲۱ مهر ماه ۱۳۹۲ دریافت و در تاریخ ۲۸ تیر ماه ۱۳۹۳ بازنگری شد.

علیرضا رضوانی، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، (email: rezvani_alireza@stu.yazd.ac.ir)

رضا سعادت، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، (email: rsaadat@yazd.ac.ir)

جمشید ابویی، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، (email: abouei@yazd.ac.ir)

4. Constellation

5. Spectral Efficiency

6. Diversity

7. Multiplexing

8. Array

9. Spatial

1. Spatial Modulation

2. Space Shift Keying

3. Symbol Duration

جدول ۲: تخصیص کد در روش GSM با استفاده از مدولاسیون BPSK و وجود ۵ آنتن فرستنده که دو آنتن به طور همزمان فعال باشد.

شماره آنتن‌های فعال	سمبل ارسالی	کد متناظر
۱،۲	-۱	۰۰۰۰
۱،۲	+۱	۰۰۰۱
۳،۱	-۱	۰۰۱۰
۳،۱	+۱	۰۰۱۱
۱،۴	-۱	۰۱۰۰
۱،۴	+۱	۰۱۰۱
۱،۵	-۱	۰۱۱۰
۱،۵	+۱	۰۱۱۱
۳،۲	-۱	۱۰۰۰
۳،۲	+۱	۱۰۰۱
۲،۴	-۱	۱۰۱۰
۲،۴	+۱	۱۰۱۱
۳،۴	-۱	۱۱۰۰
۳،۴	+۱	۱۱۰۱
۳،۵	-۱	۱۱۱۰
۳،۵	+۱	۱۱۱۱

در بخش ۲ مدل سیستم استفاده شده در مقاله ارائه شده و در بخش ۳ سه روش جهت بهبود عملکرد مدولاسیون فضایی تعمیم یافته آمده است. پیچیدگی محاسباتی^۷ روش‌های ارائه شده نیز در بخش ۴ آورده شده و بخش آخر نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲- مدل سیستم

سیگنال دریافتی در یک سیستم چندآنتنه با N_T آنتن در فرستنده و N_R آنتن در گیرنده به صورت زیر تعریف می‌شود

$$y = Hx + n \quad (1)$$

که در رابطه فوق y بردار دریافتی، H ماتریس اطلاعات حالت کانال^۸ دارای N_R سطر و N_T ستون، x سمبل ارسالی و n بردار نویز مختلط گوسی جمع‌شونده است. در روش GSM در هر دوره سمبل N_A آنتن ($N_A < N_T$) فعال می‌باشد و فرض می‌شود که کانال دارای محوشدگی مسطح^۹ است که ضرایب محوشدگی دارای توزیع رایلی با انرژی واحد می‌باشد. همچنین فرض می‌شود که ماتریس اطلاعات حالت کانال (H) در گیرنده مشخص باشد و از مدولاسیون‌های خطی از جمله M-PSK و M-QAM به جهت ارسال سمبل استفاده شده که در آن M برابر اندازه منظومه می‌باشد. تحت شرایط فوق، تعداد کل حالت‌های ممکن برای ارسال برابر با $M \times \binom{N_T}{N_A}$ است؛ پس تعداد بیت‌های ممکن برای ارسال

در هر دوره سمبل برابر $\lceil \log_2(M \times \binom{N_T}{N_A}) \rceil$ خواهد بود. مثلاً با فرض استفاده از مدولاسیون BPSK و وجود ۵ آنتن در سمت فرستنده و فعال بودن همزمان ۲ آنتن در هر دوره سمبل، بیشترین بازده طیفی قابل حصول در هر دوره سمبل برابر $\lceil \log_2(2 \times \binom{5}{2}) \rceil = 4$ می‌باشد. به هر یک از حالت‌های مختلف فعال بودن آنتن ارسالی کدی اختصاص می‌یابد. در جدول ۲ نمونه‌ای از تخصیص کد برای مثال بالا آورده شده و همان گونه که مشخص می‌باشد حالت‌های فعال بودن همزمان آنتن‌های (۲،۵) و (۴،۵) ظاهر نشده است. در واقع جهت دستیابی به بازده طیفی برابر ۴ bps/Hz، از ۲۰ حالت ممکن به ۱۶ حالت نیاز می‌باشد و ۴ حالت نیز در نظر گرفته نشده است. در روش GSM سیگنال دریافتی در گیرنده به صورت زیر مدل می‌شود

