

همسوسازی تداخل فرصت طلب در شبکه‌های رادیوشناخت گر با ارسال کد فضا- زمان کاربران ثانویه

مرضیه نظام‌آبادی^۱، کارشناس ارشد؛ ابوالفضل فلاحتی^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران - m_nezamabadi@elec.iust.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران - afalahati@iust.ac.ir

چکیده: رشد تقاضا برای دسترسی به طیف فرکانسی، منجر به پیدایش شبکه‌های رادیوشناخت گر شده است. به‌طوری‌که در کنار کاربر اولیه، به کاربران ثانویه اجازه داده می‌شود که از بخش‌های بلا استفاده طیف استفاده کنند. با فرض اینکه کاربر اولیه از تمامی طیف فرکانسی خود استفاده کند، در فضای برداری فضای بلا استفاده خواهد داشت. این ایده اخیراً مورد توجه قرار گرفته است و طرح همسوسازی تداخل در شبکه‌های رادیوشناخت گر مطرح شد. در این طرح با توجه به محدودیتی که در توان ارسالی وجود دارد کاربر اولیه با استفاده از الگوریتم واترفیلینگ تعدادی از رسته‌های فضایی را بدون استفاده رها می‌کند حال کاربران ثانویه با طراحی پریکدر، علاوه بر اینکه سیگنال خود را در زیرفضای حاصل از بردارهای ویژه بلا استفاده کاربر اولیه جهت‌دهی می‌کنند، تداخل ناشی از دیگر کاربران ثانویه را در گیرنده‌های خود هم‌سو می‌کنند. به این ترتیب، فضای بیش‌تری برای هر کاربر باقی خواهد ماند که در حالت ایده‌آل برابر با نیمی از کل فضای سیگنال هر کاربر است. در این مقاله به منظور کارایی بهتر کاربران ثانویه، از کدهای فضا-زمان برای ارسال سیگنال کاربران ثانویه بهره گرفته شده است به‌طوری‌که با کاهش تعداد آنتن‌های کاربران ثانویه، میزان تداخل بعد از به کار بستن تکنیک همسوسازی تداخل صفر نمی‌شود که این تداخل با ساختار الموتی و ایجاد زیرفضای متعامد در حوزه زمان حذف شده است. در این مقاله، دو کاربر ثانویه در باند فرکانسی مشابه به صورت فرصت طلب به ارسال اطلاعات در زیرفضای مجاز می‌پردازند. هدف طراحی پریکدرهایی است که تداخل هر کاربر ثانویه را حذف کند به‌طوری‌که کاربران ثانویه در زیر فضای عمود بر هم به ارسال اطلاعات می‌پردازند در نتیجه هر کاربر در زیر فضای متعامد اطلاعات را دریافت و بدون تداخل ناشی از کاربر ثانویه دیگر آشکارسازی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: همسوسازی تداخل، شبکه‌های رادیوشناخت گر، کد فضا-زمان، درجه آزادی، حذف تداخل.

Opportunist Interference Alignment in Cognitive Network by Secondary Users to Transmit STBC

M. Nezamabadi¹, MSc; A. Falahati², Associate Professor

1- Electrical Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: m_nezamabadi@elec.iust.ac.ir

2- Electrical Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: afalahati@iust.ac.ir

Abstract: Growing demand to access frequency spectrum, cognitive radio is introduced so that the secondary users (SU) are allowed to use unused spectrum of primary user. If the primary user (PU) uses the full frequency spectrum, the existing unused spectrum in space-domain can create ideal opportunistic interference alignment considering cognitive networks. Since the PU knows perfect channel knowledge, it can perform water-filling algorithm and singular value decomposition, then secondary users transmit along the spatial direction with the design pre-coder. In this paper, we improve the efficiency of the system with a transmit space-time coding technique introduced by Alamouti. In this regard, the SU transmit and receive antennas are reduced and after performing interference alignment algorithm, but the interference does not becomes exactly zero. In fact, to remove this interference, SU transmits Alamouti code. In this paper, we consider the case of two secondary users opportunistically exploiting the same frequency band utilized by a licensed user. Our goal is to design low-complexity precoders to realize interference cancellation for each secondary user. The main idea is to design precoders such that the two users transmit over two orthogonal spaces. As a result, the decoders can project the received signals to each of the orthogonal spaces and decode the information of each user without any interference from the other user.

Keywords: Interference alignment, cognitive network, space-time code, interference cancellation, degree of freedom.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۲۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۰۷

نام نویسنده مسئول: ابوالفضل فلاحتی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - میدان رسالت - خیابان هنگام - خیابان دانشگاه - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی برق.

۱- مقدمه

زمانی که چند زوج فرستنده و گیرنده مخابراتی بی سیم در حال ارسال اطلاعات از یک محیط مخابراتی می باشند، تداخل نقش محدودکننده را در ارسال اطلاعات بازی می کند. در نتیجه مدیریت تداخل در شبکه بی سیم یک نیاز اساسی به شمار می رود که منجر به تحقیقات گسترده با هدف طراحی سازوکارهای کارآمد جهت حذف یا کاهش اثر تداخل شده است. در سال های اخیر، محققین نظریه اطلاعات تحقیقات وسیعی به منظور ارزیابی اثر تداخل بر روی ظرفیت کانال بی سیم انجام داده اند که تاکنون، راهکارهای متفاوتی برای مقابله با تداخل در شبکه های بی سیم پیشنهاد و اجرا شده است.

