

مدولاسیون فضایی پیشرفته

علی اعظم عباسفر و سیدحسن تفرشیان

[۸] تا [۱۲] گیرنده‌های متنوعی با عملکرد نزدیک به گیرنده حداکثر احتمال و پیچیدگی کمتر برای سیستم‌های MIMO با تکنیک مدولاسیون فضایی پیشنهاد شده است.

در [۱۳] و [۱۴] گیرنده با استفاده از اطلاعات کانال و بازخورد دادن به فرستنده، مدولاسیون فضایی وقفی پیشنهاد شده است. در مدولاسیون فضایی وقفی با استفاده از دو پارامتر انتخاب آنتن و تخصیص انرژی می‌توان به عملکرد بهتری رسید. نویسندگان در [۱۳] با استفاده از قانون بیشینه‌کردن حداقل فاصله، به هر کدام از آنتن‌ها منظومه‌ای تخصیص می‌دهند به طوری که نرخ متوسط ارسالی ثابت باشد. در [۱۴] نیز با معرفی دو قانون بهینه‌کردن ظرفیت کانال و بیشینه‌کردن حداقل فاصله، روش‌هایی برای انتخاب آنتن معرفی می‌شود.

در [۱۵] سیستم جدیدی از مدولاسیون فضایی با نام مدولاسیون فضایی ربعی معرفی شده که در آن بیت‌های فضایی در دو بعد هم‌فاز و غیر هم‌فاز به صورت جداگانه ارسال می‌شوند. در [۱۶] نیز عملکرد سیستم مدولاسیون فضایی ربعی^۶ در کانال با فیدینگ ناکامی مرتبه m بررسی شده است.

در [۱۷] تکنیک مدولاسیون فضایی برای سیستم‌های MIMO در مخبره موج میلی‌متری بررسی شده است. مرجع [۱۸] نیز بازدهی انرژی مدولاسیون فضایی را با کد موتی و سیستم MISO با ارسال هم‌زمان در فرستنده مقایسه نموده است. مرجع [۱۹] اثر خطا در تخمین کانال را برای سیستم مدولاسیون فضایی بررسی نموده و نشان داده که سیستم مدولاسیون فضایی در برابر خطای تخمین کانال مقاوم عمل کرده است. هدف اصلی این مقاله معرفی سیستمی جدید برای ارسال داده در بعد فضا خواهد بود به طوری که پیاده‌سازی عملی این سیستم بسیار ساده و ارزان باشد. نام این شیوه جدید را مدولاسیون فضایی پیشرفته^۸ (ASM) گذاشته‌ایم. در این سیستم، در فرستنده از قطعه الکترونیکی ساده و ارزان قیمت تقسیم‌کننده توان برای فعال کردن تعداد بیشتری از آنتن‌های فرستنده بهره برده‌ایم. در مدولاسیون فضایی بیت‌های اطلاعات، سمبل ارسالی و آنتن‌های فعال را مشخص می‌کنند، اما در مدولاسیون فضایی پیشرفته بیت‌های اطلاعات علاوه بر سمبل ارسالی و آنتن‌های فعال، تغییر فاز در آنتن‌های فعال را نیز تعیین خواهند نمود.

در این مقاله ابتدا مدل فرستنده سیستم ASM را معرفی نموده و پس از آن گیرنده‌ای با پیچیدگی کم را برای آن معرفی می‌کنیم. در ادامه عملکرد سیستم ASM را با روش‌های مونت کارلو شبیه‌سازی کرده و سپس عملکرد سیستم ASM را با SM و دیگر روش‌های به کار گرفته شده در سیستم‌های MIMO از قبیل کدهای بلوکی فضا- زمان متعامد و V-BLAST مقایسه نموده‌ایم.

در ادامه بخش‌های این مقاله به شکل زیر خواهد بود: در بخش دوم به معرفی فرستنده سیستم ASM خواهیم پرداخت. در بخش سوم گیرنده

چکیده: در این مقاله روش جدیدی با نام مدولاسیون فضایی پیشرفته (ASM) را برای به کارگیری در سیستم‌های MIMO پیشنهاد می‌کنیم. مدولاسیون فضایی پیشرفته با استفاده از تقسیم‌کننده توان و تعیین فاز آنتن‌های فعال، بازدهی طیفی را نسبت به مدولاسیون فضایی معمولی افزایش می‌دهد. استفاده از تقسیم‌کننده توان به ما اجازه می‌دهد در آن واحد تعداد بیشتری آنتن فعال داشته باشیم، در حالی که همچنان یک زنجیره RF بیشتر نداریم. با تخصیص دادن بیت‌هایی از اطلاعات به فاز آنتن‌های فعال نیز دوباره می‌توانیم بیت‌های فضایی بیشتری ارسال کنیم. در ادامه با استفاده از روش‌های مونت کارلو عملکرد سیستم پیشنهادی را شبیه‌سازی کرده و آن را با مدولاسیون فضایی معمولی و دیگر تکنیک‌های MIMO از قبیل کدهای بلوکی فضا- زمان متعامد و V-BLAST مقایسه نموده‌ایم.

کلیدواژه: مدولاسیون فضایی، ASM، MIMO، بازدهی طیفی بالا، پیچیدگی گیرنده.

۱- مقدمه

مدولاسیون فضایی^۱ [۱]، SSK^۲ [۲] و STSK^۳ [۳] از تکنیک‌های سیستم‌های MIMO به شمار می‌آیند که می‌توانند به صورت عملی و مؤثر از چند آنتن در فرستنده استفاده کنند. در مدولاسیون فضایی با استفاده از تخصیص بیت اطلاعات برای انتخاب آنتن‌های فعال (برای ارسال سیگنال مخبراتی)، در عمل بازدهی طیفی افزایش می‌یابد. در حقیقت علاوه بر اطلاعات حمل‌شده توسط سمبل ارسالی، به اندازه لگاریتم دو تعداد آنتن‌های فرستنده، اطلاعات به گیرنده می‌رسد [۴]. علاوه بر این در مدولاسیون فضایی در فرستنده فقط از یک زنجیره RF^۴ استفاده خواهد شد و بنابراین فرستنده بسیار ساده و ارزان قیمت است. همچنین به دلیل این که در یک شکاف زمانی فقط یک آنتن فعال است، تداخل هم‌کانالی به طور کامل حذف می‌شود و پیچیدگی گیرنده نیز کاهش می‌یابد [۵].