$$y = h'x + n \quad (2)$$

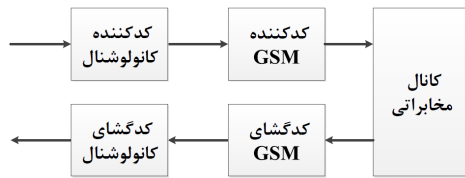
که h' برابر جمع نظیر به نظیر ستون‌های مربوط به آنتن‌های فعال ماتریس H می‌باشد. به عبارت بهتر چنانچه دو آنتن ۱ و ۲ در فرستنده در یک دوره سمبل فعال باشد ستون اول و دوم ماتریس H به طور نظیر به نظیر با هم جمع شده و به عنوان ضریب محوشدگی کانال در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که از یک سیستم چندورودی- چندخروجی (MIMO)^{۱۰} با N_T آنتن فعال استفاده شود، h' برابر مجموع تمام ستون‌های ماتریس H خواهد بود. از آنجا که سمبل‌های ارسالی هم‌احتمال فرض می‌شود، معیار تصمیم‌گیری بهینه برابر معیار ML^{۱۱} خواهد بود و بنابراین خواهیم داشت

تخمین زده می‌شود که این بخش نیز حاوی بخشی از اطلاعات ارسالی می‌باشد. پس بازده طیفی در مقایسه با روش معمول ارسال با یک آنتن افزایش می‌یابد. همچنین مزیت این روش در مقایسه با روش‌هایی مانند ^۱V - BLAST و کد فضا- زمان^۲(STC)، در عملکرد بهتر و در بازده طیفی برابر است [۵] و [۶]. در واقع به جهت آن که در SM به طور همزمان آنتن‌ها فعال نمی‌باشد، تداخل بین کانالی^۳ (ICI) و تداخل بین آنتنی^۴ (IAI) در آن وجود ندارد و نیازی به استفاده از روش‌های مختلف حذف تداخل^۵ در گیرنده نیست [۲] و همین عامل سبب کاهش پیچیدگی تخمین اطلاعات ارسالی در گیرنده می‌شود. معیار بهینه برای تشخیص سمبل و شماره آنتن ارسالی به صورت همزمان در [۵] ارائه و نشان داده شده که عملکرد SM بهتر از سایر روش‌های استفاده از چند آنتن می‌باشد.

در [۷] روشی معرفی شده که به آن مدولاسیون فضایی تعمیم یافته (GSM)^۶ می‌گویند. در این روش تعدادی از آنتن‌ها به طور همزمان فعال می‌باشد و یک سمبل مشخص از تمام آنتن‌های فعال ارسال می‌شود. مزیت این روش نسبت به SM آن است که در آن تعداد آنتن‌های ارسالی هر عدد دلخواهی می‌تواند باشد و همچنین سمبل ارسال شده دارای بهره چندگانگی در فرستنده است. نتایج نشان‌دهنده آن است که در بازده طیفی برابر، روش تعمیم یافته عملکرد بهتری نسبت به روش SM دارد [۷] و [۸]. در [۹] باند بالای احتمال خطای GSM در کانال‌های با محوشدگی رایلی و رایسین محاسبه شده و در [۱۰] نیز نشان داده شده که با استفاده از تعداد بهینه آنتن‌های ارسالی می‌توان به احتمال خطای بهتری از بهره تسهیم حاصل شده دست یافت.

1. Vertical - Bell Lab Layered Space - Time
2. Space Time Code
3. Inter Channel Interference
4. Inter Antenna Interference
5. Interference Cancellation
6. Generalised Spatial Modulation

7. Computational Complexity
8. Channel State Information
9. Flat Fading
10. Multi Input - Multi Output
11. Maximum Likelihood

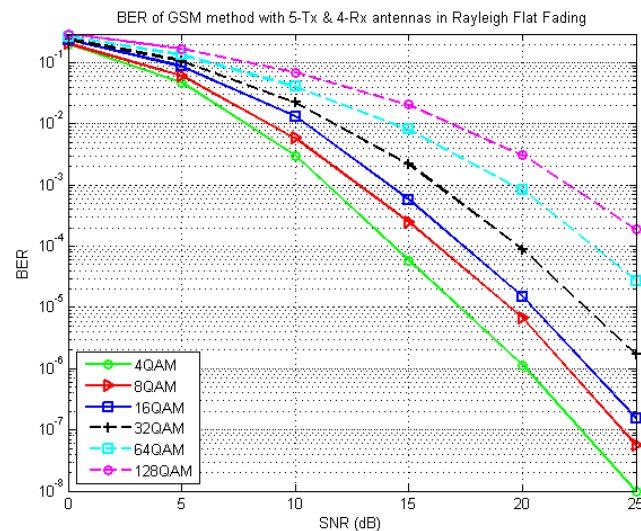


شکل ۲: بلوک دیاگرام GSM همراه با کد کانولوشنال.