در راستای مدیریت تداخل و سپس پیدایش سیستم های چندآنتنی، الموتی کد فضا-زمانی مطرح کرد [۱] که هم به نرخ کامل و هم دایورسیتی کامل دست یافت و در عین حال پیچیدگی کمی داشت. بعد از معرفی کد فضا-زمان توسط الموتی اولین تکنیک حذف تداخل بر اساس کدهای بلوکی توسط تاریخ مطرح شد [۲]. اخیراً روش آشکارسازی چندکاربره با ساختار گیرندگی ساده مورد توجه قرار گرفته است، در همین راستا و در سناریوی چند آنتنی در دسترسی های چندگانه کانال، زمانی که کاربرها از دیگر کانال ها باخبر هستند، می توان پریکداری با بهره گیری از اطلاعات کانال برای حذف تداخل در گیرنده بدون از دست دادن دایورسیتی یا پیچیدگی سیستم طراحی کرد [۳].

ایده دیگری که در زمینه کاهش اثر تداخل مطرح شده است و نسبت به بقیه از بیش ترین ظرفیت کانال استفاده می کند همسوسازی تداخل می باشد. در همسوسازی تداخل کاربران شبکه، سیگنال ارسالی خود را به نحوی شکل دهی می کنند که تداخل ناشی از آن ها در فضایی عمود بر فضای سیگنالینگ مطلوب گیرنده قرار گیرد. با پیاده سازی این ایده، تداخل های دریافتی در یک گیرنده خاص، از لحاظ فضایی با یکدیگر همسو شده و اثر تداخلگرهای متمایز در هر گیرنده معادل با اثر یک تداخلگر تنها خواهد بود. همسو کردن سیگنال تداخلی همه تداخلگرها در بخشی از زیرفضای موجود، باعث می شود زیرفضای باقی مانده که نصف فضای سیگنال دریافتی است، یک زیرفضای بدون تداخل بوده و به سیگنال مطلوب اختصاص داده شود. به این ترتیب یک زوج فرستنده-گیرنده خواهند توانست در زیرفضایی خالی از تداخل با یکدیگر ارتباط برقرار نمایند [۴].

در پی موفقیت های اولیه روی کانال های تداخلی X ، همسوسازی تداخل برای شبکه های سلولی [۵] و برای شبکه های رله چندورودی-چندخروجی دوطرفه (کانال Y) [۶] همچنین برای شبکه های تداخلی محوشوندگی ارگادیک [۷] مطرح شد و برای شبکه های تداخلی با محدودیت امنیتی [۸] توسعه یافت و همسوسازی تداخل در حوزه فضا-فرکانس در [۹] مورد مطالعه قرار گرفته است و در مورد تحقق پذیری آن در یک شبکه k کاربر بحث شده است.

مفهوم همسوسازی فرصت طلبانه تداخل در شبکه های رادیوشناختگر اولین بار توسط پرلازا در سال ۲۰۰۸ مطرح شد [۱۰]. در

این مقاله یک تکنیک غیرمشارکتی ارائه می شود که امکان دسترسی فرصت طلبانه را برای کاربران شبکه های چند ورودی-چند خروجی که بدون ایجاد مزاحمت در کنار یک کاربر اولیه و در یک باند فرکانسی مشترک فعال هستند، فراهم می آورد. این ایده توسط امیر از دیدگاه تئوری اطلاعات مورد بررسی قرار گرفت در این مقاله حد بالایی برای درجات آزادی قابل دستیابی توسط کاربر ثانویه ارائه شد [۱۱].

در همه این مقاله ها ایده همسوسازی تداخل در شبکه های رادیوشناختگر برای به کارگیری راستای فضایی بدون استفاده کاربر اصلی پیشنهاد شده است که به کاربران ثانویه اجازه می دهد در فرکانس مشابه کاربر اصلی، سیگنال خود را در جهت ابعاد بدون استفاده کاربر اصلی هدایت کنند. اگر فرستنده سیستم اولیه با نرخ ماکزیمم به ارسال اطلاعات بپردازد، محدودیتی که در توان وجود دارد منجر به رها کردن تعدادی از راستاهای فضایی می شود سپس کاربران ثانویه از این راستای فضایی بدون استفاده در همان باند فرکانسی به ارسال اطلاعات می پردازند. با طراحی پریکدرهایی به طور مشترک برای کاربران ثانویه این کار انجام می شود به طوری که در گیرنده اول تداخل نداشته باشند و در عین حال گیرنده های ثانویه با گیرنده اولیه و دیگر کاربران ثانویه تداخل نداشته باشند.

در جهت کاهش تداخل در شبکه های مخابراتی تکنیک های حذف و همسوسازی تداخل مطرح شد ایده جدیدی که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. تلفیق تکنیک های حذف و همسوسازی تداخل است که در این زمینه دو دیدگاه مطرح است. در دیدگاه اول، در سمت فرستنده ها از طرح همسوسازی تداخل استفاده می شود و در سمت گیرنده با مشارکت بین گیرنده ها تداخل های اضافه حذف می گردد، به طوری که در سمت گیرنده سیگنال آشکار شده و به باقی گیرنده های ارسال می شود، باقی گیرنده ها سیگنال دریافتی را از فضای سیگنال دهی خود حذف می کنند و سیگنال مطلوب آشکار می شود. [۱۲-۱۷]. این دیدگاه در مقاله [۱۸] برای شبکه های رادیوشناختگر بیان شده است.

دیدگاه دوم استفاده از کدهای فضا-زمان برای حذف سیگنال های تداخلی است [۱۹، ۲۰] و تلفیق این دو ایده که در مقاله [۲۱] به آن پرداخته شده است.