در [۶] و [۷] شیوه جدیدی از مدولاسیون فضایی به نام مدولاسیون فضایی تعمیم‌یافته^۵ مطرح شده که بر خلاف مدولاسیون فضایی معمولی تعداد زنجیره‌های RF می‌تواند مقادیر دلخواهی باشد. مدولاسیون فضایی تعمیم‌یافته تعادلی بین پیچیدگی سیستم و نرخ ارسالی برقرار می‌کند. در

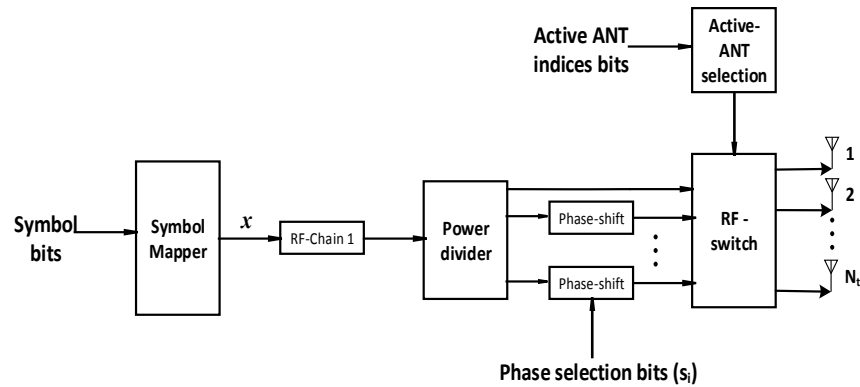
این مقاله در تاریخ ۱ اسفند ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۱ آبان ماه ۱۳۹۷ بازنگری شد.

علی اعظم عباسفر (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران، (email: abbasfar@ut.ac.ir).

سیدحسن تفرشیان، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران، (email: h.tafreshian@ut.ac.ir).

6. Quadrature Spatial Modulation
7. Nakagami-m Fading
8. Advanced Spatial Modulation

1. Spatial Modulation
2. Space Shift Keying
3. Space-Time Shift Keying
4. RF chain
5. Generalized Spatial Modulation



شکل ۱: نمودار بلوکی فرستنده سیستم ASM.

تعیین الگوی آنتن‌های فعال به کار می‌رود. بنابراین برای تشکیل شبکه نهایی آنتن‌ها در کل ۴ بیت اضافی استفاده خواهد شد. فرض کنید که مدولاسیون BPSK در فرستنده استفاده شود، پس برای بیت ۱ سمبل +۱ و برای بیت ۰ سمبل -۱ ارسال خواهد شد. اگر رشته بیت ورودی $d = [0, 0, 1, 0]$ وارد سیستم شود، با سه بیت اول آن یعنی ۰، ۰، ۰ اندیس آنتن‌های فعال انتخاب می‌شود که در این مثال آنتن‌های اول و دوم فعال هستند. در مرحله بعد با ورود بیت ۱، فاز آنتن دوم تعیین شده که در این مثال فاز آنتن دوم ۱۸۰ درجه انتخاب می‌گردد. در مرحله بعد نیز با ورود بیت ۰، سمبل -۱ انتخاب می‌شود. پس در این سیستم بردار ارسالی از آنتن‌های فرستنده به صورت زیر است

$$x = \frac{1}{\sqrt{r}} [1 \ -1 \ 0 \ 0]^T \quad (1)$$

هر درایه بردار (۱)، سمبل ارسالی از آنتن مرتبط با آن درایه را نشان خواهد داد. درایه‌ها با مقدار صفر نمایش‌دهنده غیر فعال بودن آنتن مربوط و ضریب $1/\sqrt{r}$ برای نرمالیزه کردن توان بردار سمبل ارسالی در نظر گرفته شده است.

بنابراین در سیستم مدولاسیون فضایی پیشرفته در هر بار استفاده از کانال، تعداد بیت‌های اطلاعات ارسالی برابر خواهد بود با

$$b = \log_r \left(\frac{N_t}{N_D} \right) + (N_D - 1) + \log_r M \quad (2)$$

که در آن N_D تعداد شاخه‌های تقسیم‌کننده توان، M اندازه منظومه مدولاسیون اولیه و N_t تعداد آنتن‌های فرستنده است. در عبارت بالا، جمله اول تعداد بیت‌هایی است که الگوی آنتن‌های فعال را انتخاب می‌کند و دومی بیت‌هایی هستند که فاز آنتن‌ها را و سومین عبارت نیز مربوط به بیت‌هایی است که سمبل اولیه ارسالی را تعیین می‌نماید.

۳- گیرنده سیستم ASM

سیگنال دریافتی در گیرنده به صورت زیر می‌باشد

$$y = Hx(d) + w \quad (3)$$

که d مجموعه بیت‌های ارسالی $y = \{y_i\}_{N_r \times 1}$ (بردار مشاهدات سمبل‌های دریافتی که از آنتن‌های گیرنده به دست می‌آید) و $x = \{x_j\}_{N_t \times 1}$ بردار سمبل‌های ارسالی از آنتن‌های فرستنده می‌باشد که با توجه به بیت‌های d تعیین می‌شود. $H = \{h_{ij}\}_{N_r \times N_t} = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_{n_i}]$ ماتریس کانال است که در آن h_{ij} بهره کانال از آنتن j ام فرستنده به آنتن i ام گیرنده می‌باشد و $w = \{w_i\}_{N_r \times 1}$ بردار نویز افزوده شده در آنتن‌های گیرنده است که گوسی و با درایه‌های مستقل از هم در نظر گرفته شده است.

این سیستم را معرفی می‌کنیم. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی‌ها را آورده و در بخش آخر نتیجه‌گیری کلی ارائه می‌شود.