شد. یک کدکننده کانولوشنال با نرخ $R = k/n$ که در آن k برابر تعداد بیت ورودی کدکننده و n برابر بیت های خروجی کدکننده می باشد، میزان بازده طیفی اطلاعات را به میزان k/n کاهش خواهد داد [۱۱]. در مدولاسیون فضایی که یکی از ویژگی های برجسته آن، افزایش بازده طیفی در مقایسه با روش متداول ارسال اطلاعات می باشد، در صورت استفاده از این کدگذاری کانال باید ترتیبی اتخاذ شود تا بازده طیفی تغییری نکند. یک راه برای حل این مشکل استفاده از ایده مدولاسیون کدشده تریس^۳ می باشد. مطابق این روش در کدکننده k بیت اطلاعات وارد شده و $k+1$ بیت از آن خارج می شود. سپس دنباله ارسالی از بلوک مدولاسیون عبور داده می شود و به جهت آن که نرخ ارسال اطلاعات کاهش نیابد اندازه منظومه نیز دو برابر می شود. به عنوان نمونه به جای استفاده از مدولاسیون باینری بدون کدگذاری، از کد کانولوشنال با نرخ کدگذاری $1/2$ و مدولاسیون ۴ QAM استفاده شود. در نتیجه بازده طیفی تغییری نمی کند. شکل ۲ بلوک دیاگرام استفاده از کد کانولوشنال در مدولاسیون فضایی تعمیم یافته را نشان می دهد. مطابق شکل ابتدا دنباله ارسالی از کدکننده کانولوشنال عبور کرده و سپس وارد کدکننده GSM می شود. سپس از کانال با محوشدگی رابلی عبور داده شده و وارد بخش گیرنده می گردد. در گیرنده، ابتدا بلوک دمدولاتور GSM دنباله ارسالی را تخمین زده و سپس دنباله تخمین زده شده از بلوک کدگشایی کانولوشنال (الگوریتم ویتربی) عبور می کند. از آنجا که پیش از بلوک کدگشایی کانولوشنال، بلوک کدگشایی GSM وجود دارد پس ورودی بلوک کدگشایی کانولوشنال به صورت صفر و یک بوده و تصمیم گیری الگوریتم ویتربی نیز از نوع تصمیم گیری سخت^۴ می باشد. معیار تصمیم گیری بهینه در الگوریتم ویتربی با فرض هم احتمال بودن وقوع سمبل های مختلف، معیار ML بوده که برای حالت تصمیم گیری سخت مطابق (۴) خواهد بود [۱۲]

$$\hat{V} = \max_V P(R|V) \equiv \min d_H(R, V) \quad (4)$$

در این رابطه بردار تخمین زده شده، R بردار دریافتی در گیرنده کد کانولوشنال، V دنباله ارسالی در فرستنده و $d_H(R, V)$ برابر فاصله همینگ^۵ دنباله دریافتی و ارسالی می باشد. بر طبق رابطه فوق هر دنباله ارسالی که فاصله همینگ کمتری نسبت به دنباله دریافتی داشته باشد به عنوان دنبال تخمین زده شده در نظر گرفته می شود. شکل ۳ مقایسه احتمال خطای روش GSM و استفاده از مدولاسیون دوتایی با حالت کدشده با نرخ کدگذاری $1/2$ و استفاده از مدولاسیون ۴ QAM را نشان می دهد. همان گونه که در شکل مشخص می باشد روش جدید بیش از دو دسی بل در SNRهای متوسط سبب ایجاد بهبود شده که البته نیاز به سیستمی با پیچیدگی بیشتری برای بخش کدکننده و کدگشای کانولوشنال می باشد.



شکل ۱: احتمال خطای مدولاسیون فضایی تعمیم یافته.