در مقاله حاضر طرح همسوسازی تداخل در شبکه های رادیوشناختگر با یک کاربر اصلی و دو کاربر ثانویه انجام شده است؛ به طوری که هر کاربر ثانویه دارای درجه آزادی دو است. در ابتدا طراحی ماتریس های پریکدر برای کاربران طوری انجام می شود که کاربر اولیه بتواند بدون در نظر گرفتن کاربران ثانویه به ارسال اطلاعات بپردازد و همچنین هر کاربر ثانویه تداخلی بر دیگر کاربر ثانویه نداشته باشد. این طراحی با استفاده از الگوریتم واترفیلینگ برای کاربر اولیه و الگوریتم تکرارشونده همسوسازی تداخل برای کاربران ثانویه امکان پذیر است. حال با کاهش تعداد آنتن های کاربران ثانویه میزان تداخل کاربران ثانویه صفر نمی شود که در این مقاله با ارسال کد الموتی و طراحی پریکدر برای ایجاد ساختار متعامد اطلاعات ارسال و در سمت فرستنده کدگذاری

اصلی H_{00} در فرستنده و گیرنده مطلع است. در نتیجه کاربر اصلی ماتریس پریکدر V_0 را در فرستنده و ماتریس پسکدر U_0 را در گیرنده طراحی می کند به طوری که ماتریس کانال انتقال کاربر اولیه قطری شود. تجزیه مقدار ویژه ماتریس کانال H_{00} به صورت $H_{00} = \tilde{U}_0 \Lambda_0 \tilde{V}_0^H$ است به طوری که Λ_0 ماتریس قطری با ابعاد $M_0 \times N_0$ و با درایه های λ_i است. فرستنده (گیرنده) ماتریس پریکدر (پسکدر) خودش را بر اساس ستون های ماتریس $\tilde{V}_0^H$ (و مرتبط با ماتریس تخصیص توان انتخاب می کند. تخصیص بهینه توان با الگوریتم واترفیلینگ انجام می شود، به طوری که در راستاهایی که توان سمبل قابل ملاحظه است (با توجه به سطح توان β_0) اطلاعات ارسال می شود و باقی فضاها، رها شده و سیگنالی ارسال نمی شود.

$$P_{0,i}(n) = \left(\beta_0 - \frac{\sigma_0^2}{\lambda_{(n-1)L+1}^2} \right)^+ \quad (2)$$

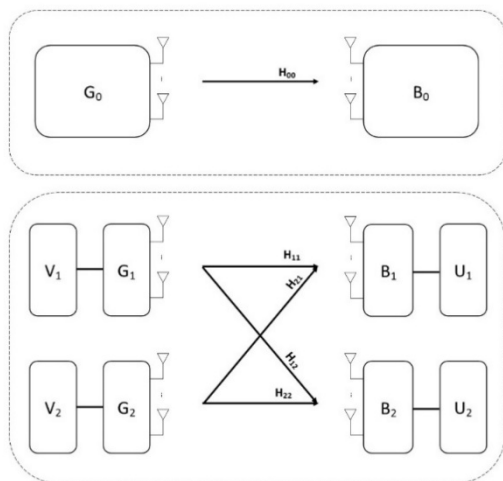
کاربر ثانویه با ارسال در این فضای رها شده، از این فضا استفاده می کند به این منظور ماتریس های G_i و B_i به ترتیب در فرستنده و گیرنده کاربران ثانویه ضرب می شود تا فضای کاربران ثانویه در فضای تهی کاربر اولیه قرار گیرد ماتریس های مذکور به این صورت تعریف می شود:

$$U_0^H H_{0i} G_i = 0_{d_0 \times (M_i - d_0)} \quad (3)$$

$$B_i^H H_{i0} V_0 = 0_{(N_i - d_0) \times d_0} \quad (4)$$

که ماتریس $0_{i \times j}$ یک ماتریس تهی با درایه های صفر و با ابعاد $i \times j$ می باشد.

اگر فضایی که کاربر اولیه به ارسال اطلاعات می پردازد از فضای کاربران ثانویه حذف شود، سیستم، معادل این است که از تعداد آنتن های کاربران ثانویه، تعداد درجه آزادی کاربر اولیه حذف شود، سیستم معادل در شکل ۲ آورده شده است به طوری که تعداد آنتن های فرستنده و گیرنده کاربران ثانویه به ترتیب $M_i - d_0$ و $N_i - d_0$ است.



شکل ۲: سیستم معادل بعد از طراحی لینک اصلی

۲-۲- لینک ثانویه

ایده اصلی طرح کاربران ثانویه انتخاب ماتریس پریکدر در فرستنده های ثانویه است به طوری که بردار سیگنال دریافتی را در گیرنده اصلی به دور

می شود. مشاهده می شود در شبکه ثانویه در مقایسه با طرح همسوسازی تداخل فرصت طلب می توان با تعداد آنتن کمتر به احتمال خطای کمتر و دایورسیتی بیشتری دست یافت.

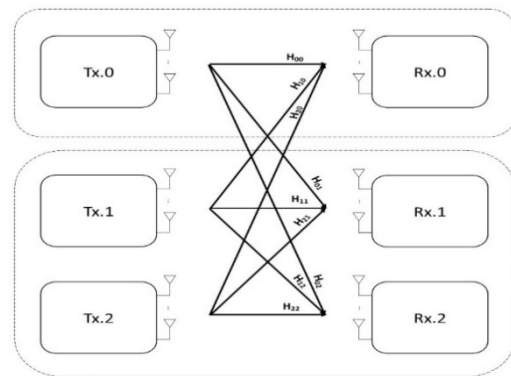
در ادامه، ماتریس ها و بردارها به ترتیب با حروف بزرگ برجسته و حروف کوچک برجسته نمایش داده می شوند. ماتریس صفر با ابعاد $m \times n$ به صورت $0_{m \times n}$ نمایش داده خواهد شد. همچنین، $\text{rank}\{A\}$ و A^H به ترتیب مرتبه ماتریس و تبدیل هرمیشن ماتریس A را نشان می دهند.

۲- مدل سیستم

مطابق شکل ۱، کانال تداخلی ۳ کاربره با یک کاربر اصلی و دو کاربر ثانویه در نظر گرفته می شود به طوری که فرستنده i ام فقط گیرنده i ام را برای ارسال اطلاعات مورد هدف قرار می دهد. کاربر i ام به ترتیب دارای N_i و M_i آنتن فرستنده و گیرنده هستند.