۲- فرستنده سیستم ASM

در شکل ۱ نمودار بلوکی فرستنده سیستم مدولاسیون فضایی پیشرفته رسم شده است. در این سیستم ابتدا با استفاده از یک مدولاسیون اولیه، سمبل‌های اولیه x ایجاد می‌شود. با استفاده از این سمبل‌ها سیگنال ارسالی توسط زنجیره RF تولید می‌گردد. سپس از یک تقسیم‌کننده توان استفاده می‌شود تا این سیگنال به تعداد بیشتری تکثیر گردد. بنابراین در این سیستم بسته به نوع تقسیم‌کننده توان، هم‌زمان تعداد بیشتری از آنتن‌ها می‌تواند فعال باشد اما هر کدام از آنها باید سمبل برابری را ارسال نمایند. در مرحله بعد از تقسیم‌کننده توان، فرستنده فاز سمبل ارسالی آنتن‌ها را ۰ یا ۱۸۰ درجه تغییر می‌دهد. انتخاب این اختلاف فازها به این دلیل است که به سادگی قابل پیاده‌سازی است و در واقع این دو فاز با اتصال مثبت و منفی منبع به آنتن قابل پیاده‌سازی خواهد بود. البته باید به این نکته توجه کرد که تغییر فاز آنتن اول باید حتماً ۰ در نظر گرفته شود زیرا در غیر این صورت اگر یک بردار فضایی جزء مجموعه بردارهای فرستنده باشد، بردار منفی آن نیز در مجموعه فرستنده قرار خواهد داشت و این مسأله وقتی سمبل‌های اولیه از مدولاسیون‌های متقارن استفاده می‌کنند ابهام ایجاد می‌کند (علامت سمبل‌ها در گیرنده قابل تعیین نیست).

سپس الگوی آنتن‌های فعال تعیین می‌شود. این کار با در نظر گرفتن تعدادی بیت داده که برای این منظور اختصاص داده شده است انجام می‌گیرد. برای مثال فرض کنید که فرستنده ۵ آنتن دارد و از یک تقسیم‌کننده توان ۱ به ۲ استفاده می‌کند. تعداد حالت‌های انتخاب آنتن‌ها $\binom{5}{2} = 10$ است. اگر بخواهیم تعداد صحیحی بیت برای انتخاب الگوی آنتن‌های فعال استفاده شود می‌توانیم ۳ بیت برای این منظور در نظر بگیریم که در آن صورت ۸ حالت از ۱۰ حالت ممکن استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که با استفاده از تکنیک‌های پیچیده‌تر می‌توانیم همه ۱۰ حالت را استفاده کنیم که ما در این مقاله به آن نمی‌پردازیم.

بنابراین در سیستم مدولاسیون فضایی پیشرفته، به دو طریق تخصیص بیت داده در بعد فضا افزایش می‌یابد. اولاً به دلیل این که هم‌زمان تعداد بیشتری از آنتن‌ها فعال هستند، مجموعه آنتن‌های فعال مجموعه بزرگ‌تری است. ثانیاً با توجه به این که فاز آنتن‌ها نیز قابل انتخاب می‌باشد، باز هم بیت اطلاعات بیشتری می‌تواند در بعد فضا ارسال شود. به طور مثال برای سیستم ذکر شده در بالا علاوه بر بیت‌های لازم برای انتخاب سمبل، ۱ بیت برای تغییر فاز سیگنال آنتن دوم و ۳ بیت برای

ضرایب کانال باید تخمین زده شود، سپس از روی این ضرایب کانال به سادگی می‌توان t_m ها را با در نظر گرفتن آنتن‌های فعال متفاوت و فاز اعمالی متفاوت به دست آورد.

در مرحله بعدی می‌توانیم سمبل اولیه x را به دست آوریم. برای این کار از بازنگاشت‌دهنده مدولاسیون اولیه استفاده خواهیم نمود.

پیچیدگی گیرنده

در این بخش پیچیدگی گیرنده پیشنهادی را با گیرنده حداکثر احتمال مقایسه می‌کنیم. برای دست آوردن پیچیدگی یک سیستم تعداد ضرب‌های به کار رفته در ساخت آشکارکننده را در نظر خواهیم گرفت [۶]. در گیرنده حداکثر احتمال، باید جستجوی جامعی در تمام حالات ممکن انجام دهیم و از بین آنها حالتی را انتخاب خواهیم کرد که کمترین فاصله اقلیدسی را از بردار مشاهدات دریافتی داشته باشد. بنابراین تعداد ضرب به کار رفته در این سیستم برابر است با تعداد حالات ممکن ضربدر تعداد عمل ضرب لازم برای پیاده‌سازی فاصله اقلیدسی. با توجه به توضیحات می‌توانیم بگوییم در گیرنده حداکثر احتمال، تعداد $2^{N_D} MN_r$ عمل ضرب لازم است.

حال تعداد عملگرهای ضرب لازم برای پیاده‌سازی آشکارساز پیشنهادی خود را به دست خواهیم آورد. تعداد $2^{N_D} N_r + 2MN_r$ عمل ضرب در آشکارساز پیشنهادی لازم است. قسمت اول در مجموع بالا، ضرب‌های لازم برای تخمین آنتن‌های فعال و فاز آنها و قسمت دوم تعداد عملگرهای ضرب لازم برای دست آوردن سمبل ارسالی خواهد بود.

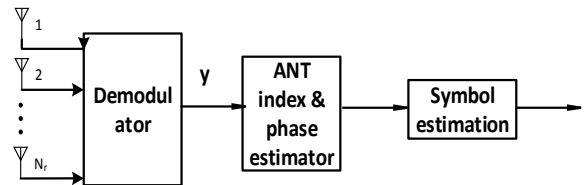
برای مثال فرض کنید که در یک سیستم 5×4 MIMO (۵ آنتن در فرستنده و ۴ آنتن در گیرنده) از تقسیم‌کننده توان با ۲ شاخه خروجی استفاده شده است. همچنین از مدولاسیون اولیه QAM-۱۶ استفاده می‌شود. بنابراین در این سیستم در هر بار استفاده از کانال ۸ بیت ارسال خواهد شد که ۴ بیت آن در بعد فضا و ۴ بیت آن توسط مدولاسیون اولیه QAM-۱۶ در بعد سیگنال خواهد بود. اگر در گیرنده از آشکارساز حداکثر احتمال استفاده گردد، 2048 عمل ضرب باید انجام شود. اما اگر از آشکارساز پیشنهادی خودمان استفاده کنیم، تنها 256 عمل ضرب لازم خواهد بود. در این مثال گیرنده ۸ برابر ساده‌تر شده است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته مدل کانال را فیدینگ تخت بدون همبستگی بین آنتن‌ها در نظر گرفته‌ایم. یعنی تمام ضرایب کانال از آنتن‌های فرستنده تا آنتن‌های گیرنده مستقل از هم بوده و از توزیع گوسی مختلط با میانگین صفر و واریانس ۱ تبعیت می‌کند، یعنی $h_{ij} : CN(0, 1)$. در این بخش به مقایسه عملکرد سیستم‌های مختلف که قبلاً برای سیستم‌های MIMO معرفی شده‌اند با سیستم پیشنهادی خود می‌پردازیم. این سیستم‌ها طوری انتخاب شده‌اند که بازدهی طیفی آنها همگی یکسان باشد و در نتیجه مقایسه عادلانه‌ای صورت گیرد. بازدهی طیفی مورد بررسی ما از ۶ تا ۱۰ bps/Hz است.

در شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته، نتایج را با روش مونت کارلو و برای 10^6 کانال مختلف به دست آورده‌ایم. در نتایج زیر می‌توانیم مقایسه عملکرد سیستم مدولاسیون فضایی پیشرفته را با مدولاسیون فضایی معمولی، کد فضا-زمان الموتی و V-BLAST مشاهده نماییم. همچنین گیرنده پیشنهادی را با گیرنده بهینه حداکثر احتمال مقایسه خواهیم نمود.

در شکل ۳ احتمال خطای سیستم‌های مدولاسیون فضایی معمولی،



شکل ۲: گیرنده سیستم مدولاسیون فضایی پیشرفته.

گیرنده حداکثر احتمال $(ML)^1$ برای سیستم ASM به صورت زیر خواهد بود

$$\hat{d}^{(ML)} = \arg \min_d \|y - Hx(d)\|^2 \quad (4)$$

همان طور که مشاهده می‌شود در این نوع گیرنده سمبل ارسالی، تغییرات فاز اعمال شده و الگوی آنتن‌ها همگی به طور هم‌زمان تخمین زده می‌شوند اما چون در این روش باید جستجوی جامعی روی تمام حالات ممکن انجام شود، پیچیدگی سیستم بسیار زیاد است.

ما در اینجا یک گیرنده ساده نیز پیشنهاد می‌کنیم که مبتنی بر گیرنده ناهمبسته‌ساز^۲ است [۱۲]. در این روش ابتدا الگوی آنتن‌های فعال تخمین زده می‌شود و سپس بر پایه حدس اولیه از آنتن‌های فعال، سمبل ارسالی را تعیین می‌کنیم. بنابراین آشکارسازی همان طور که در شکل ۲ نمایش داده شده است در دو مرحله انجام می‌گردد. در [۱] و [۶] نیز از این نوع گیرنده برای مدولاسیون فضایی و مدولاسیون فضایی تعمیم‌یافته استفاده شده است.

بردار مشاهدات دریافتی را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$y = \frac{x}{\sqrt{N_D}} \sum_{i=1}^{N_D} s_i h_{a_i} + w \quad (5)$$

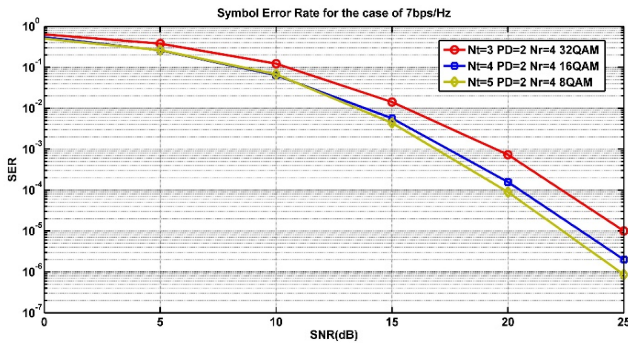
در (۵) $y = \{y_i\}_{N_r \times 1}$ بردار دریافتی در گیرنده است. x سمبل ارسالی اولیه در فرستنده است که با توجه به بیت‌های اطلاعات در فرستنده از منظومه ارسالی انتخاب خواهد شد. N_D تعداد شاخه‌های خروجی تقسیم‌کننده توان، $(h_{a_i})_{N_r \times 1}$ بردار کانال از آنتن فعال فرستنده a_i ام تا آنتن‌های گیرنده و s_{a_i} فاز اعمالی به آنتن فرستنده a_i ام است که می‌تواند $+1$ یا -1 باشد. $w_{N_r \times 1}$ نیز نویز گوسی جمع‌شونده در گیرنده است.

رابطه (۵) نشان‌دهنده این است که بردار مشاهدات دریافتی y ترکیب خطی بردارهای کانال آنتن‌های فعال خواهد بود. با توجه به (۵) اگر از نویز صرف نظر کنیم، بردار y دریافتی متناسب با $\sum_{i=1}^{N_D} s_i h_{a_i}$ می‌باشد که به آن بردار ضرایب کانال معادل می‌گوییم. دقت نمایید که ضریب s_i همیشه ۱ است زیرا به دلیل آنچه قبلاً شرح داده بودیم فاز آنتن اول باید ثابت و برابر صفر باشد. تعداد بردارهای ضرایب کانال معادل ممکن با توجه به تعداد بیت‌های اضافی در مدولاسیون فضایی پیشرفته تعیین می‌شود. اگر این بردارها را با t_m بیان کنیم، این که کدام بردار، بردار معادل صحیح ما می‌باشد توسط تخمین اندیس این بردار به صورت زیر تعیین می‌شود

$$\hat{m} = \arg \max_m t_m^H y \quad (6)$$

لازم به ذکر است که برای به دست آوردن این اندیس، باید که در گیرنده t_m ها و بالتبع ماتریس گین کانال H معلوم باشد. بنابراین در گیرنده ابتدا

1. Maximum Likelihood
2. Decorrelator



شکل ۵: احتمال خطای سمبل مدولاسیون فضایی پیشرفته با ارسال ۷ bps/Hz در تنظیمات سخت‌افزاری متفاوت فرستنده (۵ آنتن فرستنده، تقسیم‌کننده توان ۱ به ۲، ۴ آنتن گیرنده و مدولاسیون اولیه ۸-QAM، ۴ آنتن فرستنده، تقسیم‌کننده توان ۱ به ۲، ۴ آنتن گیرنده و مدولاسیون اولیه ۱۶-QAM، ۳ آنتن فرستنده، تقسیم‌کننده توان ۱ به ۲، ۴ آنتن گیرنده و مدولاسیون اولیه ۳۲-QAM).