هم احتمال فرض می شود، معیار تصمیم گیری بهینه برابر معیار ML خواهد بود و بنابراین خواهیم داشت

$$[\hat{J}_{ML}, \hat{q}_{ML}] = \arg \max_{j,q} P_Y(y|x_{j,q}, H') = \arg \max_{j,q} \operatorname{Re} \{y^H h'_j x_q\} - \frac{1}{\sqrt{\rho}} \|h'_j x_q\|_F^2 \quad (3)$$

که در رابطه فوق \hat{J}_{ML} تخمین شماره آنتن های فعال ارسالی، \hat{q}_{ML} تخمین سمبل ارسالی در گیرنده، ماتریس H' دارای $\lceil \log_2(N_T) \rceil$ ستون و N_R سطر می باشد و h'_j نیز یکی از ستون های ماتریس H' است. شکل ۱ احتمال خطای GSM را با فرض ۵ آنتن در فرستنده که ۲ آنتن در هر دوره سمبل فعال می باشد، ۴ آنتن در گیرنده و استفاده از مدولاسیون M-QAM نشان می دهد و کلیه شبیه سازی های این مقاله با روش مونت کارلو^۲ انجام شده است.

۳- بهبود عملکرد GSM

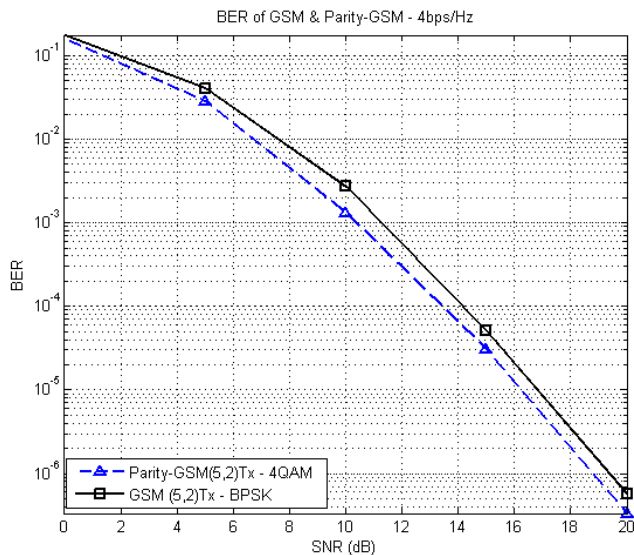
به جهت ایجاد بهبود در عملکرد GSM باید بتوان خطای تخمین شماره آنتن و یا خطای تخمین سمبل را بهبود بخشید. از آنجا که سمبل ارسالی دارای مرتبه چندگانگی برابر حاصل ضرب تعداد آنتن های فعال فرستنده در تعداد آنتن های گیرنده می باشد و از آنجا که در GSM فرستنده حداقل ۲ آنتن و در گیرنده نیز معمولاً چندین آنتن مورد استفاده قرار می گیرد، پس نسخه های متعددی از یک سمبل در گیرنده دریافت می شود و احتمال خطای ناشی از سمبل ارسالی در مقایسه با روش مرسوم مدولاسیون فضایی کاهش می یابد. در نتیجه افزودن به تعداد آنتن های فعال در فرستنده در کاهش احتمال خطای سمبل تأثیر قابل ملاحظه ای ندارد. در نتیجه تلاش شده تا با استفاده از روش های کدگذاری کانال به طور مناسب، احتمال خطا کاهش یابد. روش های ارائه شده به گونه ای است که بدون ایجاد تغییر در بازده طیفی سبب بهبود عملکرد خواهد شد.

۳-۱ استفاده از کدگذاری کانولوشنال

یک روش بهبود احتمال خطا در سیستم های مخابرات بی سیم، استفاده از کدگذاری کانال می باشد اما این روش سبب کاهش بازده طیفی خواهد

3. Trellis Coded Modulation
4. Hard Decision
5. Hamming Distance

1. Maximum Likelihood
2. Monte Carlo

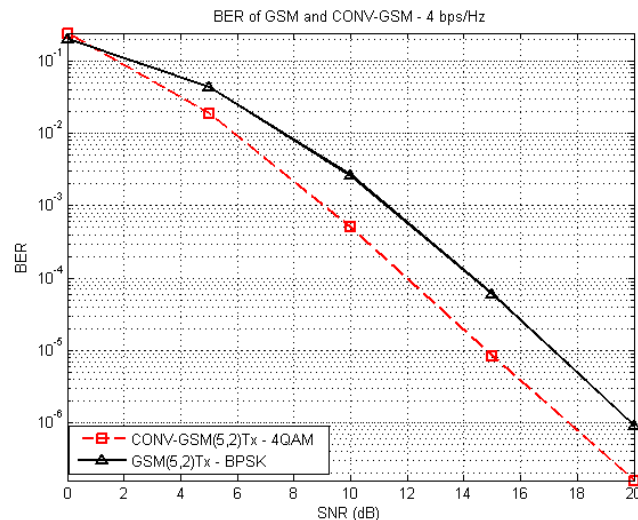


شکل ۵: استفاده از کد توازن در GSM در مقایسه با حالت رایج.