ماتریس کانال بین فرستنده i ام و گیرنده j ام به صورت H_{ij} بوده که ماتریسی با ابعاد $N_i \times M_j$ است و دارای توزیع پیوسته و یکسان و مستقل با میانگین صفر و انحراف معیار واحد می باشند. فرض می شود ضرایب کانال در طول ارسال سمبل ثابت است و اطلاعات کانال در تمامی گره ها موجود است. Z_i بردار نویز گوسی جمع شونده با ابعاد $1 \times N_i$ بوده که دارای ماتریس انحراف معیار $\sigma_i^2 I_{N_i}$ است.

x_j بردار سمبل های ارسالی است که دارای ابعاد $d_j \times 1$ است. V_i ماتریس پریکدر با ابعاد $d_i \times M_i$ است. سیگنال دریافتی در i امین گیرنده به وسیله ماتریس پسکدر U_i با ابعاد $N_i \times d_i$ پردازش می شود و سمبل های ارسالی از فرستنده i ام استخراج می شود.



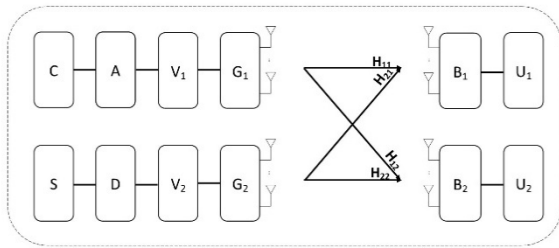
شکل ۱: مدل سیستم

سیگنال دریافتی در هر گیرنده برابر است با:

$$y_i = \sum_{j=0}^K H_{ij} V_j x_j + z_i \quad (1)$$

۲-۱- لینک اولیه

مطابق مرجع [۱۰] کاربر اولیه بدون در نظر گرفتن کاربران ثانویه باید به ارسال اطلاعات بپردازد و به دلیل محدودیت در توان، تعدادی از فضاهای کاربر اولیه بدون استفاده باقی می ماند. کاربر اصلی از ماتریس کانال



شکل ۳: شبکه تداخلی کاربران ثانویه

که A و D ماتریس‌های پریکدر هستند که برای متعامد کردن سیگنال در حوزه زمان طراحی می‌شود و C و S ماتریس‌های ارسال کد الموتی هستند. برای سهولت در روند انجام کار ماتریس‌های زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} H &= V_1 G_1 H_{11} B_1 U_1 \\ G &= V_2 G_2 H_{22} B_2 U_2 \\ N &= V_2 G_2 H_{22} B_2 U_2 \\ M &= V_1 G_1 H_{11} B_2 U_2 \end{aligned} \quad (۸)$$

و داریم:

$$\begin{aligned} H &= \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{pmatrix} \\ M &= \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}, \quad N = \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} \\ n_{21} & n_{22} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (۹)$$

در دو بازه زمانی اول، کاربر ۱ و ۲ کد الموتی ارسال می‌کنند.

$$C = \begin{pmatrix} c_1 & -c_2^* \\ c_1 & c_1^* \end{pmatrix}, \quad S = \begin{pmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_1 & s_1^* \end{pmatrix} \quad (۱۰)$$

فرض شده است که فرستنده و گیرنده اطلاعات کانال را به‌طور کامل

دارند. پریکدر کاربر ۱ در زمان ۱ و ۲ به ترتیب به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$A^1 = \begin{pmatrix} a_{11}^1 & a_{12}^1 \\ a_{21}^1 & a_{22}^1 \end{pmatrix}, \quad A^2 = \begin{pmatrix} a_{11}^2 & a_{12}^2 \\ a_{21}^2 & a_{22}^2 \end{pmatrix} \quad (۱۱)$$

پریکدر کاربر ۲ در زمان ۱ و ۲ به ترتیب به‌صورت زیر نشان داده می‌شود.

$$D^1 = \begin{pmatrix} d_{11}^1 & d_{12}^1 \\ d_{21}^1 & d_{22}^1 \end{pmatrix}, \quad D^2 = \begin{pmatrix} d_{11}^2 & d_{12}^2 \\ d_{21}^2 & d_{22}^2 \end{pmatrix} \quad (۱۲)$$

با فرض اینکه $\|A^i\|_F^2 = \|D^i\|_F^2 = 1, i = 1, 2$ ، شرایط نرمالیزه

بودن پریکدرها محقق می‌شود. هدف طراحی پریکدر با پیچیدگی کم

برای تحقق بخشیدن حذف تداخل برای هر کاربر است. ایده اصلی

طراحی پریکدر به‌صورتی است که دو کاربر در دو فضای عمود بر هم در

حوزه زمان اطلاعات خود را ارسال کنند در نتیجه آشکارساز می‌تواند

سیگنال دریافتی در هر فضای متعامد را طرح‌ریزی کند و اطلاعات بدون

تداخل هر کاربر را از دیگر کاربران آشکار کند.

از آنجا که مراحل طراحی پریکدر و آشکارسازی برای کاربر ۱ و ۲ مشابه

هم است لذا روند حل مسئله فقط برای کاربر اول نوشته می‌شود.

مراحل طراحی پریکدر را به شرح زیر است:

در بازه زمانی ۱ و ۲، خروجی گیرنده اول به‌صورت زیر بازنویسی

می‌شود:

$$y_1^1 = \bar{H}A^1 \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} + \bar{G}B^1 \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} + n_1 \quad (۱۳)$$

$$y_1^2 = \sqrt{E_s} \bar{H}A^2 \begin{pmatrix} c_2^* \\ -c_1^* \end{pmatrix} + \sqrt{E_s} \bar{G}B^2 \begin{pmatrix} s_2^* \\ -s_1^* \end{pmatrix} + n_2 \quad (۱۴)$$

از مقادیر ویژه گیرنده اصلی همسو کند. بنابراین کاربران ثانویه تداخلی در لینک اصلی ایجاد نمی‌کند.