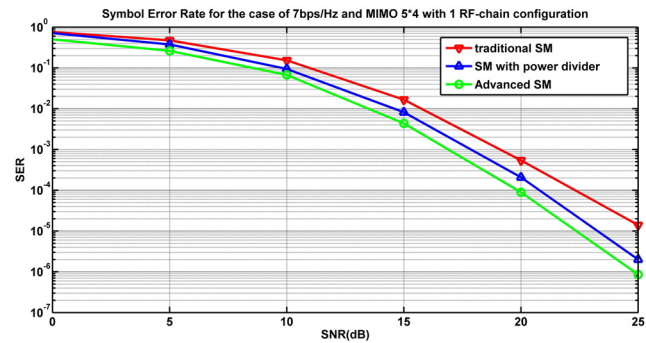
محدود می‌شود و کلاً احتمال خطا در تخمین اندیس آنتن‌های فعال با شیب $N_r - 1$ افت خواهد نمود. بنابراین در کل بهره گوناگونی در گیرنده ناهمبسته‌ساز $N_r - 1$ خواهد بود.

شکل ۵ عملکرد سیستم را برای پیاده‌سازی‌های مختلف در فرستنده نشان می‌دهد. ابتدا تعداد آنتن‌های فرستنده را ۵، تقسیم‌کننده توان ۱ به ۲، تعداد آنتن‌های گیرنده ۴ و از مدولاسیون اولیه ۱۶-QAM در فرستنده استفاده شده است. در این سیستم ۳ بیت در هر بار استفاده از کانال برای انتخاب آنتن‌های فعال و ۱ بیت نیز برای تعیین فاز آنتن دوم فعال استفاده می‌شود. بنابراین در این پیاده‌سازی در کل ۴ بیت در بعد فضا و ۴ بیت در بعد سیگنال ارسال خواهد شد. در پیاده‌سازی بعدی به جای ۵ آنتن در فرستنده از ۴ آنتن و به خاطر کاهش ۱ بیت از بیت‌های فضایی ارسالی، از مدولاسیون با مرتبه بالاتر ۳۲-QAM استفاده نموده‌ایم. پس در این سیستم ۳ بیت در بعد فضا و ۵ بیت در بعد سیگنال ارسال خواهد شد. در پیاده‌سازی بعدی تعداد آنتن‌های فرستنده را باز هم یک عدد کاهش داده‌ایم و دوباره برای جبران‌سازی کاهش نرخ ارسالی از مدولاسیون ۶۴-QAM بهره برده‌ایم. در این سیستم نیز ۲ بیت در بعد فضا و ۶ بیت در بعد سیگنال ارسال خواهد شد که در تمام حالت‌ها از گیرنده حداکثر احتمال استفاده کرده‌ایم.

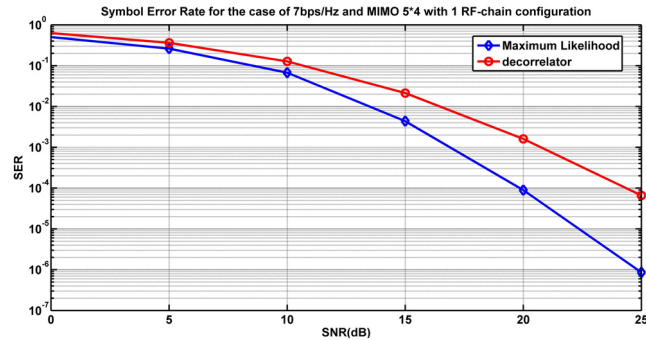
با دقت در نمودار شکل ۵ مشاهده خواهیم نمود که در سیگنال به نویزهای بالا احتمال خطای تشخیص بیت‌های فضایی کمتر از بیت‌های فضای سیگنال خواهد شد زیرا با افزایش تعداد آنتن‌های فرستنده و کاهش مرتبه مدولاسیون اولیه عملکرد سیستم بهبود خواهد یافت.

در شکل ۶ نیز مانند شکل ۵ عملکرد سیستم مدولاسیون فضایی پیشرفته را در تعداد مختلف بیت‌های فضایی و بیت‌های سیگنال اما با تعداد آنتن گیرنده کمتر، نشان داده‌ایم. در این شکل نیز مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد آنتن‌های فرستنده و کمتر کردن مرتبه مدولاسیون اولیه، عملکرد سیستم بهبود می‌یابد.

در شکل ۶ نسبت به شکل ۵ با افزایش تعداد آنتن‌های فرستنده از ۳ به ۵ و کاهش مرتبه مدولاسیون اولیه، عملکرد سیستم خیلی بهتر نشده است. دلیل این امر آن است که در شکل ۶ تعداد آنتن‌های گیرنده را ۲ و در شکل ۵ تعداد آنتن‌های گیرنده را ۴ در نظر گرفته‌ایم. زیرا اگر تعداد آنتن‌های گیرنده افزایش یابد، تشخیص جهت بیت‌های فضایی راحت‌تر صورت می‌گیرد و خطای کمتری در این بیت‌ها رخ خواهد داد. در شکل ۵ با افزایش تعداد آنتن‌ها از ۴ به ۵، بهبود زیادی را مشاهده نمی‌کنیم. این امر نیز نشان می‌دهد که هرچه تعداد آنتن‌های فرستنده را زیاد کنیم نباید



شکل ۳: احتمال خطای سمبل سیستم MIMO با ارسال ۷ bps/Hz با ۵ آنتن فرستنده و ۴ آنتن گیرنده و ۱ زنجیره RF با تکنیک‌های متفاوت مدولاسیون فضایی معمولی با مدولاسیون اولیه ۳۲-QAM و مدولاسیون فضایی همراه با تقسیم‌کننده توان ۱ به ۲ با مدولاسیون اولیه ۱۶-QAM و مدولاسیون فضایی پیشرفته با مدولاسیون اولیه ۸-QAM و گیرنده حداکثر احتمال.