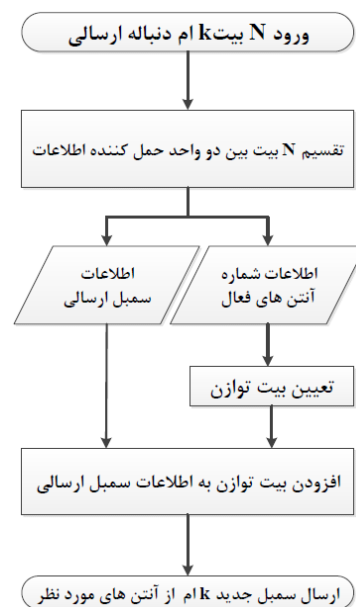
دنباله ارسالی جدا شده و به دو واحد حمل‌کننده اطلاعات اختصاص می‌یابد. سپس یک بیت توازن بسته به کد آنتن‌های فعال به سمبل ارسالی افزوده می‌شود تا در صورت وقوع یک بیت خطا در تخمین شماره آنتن‌ها در گیرنده، این خطا قابل تشخیص باشد. پس از آن سمبل جدید از طریق آنتن‌های مشخص شده ارسال می‌شود. از آنجا که در اکثر اوقات اگر خطایی رخ دهد تنها مربوط به تشخیص اشتباه یکی از آنتن‌های فعال می‌باشد و از آنجا که این اشتباه اغلب سبب بروز یک بیت خطا در تخمین خواهد بود، پس با استفاده از کد توازن می‌توان در عملکرد مدولاسیون فضایی بدون افزودن پیچیدگی زیادی به ساختار فرستنده-گیرنده بهبود ایجاد کرد. از آنجا که معیار تصمیم‌گیری در روش GSM برابر بیشینه‌شدن (۳) می‌باشد، پس از آن که خطا در گیرنده تشخیص داده شد کافی است عبارتی در نظر گرفته شود که از لحاظ بیشینه‌بودن در مرتبه دوم قرار دارد. اگر دومی نیز دارای خطا تشخیص داده شود روال فوق تا رسیدن به حالت بدون خطا ادامه می‌یابد. شکل ۵ احتمال خطای روش GSM را با استفاده از کد توازن و بدون آن را نشان می‌دهد. در این شکل از آنجا که بیت توازن تنها قابلیت تشخیص تعداد فردی از خطا را دارد و قدرت تصحیح آن وجود ندارد بنابراین بهبود به دست آمده از روش فوق کمتر از یک دسی‌بل در SNRهای متوسط خواهد بود.

۳-۳ استفاده از حالت‌های صرف نظر شده در GSM

همان گونه که پیشتر اشاره شد در GSM بسته به مدولاسیون استفاده‌شده، تعداد آنتن‌های فعال و همچنین تعداد کل آنتن‌های موجود در فرستنده، تعداد کل حالت‌های موجود و حالت‌های مورد نیاز تعیین می‌شود. به عنوان نمونه جدول ۲ حالتی را نشان می‌دهد که در آن از مدولاسیون BPSK و ۲ آنتن فعال از مجموع ۵ آنتن فرستنده استفاده شده است. با این فرضیات تعداد کل حالت‌ها برابر $20 = M \times \binom{N_T}{N_A}$ حالت خواهد بود که تعداد بیت‌های قابل ارسال در هر بار ارسال با این روش برابر $4 = \lceil \log_2(M \times \binom{N_T}{N_A}) \rceil$ بیت خواهد بود. بنابراین تعداد کل حالت‌های مورد نیاز برابر $16 = \lceil \log_2(M \times \binom{N_T}{N_A}) \rceil$ حالت خواهد بود و ۴ حالت آن بدون استفاده رها می‌شود. جهت بهبود عملکرد GSM می‌توان از این حالت‌های صرف نظر شده نیز بهره‌برداری نمود. در گیرنده، (۳) به اطلاعات ورودی اعمال شده و شماره آنتن‌های فعال و سمبل ارسالی تخمین زده می‌شود.