به‌طور کلی با در نظر گرفتن شرط لازم و ضروری عدم ایجاد هرگونه

تداخل و مزاحمت برای کاربران غیرخودی، در طراحی ماتریس‌های

پریکدر و آشکارساز مربوط به کاربران، شرط‌های زیر باید برآورده شوند:

$$U_j^H H_{ij} V_i = 0 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (۵)$$

$$\text{rank} \{U_j^H H_{ij} V_j\} = d_j \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (۶)$$

شرط اول به معنی عدم تأثیرگذاری مخرب کاربران روی هم و شرط

دوم به معنی تأمین درجه آزادی d_j موردنظر هر کاربر است.

در این ارتباط، ترس و گالود در [۲۲] نشان دادند که چنانچه

ماتریس‌های کانال H_{ij} از مرتبه کامل باشند، شرط

شرط اول به معنی $\{rank\{U_i^H H_{ii} V_i\} = d_i\}_{i=1}^K$ برقرار است و تنها کافی است برقراری

شرط اول بررسی شود.

در مقاله [۲۲] روشی تکراری برای به دست آوردن ماتریس‌های

پریکدر و پسکدر ارائه شده است که در این مقاله به کار گرفته می‌شود.

در زیربخش بعدی تحقق‌پذیری الگوریتم همسوسازی تداخل

موردبررسی قرار می‌گیرد [۱۱] تا از وجود ماتریس‌های پریکدر و پسکدر

اطمینان حاصل شود که در معادلات مربوطه صدق کند و تداخل مربوط

به هر کاربر به‌طور کامل در زیر فضای تداخلی قرار گیرد.

۳-۲- تحقق‌پذیری همسوسازی تداخل

برای سیستم متقارن در هر فرستنده ثانویه دارای M آنتن، در هر گیرنده

ثانویه دارای N آنتن و هر کاربر دارای d درجه آزادی سیستمی مناسب

است که:

$$M + N - 2d_0 - (K + 1)d \geq 0 \quad (۷)$$

مشاهده می‌شود که با کاهش تعداد آنتن‌های کاربران ثانویه شرط

تحقق‌پذیری الگوریتم همسوسازی تداخل اکتفا نشده و در نتیجه تداخل

بین کاربران ثانویه صفر نمی‌شود. به عبارتی با کاهش تعداد آنتن‌ها در

تعداد داده ارسالی برابر، میزان تداخل بیش‌تر می‌شود.

۳- ارسال کد الموتی کاربران ثانویه

تداخل ایجادشده با کاهش درجه آزادی کاربران ثانویه را با استفاده از

ساختار الموتی و ایجاد فضای متعامد در دو باز زمانی می‌توان حذف نمود

که روش کار به شرح شکل ۳ است. در این روش، دو پریکدر به‌صورت

متوالی طراحی می‌شود، یکی از پریکدرها برای طراحی همسوسازی

تداخل و پریکدر بعدی برای کد فضا-زمان طراحی می‌شود.

$$\|d_{11}^1\|^2 + \|d_{21}^1\|^2 = \frac{1}{2} \quad (21)$$

معادلات بالا، معادلات غیرخطی می‌باشند. اگر برای حل مستقیم آن از الگوریتم عددی استفاده کنیم، پیچیدگی آشکارساز به‌طور نمایی با نسبت تعداد کاربرها و آنتن‌ها افزایش خواهد یافت. بنابراین روشی با پیچیدگی کم برای اندازه‌گیری پارامترهای پریکدر مورد نیاز است.

در ابتدا از (۲۰) نتیجه گرفته می‌شود:

$$\begin{pmatrix} d_{11}^1 \\ d_{21}^1 \end{pmatrix}^* = \begin{pmatrix} g_{21}^1 & g_{22}^1 \\ -g_{11}^1 & -g_{12}^1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} g_{11}^1 & g_{12}^1 \\ g_{21}^1 & g_{22}^1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_{12}^1 \\ d_{22}^1 \end{pmatrix} \quad (22)$$

متغیر Q به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$Q = \begin{pmatrix} g_{21}^1 & g_{22}^1 \\ -g_{11}^1 & -g_{12}^1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} g_{11}^1 & g_{12}^1 \\ g_{21}^1 & g_{22}^1 \end{pmatrix} \quad (23)$$

معادله (۲۳) در (۲۱) جایگذاری می‌شود:

$$\|d_{11}^1\|^2 + \|d_{21}^1\|^2 = \left\| Q \begin{pmatrix} d_{12}^1 \\ d_{22}^1 \end{pmatrix} \right\|_F^2 = \frac{1}{2} \quad (24)$$

اکنون از تجزیه مقدار تکین ماتریس Q استفاده می‌شود، پس:

$$Q = U \Sigma V^+ \quad (25)$$

که U و V ماتریس‌های واحد هستند و Σ یک ماتریس قطری با درایه‌های قطری نامنفی $\{\lambda_1, \lambda_2\}$ می‌باشد.

از جایگذاری (۲۵) در (۲۴):

$$\left\| U \Sigma (\lambda_1, \lambda_2) V^+ \begin{pmatrix} d_{12}^1 \\ d_{22}^1 \end{pmatrix} \right\|_F^2 = \frac{1}{2} \quad (26)$$

ضرب ماتریس واحد تغییری در نرم ماتریس ایجاد نمی‌کند بنابراین:

$$\left\| \Sigma V^+ \begin{pmatrix} d_{12}^1 \\ d_{22}^1 \end{pmatrix} \right\|_F^2 = \frac{1}{2} \quad (27)$$

با تعریف متغیر جدیدی به‌صورت زیر:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = V^+ \begin{pmatrix} d_{12}^1 \\ d_{22}^1 \end{pmatrix} \quad (28)$$