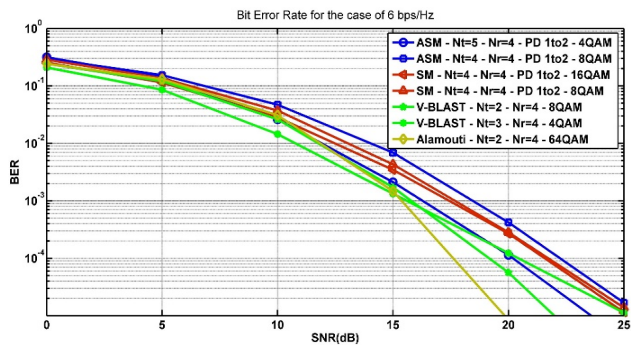


شکل ۴: مقایسه گیرنده پیشنهادی و گیرنده بهینه ML برای سیستم با ۵ آنتن فرستنده، ۴ آنتن گیرنده، تقسیم‌کننده توان ۱ به ۲ و مدولاسیون اولیه ۸-QAM.

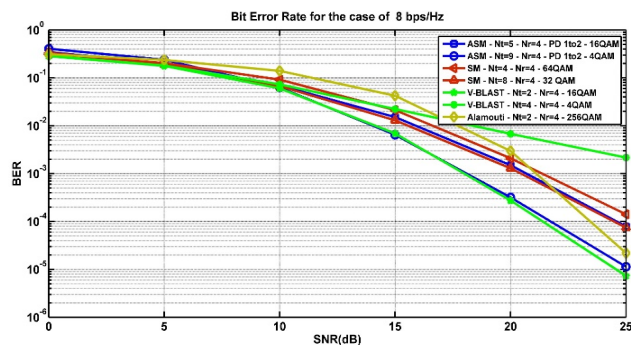
مدولاسیون فضایی با تقسیم‌کننده توان و مدولاسیون فضایی پیشرفته را با هم مقایسه نموده‌ایم. در تمام این سیستم‌ها بازدهی طیفی ۷ bps/Hz می‌باشد و از مدولاسیون اولیه M-QAM استفاده شده است. در مدولاسیون فضایی معمولی ۲ بیت در بعد فضا و ۵ بیت در بعد سیگنال ارسال می‌شود. اگر در سیستم پیشنهاد شده از تقسیم‌کننده توان ۱ به ۲ استفاده شود، به دلیل این که فرستنده ۵ آنتن دارد و در هر بار ارسال ۲ آنتن باید انتخاب شود، تعداد بیت‌هایی که در بعد فضا ارسال می‌شود برابر $\log_2 \binom{5}{2} = 3$ بیت است. ۴ بیت نیز در بعد سیگنال ارسال خواهد شد.

حال اگر سیستم مدولاسیون فضایی پیشرفته را در نظر بگیریم، مانند قبل ۳ بیت توسط انتخاب مجموعه آنتن‌های فعال و ۱ بیت از طریق انتخاب فاز آنتن دوم ارسال خواهد شد. در مجموع با ارسال کل ۴ بیت در بعد فضا و ۳ بیت در بعد سیگنال از این سیستم بهره برده‌ایم و در تمام حالت‌ها از گیرنده حداکثر احتمال استفاده کرده‌ایم. همان طور که در شکل ۳ مشخص است در احتمال خطای 10^{-3} سیستم مدولاسیون فضایی با تقسیم‌کننده توان نزدیک به ۱/۵ دسی‌بل و سیستم مدولاسیون فضایی پیشرفته ۲/۵ دسی‌بل نسبت به مدولاسیون فضایی معمولی بهره توان دارد.

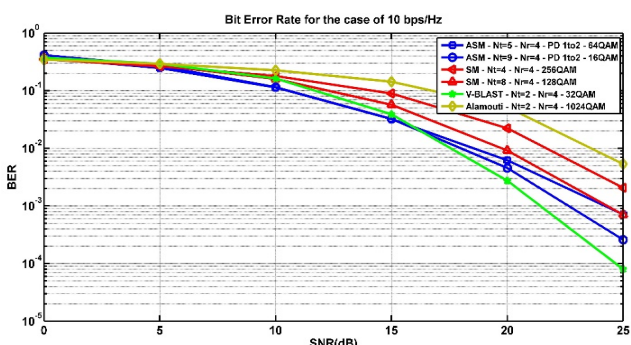
در شکل ۴ می‌توانید عملکرد گیرنده ساده پیشنهادی بر پایه ناهمبسته‌ساز را با گیرنده حداکثر احتمال برای سیستم مدولاسیون فضایی پیشرفته مقایسه کنید. همان طور که از شکل پیداست، در احتمال خطای 10^{-3} عملکرد گیرنده ناهمبسته‌ساز حدود ۴ دسی‌بل بدتر است. این بدتر شدن عملکرد به این خاطر است که درجه گوناگونی در گیرنده ساده ۳ است، حال آن که در گیرنده حداکثر احتمال درجه گوناگونی ۴ می‌باشد. در حقیقت در گیرنده ناهمبسته‌ساز بهره گوناگونی توسط تخمین اندیس آنتن



شکل ۸: مقایسه عملکرد سیستم مدولاسیون فضایی پیشرفته با مدولاسیون فضایی، V-BLAST و کد الموتی به طوری که تعداد آنتن‌های گیرنده ۴ و بازدهی طیفی ۶ bps/Hz

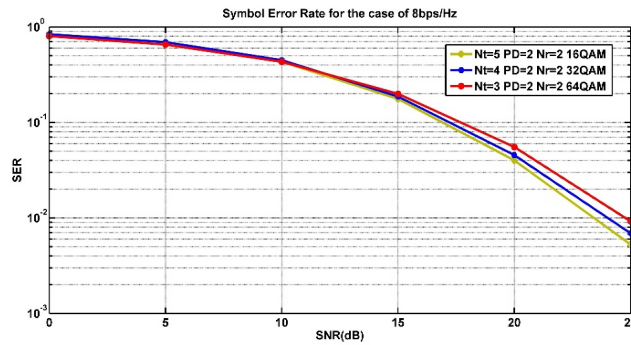


شکل ۹: مقایسه عملکرد سیستم مدولاسیون فضایی پیشرفته با مدولاسیون فضایی، V-BLAST و کد الموتی به طوری که تعداد آنتن‌های گیرنده ۴ و بازدهی طیفی ۸ bps/Hz