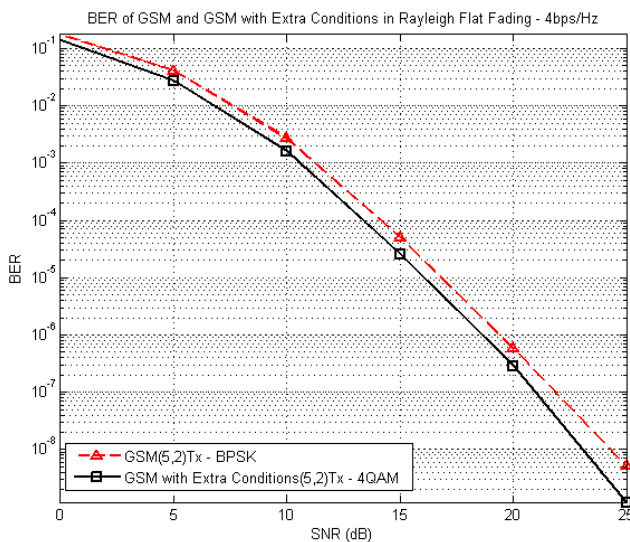
شکل ۳: مقایسه احتمال خطای GSM بدون کد کانولوشنال و با آن.



شکل ۴: روندنمای افزودن بیت توازن به GSM.

۳-۳ استفاده از کد بررسی توازن

از آنجا که در تخمین آنتن‌ها بر خلاف تخمین سمبل ارسالی، اطلاعات اضافی در دسترس نیست و این کار صرفاً از طریق استفاده از ماتریس حالت کانال در گیرنده صورت می‌پذیرد، پس امکان استفاده از چندگانگی برای بهبود تخمین شماره آنتن وجود ندارد. روشی که در اینجا مطرح می‌شود آن است که از یک کدگذاری کانال استفاده شود که بتواند خطای تخمین شماره آنتن‌های فعال را تشخیص دهد و احتمال خطا را بهبود بخشد. از آنجا که این هدف با به کارگیری کد بررسی توازن^۱ امکان‌پذیر می‌باشد و جهت جلوگیری از افزودن پیچیدگی در پیاده‌سازی این روش، این کد جهت پیاده‌سازی انتخاب و روندنمای این روش در شکل ۴ آورده شده است. از آنجا که سمبل ارسالی دارای چندگانگی می‌باشد و نسخه‌های مختلف آن در گیرنده دریافت شده، پس بیت توازن فقط به آن بخش از اطلاعات تخصیص می‌یابد که شماره آنتن‌های فعال را حمل می‌کنند. مطابق شکل ۴ در هر بار اجرای روش GSM، ابتدا N بیت از



شکل ۷: مقایسه احتمال خطای GSM و روش جدید.

تعریف $N_C = \begin{pmatrix} N_T \\ N_A \end{pmatrix}$ ، بر طبق معیار معرفی شده در (۳) خواهیم داشت

$$C_{GSM} = 2N_C N_R + N_C M + M \quad (5)$$

که در رابطه فوق M برابر اندازه منظومه و N_R تعداد آنتن های موجود در گیرنده می باشد. عبارت اول (۳) دارای $N_C N_R + N_C M$ و عبارت دوم شامل $N_C N_R + M$ تعداد ضرب مختلط است.

۲-۴ پیچیدگی محاسباتی روش GSM با کد پریتی

این حالت مشابه حالت GSM می باشد با این تفاوت که در آن اندازه منظومه دو برابر شده است. بنابراین خواهیم داشت

$$C_{GSM-P} = 2N_C N_R + 2N_C M + 2M \quad (6)$$

۳-۴ پیچیدگی محاسباتی روش GSM با حالات محذوف

در این روش اندازه مدولاسیون دو برابر و تعداد حالات آنتن ها نصف شده است. پس رابطه پیچیدگی محاسباتی به صورت زیر خواهد بود

$$C_{GSM-P} = N_C N_R + N_C M + 2M \quad (7)$$

۴-۴ پیچیدگی محاسباتی روش GSM با کد کانولوشنال

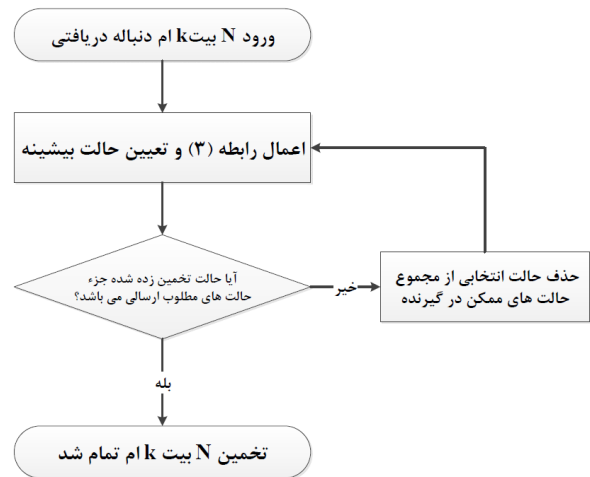
پیچیدگی محاسباتی این روش برابر مجموع پیچیدگی محاسباتی روش GSM و روش کدگذاری کانولوشنال است و به بیان ریاضی خواهیم داشت