و با جایگذاری آن در (۲۷) و از معادله نرم گرفته می‌شود چون V^+

ماتریس واحد است پس:

$$\left\| \Sigma V^+ \begin{pmatrix} d_{12}^1 \\ d_{22}^1 \end{pmatrix} \right\|_F^2 = |\lambda_1|^2 |x_1|^2 + |\lambda_2|^2 |x_2|^2 = \frac{1}{2} \quad (29)$$

با نرم گرفتن از معادله (۲۸) و به کار بستن شرط نرمالیزه کردن:

$$|x_1|^2 + |x_2|^2 = \frac{1}{2} \quad (30)$$

در نهایت دو معادله با دو مجهول به دست می‌آید که حل آن‌ها در زیر

آورده شده است:

$$|x_1|^2 = \frac{1 - |\lambda_1|^2}{2(|\lambda_2|^2 - |\lambda_1|^2)} \Rightarrow x_1 \quad (31)$$

$$= \sqrt{\frac{1 - |\lambda_2|^2}{2(|\lambda_1|^2 - |\lambda_2|^2)}}$$

$$|x_2|^2 = \frac{1 - |\lambda_2|^2}{2(|\lambda_1|^2 - |\lambda_2|^2)} \Rightarrow x_2 \quad (32)$$

$$= \sqrt{\frac{1 - |\lambda_1|^2}{2(|\lambda_2|^2 - |\lambda_1|^2)}}$$

که E_s انرژی ارسالی هر کاربر می‌باشد و $n_1 = \begin{pmatrix} n_1^1 \\ n_2^1 \end{pmatrix}$ و $n_2 = \begin{pmatrix} n_1^2 \\ n_2^2 \end{pmatrix}$ دریافتی در بازه زمانی ۱ و ۲ است. با فرض آنکه $n_1^1, n_1^2, n_2^1, n_2^2$ متغیر تصادفی گوسی مختلط با میانگین صفر و انحراف معیار یک است.

با تعریف متغیرهای جدید به‌صورت زیر:

$$\begin{aligned} \bar{H}A^1 &= \bar{H}^1 \\ \bar{G}B^1 &= \bar{G}^1 \\ \bar{H}A^2 &= \bar{H}^2 \\ \bar{G}B^2 &= \bar{G}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

با جایگذاری معادله بالا در رابطه (۱۳) و (۱۴) سیگنال دریافتی

به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} y_1^1 \\ y_2^1 \end{pmatrix} &= \sqrt{E_s} \left(\begin{pmatrix} \bar{h}_{11}^1 & \bar{h}_{12}^1 \\ \bar{h}_{21}^1 & \bar{h}_{22}^1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} \right. \\ &\quad \left. + \begin{pmatrix} \bar{g}_{11}^1 & \bar{g}_{12}^1 \\ \bar{g}_{21}^1 & \bar{g}_{22}^1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} \right) \\ &\quad + \begin{pmatrix} n_1^1 \\ n_2^1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

هدف متعامد کردن سیگنال‌های تداخلی است تا بتوان با استفاده از ساختار الموتی آن‌ها را حذف کرد تا جداسازی آن‌ها به‌طور کامل انجام شود. برای این کار طراحی به‌صورتی انجام می‌شود که ستون‌های ماتریس سیگنال تداخلی برهم عمود باشند یعنی:

$$\begin{pmatrix} \bar{g}_{12}^1 \\ \bar{g}_{22}^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{g}_{21}^{1*} \\ -\bar{g}_{11}^{1*} \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} \bar{g}_{12}^2 \\ \bar{g}_{22}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\bar{g}_{21}^{2*} \\ \bar{g}_{11}^{2*} \end{pmatrix} \quad (18)$$

با توجه به شروط (۱۷) و (۱۸) معادله سیگنال گیرنده را به‌صورت زیر

بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} y_1^1 \\ y_2^1 \end{pmatrix} &= \sqrt{E_s} \left(\begin{pmatrix} \bar{h}_{11}^1 & \bar{h}_{12}^1 \\ \bar{h}_{21}^1 & \bar{h}_{22}^1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} \right. \\ &\quad \left. + \begin{pmatrix} \bar{g}_{11}^1 & \bar{g}_{12}^{1*} \\ \bar{g}_{21}^1 & -\bar{g}_{11}^{1*} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} \right) \\ &\quad + \begin{pmatrix} n_1^1 \\ n_2^1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

مشاهده می‌شود که ستون اول ماتریس سیگنال تداخلی بر ستون

دوم ماتریس عمود است. پس طراحی ساختار نیازمند حل معادله (۱۷)

است، با جایگذاری معادله (۱۵) در (۱۷):

$$\begin{pmatrix} g_{11}^1 & g_{12}^1 \\ g_{21}^1 & g_{22}^1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_{12}^1 \\ d_{22}^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{21}^{1*} & g_{22}^{1*} \\ -g_{11}^{1*} & -g_{12}^{1*} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_{11}^1 \\ d_{21}^1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

با نرمالیزه کردن ماتریس پریکدر:

$$(\hat{c}_1, \hat{c}_2) = \arg \min_{c_1, c_2} \left\| \frac{G_1^H}{\|G_1\|^2} y_1^1 - \frac{G_2^H}{\|G_2\|^2} y_1^{2*} - \sqrt{E_s} \left(\left(\frac{G_1^H H_1}{\|G_1\|^2} \right) (c_1) - \frac{G_2^H H_2}{\|G_2\|^2} \right) (c_2) \right\|_F^2 \quad (38)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

یک شبکه سه کاربره مطابق با مدل شکل ۱ در نظر گرفته شده است. که کاربر اصلی در سمت ارسال و دریافت به $M_0 = N_0 = 4$ آنتن مجهز است و تخصیص توان در کاربر اصلی بر اساس الگوریتم بهینه و اتر فیلینگ انجام می‌شود و دارای درجه آزادی ۱ می‌باشد. کاربران ثانویه با درجه آزادی دو به ارسال اطلاعات می‌پردازند. ضرایب کانال گاوسی مختلط با میانگین صفر و انحراف معیار یک فرض شده است.