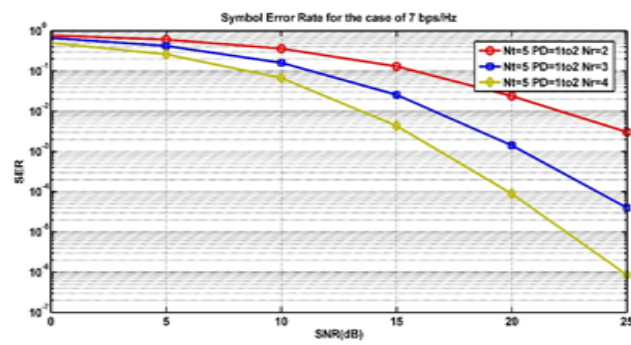


شکل ۱۰: مقایسه عملکرد سیستم مدولاسیون فضایی پیشرفته با مدولاسیون فضایی، V-BLAST و کد الموتی به طوری که تعداد آنتن‌های گیرنده ۴ و بازدهی طیفی ۱۰ bps/Hz

طیفی عملکرد کد الموتی از بقیه سیستم‌ها بدتر شده که دلیل این امر آن است که در نرخ‌های ارسال بالا سیستم کد الموتی لازم است که از منظومه‌های با اندازه‌های بسیار بزرگ استفاده شود. اما هرچه نرخ ارسالی بالاتر می‌رود عملکرد سیستم‌های V-BLAST و مدولاسیون فضایی پیشرفته نسبت به کدهای فضا-زمان عملکرد بهتری را از خود نشان خواهند داد. همچنین عملکرد سیستم مدولاسیون فضایی پیشرفته با سیستم V-BLAST در رقابت است. البته این در حالی است که در سیستم مدولاسیون فضایی پیشرفته تعداد زنجیره‌های RF فقط ۱ عدد است اما در سیستم V-BLAST به تعداد آنتن‌های فرستنده باید زنجیره RF داشته باشیم. همچنین سیستم مدولاسیون فضایی پیشرفته برای هر پیکربندی متفاوت تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده می‌تواند استفاده شود ولی در سیستم V-BLAST تعداد آنتن‌های گیرنده حتماً باید برابر یا بیشتر از تعداد آنتن‌های فرستنده باشد.



شکل ۶: احتمال خطای سمبل سیستم مدولاسیون فضایی پیشرفته با ارسال ۸ bps/Hz در تنظیمات سخت افزاری متفاوت فرستنده (۵ آنتن فرستنده، تقسیم‌کننده توان ۱ به ۲، ۲ آنتن گیرنده و مدولاسیون QAM-۱۶، ۴ آنتن فرستنده، تقسیم‌کننده توان ۱ به ۲، ۲ آنتن گیرنده و مدولاسیون QAM-۳۲، ۳ آنتن فرستنده، تقسیم‌کننده توان ۱ به ۲، ۲ آنتن گیرنده و مدولاسیون QAM-۶۴) گیرنده حداکثر احتمال.



شکل ۷: احتمال خطای سمبل در سیستم مدولاسیون فضایی پیشرفته با ۷ bps/Hz و تعداد ۵ آنتن فرستنده، تقسیم‌کننده توان ۱ به ۲ و تعداد آنتن‌های گیرنده ۲، ۳ و ۴-گیرنده حداکثر احتمال.

خیلی انتظار بهبود زیادی را داشته باشیم، بلکه بهبود در عملکرد سیستم با افزایش تعداد آنتن‌های فرستنده، وابسته به تعداد آنتن‌های گیرنده نیز خواهد بود. دلیل این امر آن است که آنتن‌های گیرنده در واقع تعداد ابعاد جهت‌های بردارهای دریافتی از آنتن‌های مختلف فرستنده را نشان می‌دهد. بنابراین با محدود بودن ابعاد فضا و زیاد کردن بردارها، تداخل بیت‌های فضایی در هم بیشتر شده و عملکرد سیستم را محدود خواهد نمود. همان طور که در شکل‌های بالا می‌بینید در سیگنال به نوبه‌های پایین افزایش تعداد آنتن‌های فرستنده نه تنها عملکرد را بهبود بخشیده است بلکه اندکی نیز آن را بدتر کرده است.

در نمودار شکل ۷ تعداد آنتن‌های گیرنده را تغییر داده‌ایم و اثر آن را بر عملکرد سیستم مشاهده می‌نماییم. همان طور که می‌بینید عملکرد سیستم با افزایش تعداد آنتن‌های گیرنده بهبود خواهد یافت. حال اگر شیب احتمال خطا را در سیگنال به نوبه‌های بالا محاسبه کنیم، متوجه می‌شویم که شیب نمودار خطا در گیرنده حداکثر احتمال با ۲ آنتن گیرنده تقریباً ۲، با ۳ آنتن تقریباً ۳ و با ۴ آنتن تقریباً ۴ خواهد شد. در واقع این شکل بیان‌کننده این است که بهره گوناگونی در سیستم پیشنهادی در گیرنده حداکثر احتمال برابر تعداد آنتن‌های گیرنده خواهد بود.

در شکل‌های ۸ تا ۱۰ می‌توانیم مقایسه‌ای را بین سیستم‌های مختلف مدولاسیون فضایی پیشرفته، مدولاسیون فضایی، V-BLAST و کد الموتی مشاهده نماییم. با توجه به عملکرد سیستم‌های مختلف می‌توانیم این نتیجه را بگیریم که مدولاسیون فضایی پیشرفته نسبت به مدولاسیون فضایی بهتر عمل می‌کند. با افزایش تعداد آنتن‌های فرستنده در سیستم V-BLAST به دلیل افزایش پدیده تداخل هم‌کانالی عملکرد سیستم محدود خواهد شد. همان طور که در شکل‌ها می‌بینید با افزایش بازدهی