$$C_{Conv-GSM} = C_{GSM} + C_{Conv-Code} \quad (8)$$

بخش کدکننده و کدگشای کد کانولوشنال هیچ عملیات ضرب مختلطی ندارد اما به طور کلی پیچیدگی محاسباتی آن بسته به تعداد ثبات های 1 به کار رفته در کدکننده، قابل مقایسه با ضرب مختلط خواهد بود و باید در محاسبات مد نظر قرار بگیرد.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در مقاله حاضر به بررسی مدولاسیون فضایی تعدیم یافته پرداخته شد و به سه روش جهت ایجاد بهبود در احتمال خطای این مدولاسیون در کانال های با محوشدگی چندمسیری اشاره شد. کلیه روش های اشاره شده به صورتی است که تغییری در بازده طیفی روش جدید در مقایسه با روش



شکل ۶: روندنمای استفاده از حالت های صرف نظر شده.

در صورتی که حالت تخمین زده شده جزء حالت های ممکن نباشد و شامل حالت های رها شده قرار گیرد وجود خطا در تخمین اطلاعات مشخص می شود. بنابراین باید مجدداً به سراغ (۳) رفت و حالت نخست را حذف و مجدداً معیار را اعمال نموده و حالت بیشینه را تعیین نمود. این روند تا آنجا ادامه می یابد که حالت تخمین زده شده جزء حالت های ممکن قرار گیرد. این ایده مشابه اتفاقی است که در خصوص کدگذاری کانال روی می دهد. در کدگذاری کانال نیز با افزودن بیت های اضافی به دنباله ورودی، تعداد حالت های رخ داده در گیرنده بیش از تعداد حالات ارسال شده می باشد و با درجه آزادی ایجاد شده در آن، در صورتی که سمبل تخمین زده شده جزء سمبل های مطلوب نباشد، یعنی خطایی رخ داده و با کمک روش های مختلف کدگشایی، محتمل ترین سمبل مطلوب انتخاب می شود. در اینجا نیز جهت دستیابی به احتمال خطای بهتر، تعداد حالت های صرف نظر شده افزایش می یابد تا از این ویژگی استفاده بهتری بشود و از طرفی جهت ثابت ماندن بازده طیفی، اندازه منظومه افزایش یابد. شکل ۶ روندنمای این روش را نشان می دهد. از آنجا که در روش فوق مشابه سایر روش های کدگذاری کانال الگوریتم کدکنندگی و کدگشایی وجود ندارد و تنها روشی جهت تشخیص خطا ایجاد شده، بنابراین بهره به دست آمده از این روش در مقایسه با روش های کدگذاری کانال کمتر خواهد بود. شکل ۷ مقایسه احتمال خطای روش فوق و روش GSM را نشان می دهد.

۴- پیچیدگی محاسباتی

در بخش قبلی سه شیوه جهت بهبود عملکرد روش GSM مطرح شد. در این بخش به بررسی پیچیدگی محاسباتی روش های فوق از لحاظ تعداد عملیات محاسباتی پرداخته می شود. از آنجا که عمل ضرب نسبت به جمع دارای پیچیدگی به مراتب بیشتری می باشد و در واقع یک ضرب از تعدادی جمع تشکیل شده و همچنین از آنجا که روش های اشاره شده در بخش های قبلی تقریباً دارای تعداد برابری عمل جمع می باشد، در اینجا تنها عملیات ضرب مختلط به عنوان یک عملیات محاسباتی در نظر گرفته شده است. ذکر این نکته قابل ملاحظه است که (۳) معیار تخمین اطلاعات ارسالی در روش GSM و همچنین سه روش مطرح شده در بخش قبل می باشد و تنها در روش های جدید اشاره شده، برخی از پارامترها بسته به نوع روش تغییر کرده و تعداد عملیات فوق را تغییر خواهد داد.