در ابتدا کاربران بر اساس الگوریتم همسوسازی پیشنهادی عمل می‌کنند. به منظور بررسی صحت تحقق همسوسازی، توزیع متوسط تداخل باقی‌مانده برحسب ابعاد فضای سیگنال مورد استفاده همه کاربران (مجموع درجات آزادی همه کاربران) نشان داده شده است. طبق تعریف، تداخل باقی‌مانده در k امین بعد از فضای سیگنال مطلوب کاربر j معادل با مقدار زیر است:

$$j_j^{Res} = \frac{\sum_{k=1}^{d_j} \lambda_k (\sum_{i \neq j} U_j^H H_{ij} V_i V_i^H H_{ij}^H U_j)}{\text{tr}\{\sum_{i \neq j} U_j^H H_{ij} V_i V_i^H H_{ij}^H U_j\}} \quad (39)$$

که در آن $\mu_k(A)$ عبارت است از k امین مقدار ویژه ماتریس A .

با کاهش تعداد آنتن‌های کاربران ثانویه شرط تحقق پذیری الگوریتم همسوسازی تداخل برآورده نمی‌شود و در زیر فضای مطلوب کاربران تداخل صفر نمی‌شود، در شکل ۴ میزان تداخل در زیر فضای مطلوب کاربران برحسب مجموع درجات آزادی کاربران نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش تعداد آنتن‌های کاربران ثانویه، میزان تداخل باقی‌مانده در زیر فضای مطلوب بیش‌تر می‌شود.

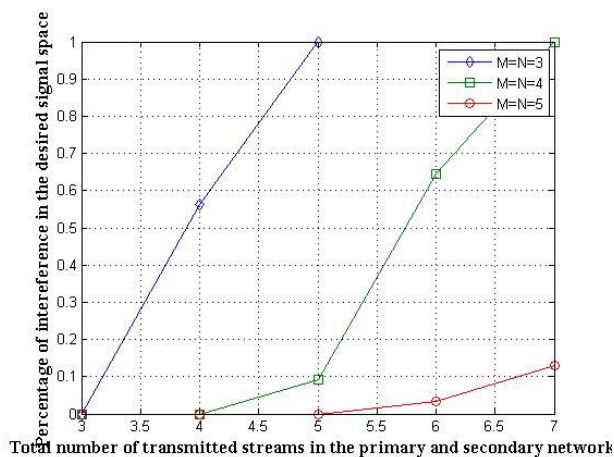


Figure 4: Total number of transmitted streams in the primary and secondary network

شکل ۴: میزان تداخل شبکه بعد از استفاده از طرح همسوسازی تداخل با کاهش تعداد آنتن کاربران ثانویه

حال با جایگذاری این دو جواب در معادلات (۲۸) و (۲۲) ماتریس پریکدر کاربر اولیه در بخش زمانی اول به دست می‌آید. برای طراحی پریکدر در بخش زمانی دوم، معادله (۱۸) به روش مشابه حل می‌شود جواب نهایی آن:

$$\begin{pmatrix} d_{12}^2 \\ d_{22}^2 \end{pmatrix} = V^{H-1} \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{1 - |\lambda_1|^2}{2(|\lambda_2|^2 - |\lambda_1|^2)}} \\ \sqrt{\frac{1 - |\lambda_2|^2}{2(|\lambda_1|^2 - |\lambda_2|^2)}} \end{pmatrix} \quad (33)$$

$$\begin{pmatrix} d_{11}^2 \\ d_{21}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{21}^{1*} & g_{22}^{1*} \\ -g_{11}^{1*} & -g_{12}^{1*} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} g_{11}^1 & g_{12}^1 \\ g_{21}^1 & g_{22}^1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_{12}^1 \\ d_{22}^1 \end{pmatrix}^* \quad (34)$$

طراحی پریکدر کاربر ثانویه مشابه کاربر اولیه است.

۳-۱- آشکارسازی

این بخش، بر روی آشکارسازی تمرکز می‌شود. در ابتدا معادله (۱۸) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{pmatrix} y_1^1 \\ y_1^{2*} \end{pmatrix} = \sqrt{E_s} \left(\begin{pmatrix} \tilde{h}_{11}^1 & \tilde{h}_{12}^1 \\ \tilde{h}_{21}^1 & \tilde{h}_{22}^1 \\ -\tilde{h}_{12}^{2*} & \tilde{h}_{11}^{2*} \\ -\tilde{h}_{22}^{2*} & \tilde{h}_{21}^{2*} \end{pmatrix} (c_1) + \begin{pmatrix} \tilde{g}_{11}^1 & \tilde{g}_{21}^1 \\ \tilde{g}_{21}^1 & \tilde{g}_{11}^1 \\ \tilde{g}_{21}^2 & \tilde{g}_{11}^2 \\ -\tilde{g}_{11}^2 & \tilde{g}_{21}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1^* \\ n_2^* \end{pmatrix} \right) \quad (35)$$

با تعریف متغیر جدید:

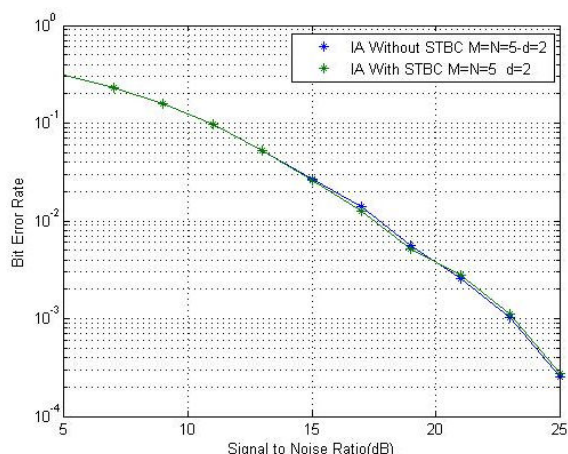
$$\begin{pmatrix} y_1^1 \\ y_1^{2*} \end{pmatrix} = \sqrt{E_s} \left(\begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 \end{pmatrix} (c_1) + \begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} \right) + \begin{pmatrix} n_1^* \\ n_2^* \end{pmatrix} \quad (36)$$