- [12] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2005.
- [13] P. Yang, Y. Xiao, Y. Yu, and S. Li, "Adaptive spatial modulation for wireless MIMO transmission systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 15, no. 6, pp. 602-604, Jun. 2011.
- [14] R. Rajashekar, K. V. S. Hari, and L. Hanzo, "Antenna selection in spatial modulation systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 17, no. 3, pp. 521-524, Mar. 2013.
- [15] R. Mesleh, S. S. Ikki, and H. M. Aggoune, "Quadrature spatial modulation," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 6, pp. 2738-2742, Jun. 2015.
- [16] A. Younis, R. Mesleh, and H. Haas, "Quadrature spatial modulation over Nakagami-m fading channel," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 12, pp. 10227-10231, Dec. 2016.
- [17] N. Ishikawa, R. Rajashekar, S. Sugiura, and L. Hanzo, "Generalized spatial modulation based reduced-RF-chain millimeter-wave communications," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 1, pp. 879-883, Jan. 2017.
- [18] A. Stavridis, S. Sinanovic, M. Di Renzo, H. Haas, and P. Grant, "An energy saving base station employing spatial modulation," in *Proc. IEEE 17th Int. Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks, CAMAD'12*, pp. 231-235, Barcelona, Spain, 17-19 Sept. 2012.
- [19] E. Basar, U. Aygolu, E. Panayirci, and H. V. Poor, "Performance of spatial modulation in the presence of channel estimation error," *IEEE Communications Letter*, vol. 16, no. 2, pp. 176-179, Feb. 2012.

علی اعظم عباسفر تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی (با درجه ممتاز) و کارشناسی ارشد مهندسی برق در دانشگاه تهران به ترتیب در سال های ۱۳۷۱ و ۱۳۷۴ و دکتری تخصصی مهندسی برق در دانشگاه کالیفرنیا لس آنجلس (UCLA) در سال ۱۳۸۴ به پایان رساند. بین سال های ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۳ وی به عنوان مهندس طراح ارشد در چند شرکت استارتاپ در حوزه طراحی دیجیتال سامانه های مخابراتی در کالیفرنیا مشغول به فعالیت بود. پس از فارغ التحصیلی از دانشگاه UCLA وی به شرکت Rambus پیوست که در آنجا به عنوان مهندس اصلی، به فعالیت در زمینه مخابره داده با سرعت بالا بر روی لینک های سیمی سری و موازی پرداخت. در سال ۱۳۸۸ به دانشگاه تهران پیوست که هم اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران می باشد.

دکتر عباسفر مولف بیش از ۸۰ مقاله ژورنال و کنفرانس و نیز یک کتاب تحت عنوان "کدهای توربو: طراحی برای کدگشایی با سرعت بالا" به زبان انگلیسی و نیز دارای بیش از ۳۰ اختراع ثبت شده بین المللی می باشد. همچنین وی برنده جایزه مقاله برگزیده انجمن های مخابرات و نظریه اطلاعات در IEEE در سال ۲۰۰۷ شده است. زمینه های اصلی تحقیقاتی ایشان شامل مخابرات بی سیم و پردازش سیگنال برای سیستم های مخابراتی می باشند.

حسن تفرشیان در سال ۱۳۹۳ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیر و در سال ۱۳۹۶ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی سیستم های مخابراتی خود را از دانشگاه تهران دریافت نمود. زمینه های علمی مورد علاقه نام برده شامل سیستم های مخابرات بی سیم، MIMO، همسان سازها و تشخیص الگو است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، تکنیک جدیدی برای استفاده در سیستم های MIMO با نام مدولاسیون فضایی پیشرفته معرفی شده است. در مدولاسیون فضایی پیشرفته با استفاده از تقسیم کننده توان می توانیم تعداد بیشتری از آنتن ها را در یک لحظه فعال نگاه داریم. همچنین با تخصیص بیت هایی برای انتخاب فاز آنتن های فعال می توانیم تعداد بیت های بیشتری اطلاعات را در بعد فضا ارسال کنیم. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که سیستم پیشنهادی نسبت به مدولاسیون فضایی معمولی تقریباً ۲/۵ dB بهره توان دارد. همچنین عملکرد سیستم مدولاسیون فضایی پیشرفته با این که فقط یک زنجیره RF دارد، در مقایسه با عملکرد سیستم های چندگانگی فضایی مانند V-BLAST قابل رقابت خواهد بود.

مراجع

- [1] R. Y. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovic, C. W. Ahn, and S. Yun, "Spatial modulation," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 4, pp. 2228-2241, Jul. 2008.
- [2] J. Jeganathan, A. Ghrayeb, L. Szczecinski, and A. Ceron, "Space shift keying modulation for MIMO channels," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 8, no. 7, pp. 3692-3703, Jul. 2009.
- [3] S. Sugiura, S. Chen, and L. Hanzo, "A unified MIMO architecture subsuming space shift keying, OSTBC, BLAST and LDC," in *Proc. IEEE 72nd Vehicular Technology Conf.-Fall*, 5 pp., Ottawa, Canada, 6-9 Sept. 2010.
- [4] R. Mesleh, S. S. Ikki, and H. M. Aggoune, "Quadrature spatial modulation," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 6, pp. 2738-2742, Jun. 2015.
- [5] J. Jeganathan, A. Ghrayeb, and L. Szczecinski, "Spatial modulation: optimal detection and performance analysis," *IEEE Communications Letters*, vol. 12, no. 8, pp. 545-547, Aug. 2008.
- [6] J. Wang, S. Jia, and J. Song, "Generalised spatial modulation system with multiple active transmit antennas and low complexity detection scheme," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 11, no. 4, pp. 1605-1615, Apr. 2012.
- [7] T. Datta and A. Chockalingam, "On generalized spatial modulation," in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conf., WCNC'13*, pp. 2716-2721, Shanghai, China, 7-10 Apr. 2013.
- [8] M. Rahman, R. Ramirez-Gutierrez, T. A. Tetzlaff, and F. Sheikh, "Generalised spatial modulation with LR-aided K-best decoder for MIMO systems," *Signal Processing: An International J.*, vol. 12, no. 1, pp. 1-18, Apr. 2018.
- [9] A. Younis, S. Sinaovic, M. Di Renzo, R. Mesleh, and H. Haas, "Generalised sphere decoding for spatial modulation," *IEEE Trans. on Communication*, vol. 16, no. 7, pp. 2805-2816, Jul. 2013.
- [10] C. Li, Y. Huang, M. Di Renzo, J. Wang, and Y. Cheng, "Low-complexity ML detection for spatial modulation MIMO with APSK constellation," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 9, pp. 4315-4321, Sep. 2015.
- [11] C. M. Yu, *et al.*, "Compressed sensing detector design for space shift keying in MIMO systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 10, pp. 1556-1559, Oct. 2012.