۱-۴ پیچیدگی محاسباتی روش GSM

با فرض N_A آنتن فعال در هر دوره سمبل از مجموع N_T آنتن و با

- [8] J. Wang, S. Jia, and J. Song, "Generalised spatial modulation system with multiple active transmit antenna and low complexity detection scheme," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 4, pp. 1605-1615, Apr. 2012.
- [9] M. Koca and H. Sari, "Generalized spatial modulation over correlated fading channels: performance analysis and optimization," in *Proc. 20th Int. Conf. on Telecommunications, ICT*, 5 pp., 6-8 May 2013.
- [10] T. Datta and A. Chockalingam, "On generalized spatial modulation," in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conf., WCNC*, pp. 2716-2721, Shanghai, China, 7-10 Apr. 2013.
- [11] J. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, 5th Ed.: McGraw-Hill Education, 2007.
- [12] D. J. Costello and S. Lin, *Error Control Coding*, 2nd Ed.: Prentice-Hall, 2004.

علیرضا رضوانی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مخابرات در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه سمنان و کارشناسی ارشد مخابرات در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه یزد به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم‌های چند آنتنه، تئوری کدینگ و مخابرات مشارکتی.

رضا سعادت تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی الکترونیک، کارشناسی ارشد و دکتری مخابرات به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۱، ۱۳۷۳ و ۱۳۷۸ از دانشگاه صنعتی اصفهان به پایان رسانده است. نامبرده از سال ۱۳۷۸ تا کنون به عنوان عضو هیأت علمی دانشگاه یزد مشغول فعالیت بوده و هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه یزد می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: تخصیص منابع در شبکه‌های بی‌سیم و موقعیت‌یابی ادوات بی‌سیم.

جمشید ابویی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مخابرات به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۷۶ از دانشگاه صنعتی اصفهان و در مقطع دکتری مهندسی برق گرایش مخابرات در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه اترلوو کانادا به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه یزد می‌باشد. نامبرده قبل از پیوستنش به دانشگاه یزد در سال‌های ۱۳۸۸ الی ۱۳۸۹ فوق‌دکتری دانشگاه تورنتو کانادا بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: بازدهی انرژی در سیستم‌های حسگر بی‌سیم، مخابرات مشارکتی و رادیو شناختی.

GSM ایجاد نمی‌کند و تنها مقداری پیچیدگی محاسباتی به ساختار این روش‌ها می‌افزاید. در روش نخست افزودن کدگذاری کانولوشنال به GSM سبب ایجاد بهره‌ای بیش از ۲ دسی‌بل بدون کاهش بازده طیفی خواهد شد و این در حالی است که استفاده از هر نوع از کدگذاری کانال در یک سیستم مخابراتی با کاهش بازده طیفی همراه خواهد بود. در روش دوم با افزودن بیت توازن با شرایط اشاره‌شده، سبب ایجاد بهبود در عملکرد این روش شده است. در روش سوم نیز با استفاده از حالت‌های صرف نظر شده و افزایش تعداد این حالت‌ها، می‌توان بهره‌ای از این روش به دست آورد. در بخش پایانی نیز پیچیدگی محاسباتی روش‌های اشاره‌شده آمده و نتایج نشان‌دهنده آن است که جهت بهبود در احتمال خطای GSM می‌توان از روش‌های فوق، بسته به کاربرد و امکانات موجود بهره‌برداری نمود.

مراجع

- [1] Y. Chau and S. H. Yu, "Space modulation on wireless fading channels," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 3, pp. 1668-1671, 2001.
- [2] R. Y. Mesleh, H. Haas, C. W. Ahn, and S. Yun, "Spatial modulation - a new low complexity spectral efficiency enhancing technique," in *Proc. IEEE Int. Conf. Networking*, 5 pp., 25-27 Oct. 2006.
- [3] M. Di Renzo and H. Haas, "Spatial modulation for multiple antenna wireless system-a survey," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 12, pp. 182 - 191, Dec. 2011.
- [4] J. Mietzner, R. Schober, L. Lampe, W. H. Gerstacker, and P. A. Hoeher, "Multiple-antenna techniques for wireless communications-a comprehensive literature survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 2, pp. 87-105, 2009.
- [5] J. Jeganathan, A. Ghrayeb, and L. Szczecinski, "Spatial modulation: optimal detection and performance analysis," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 8, pp. 545-547, Aug. 2008.
- [6] R. Y. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovic, C. W. Ahn, and S. Yun, "Spatial modulation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 4, pp. 2228-2241, Jul. 2008.
- [7] A. Younis, Y. Abdelhamid, N. Serafimovski, R. Mesleh, and H. Haas, "Generalised spatial modulation," in *Proc. Signals, Systems, and Computers, ASILOMAR*, pp. 1498-1502, Pacific Grove, CA, US, 7-10 Nov. 2010.