یادآوری می‌شود که $\hat{H}$ ساختار متعامد دارد یعنی ستون اول ماتریس تداخلی بر ستون دوم آن عمود است لذا برای آشکارسازی:

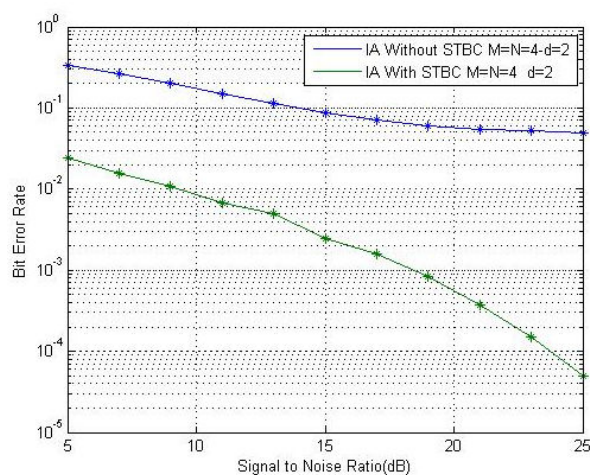
$$\frac{G_1^H}{\|G_1\|^2} y_1^1 - \frac{G_2^H}{\|G_2\|^2} y_1^{2*} = \sqrt{E_s} \left(\left(\frac{G_1^H H_1}{\|G_1\|^2} - \frac{G_2^H H_2}{\|G_2\|^2} \right) (c_1) + \left(\frac{G_1^H n_1}{\|G_1\|^2} - \frac{G_2^H n_2^*}{\|G_2\|^2} \right) \right) \quad (37)$$

که با این آشکارسازی ضریب سیگنال تداخلی صفر گردیده و سیگنال مطلوب قابل آشکارسازی است.

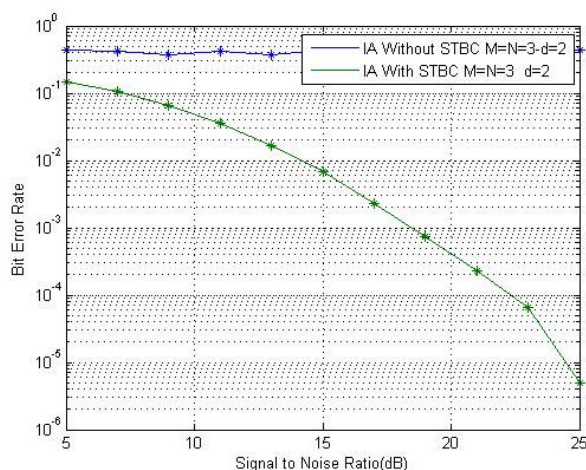
در ادامه از آشکارساز ML برای آشکارسازی سیگنال مطلوب استفاده می‌شود به‌طوری‌که:



شکل ۶: نمودار احتمال خطا- مقایسه تأثیر ارسال کد فضا- زمان بر الگوریتم همسوسازی تداخل برای تعداد آنتن ۵ برای کاربران ثانویه



شکل ۷: نمودار احتمال خطا- مقایسه تأثیر ارسال کد فضا- زمان بر الگوریتم همسوسازی تداخل برای تعداد آنتن ۴ برای کاربران ثانویه



شکل ۸: نمودار احتمال خطا- مقایسه تأثیر ارسال کد فضا- زمان بر الگوریتم همسوسازی تداخل برای تعداد آنتن ۳ برای کاربران ثانویه

در این مقاله سیستم با مجموع درجات آزادی ۵ مورد بررسی قرار گرفته است. (کاربر اولیه دارای درجه آزادی یک و هر کاربر ثانویه دارای درجه آزادی دو است) نمودار احتمال خطا برای این حالت، بعد از به کار بردن طرح همسوسازی تداخل بدون ارسال کد فضا- زمان در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش تعداد آنتن‌های کاربران ثانویه و در نتیجه افزایش تداخل، در SNR مشخص، خطا افزایش می‌یابد. نمودار احتمال خطا در این مقاله با شبیه‌سازی مدل سیستم و ارسال داده و دریافت آن در گیرنده‌های ثانویه و محاسبه تعداد خطا رسم شده است.

حال با همان درجات آزادی کاربران ثانویه و اولیه، میزان تداخل با کاهش آنتن با ارسال کد فضا- زمان برای کاربران ثانویه حذف و نمودار احتمال خطای کاربران ثانویه رسم شده است.

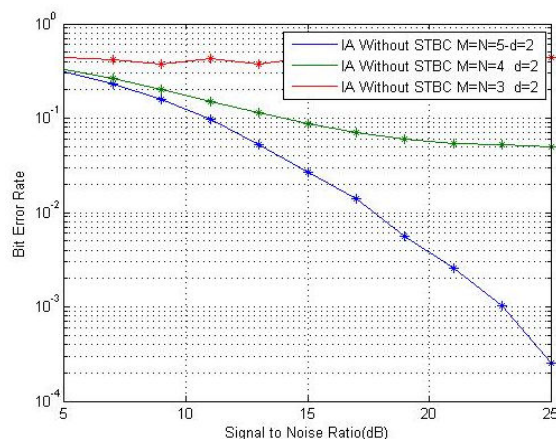
در شکل ۶ مشاهده می‌شود که برای کاربران ثانویه با ۵ آنتن بعد از انجام طرح همسوسازی تداخل، تداخل به صفر می‌رسد که ارسال کد فضا- زمان در بهبود سیستم تأثیری ندارد.

در شکل ۷ برای تعداد آنتن ۴ میزان تداخل با کد الموتی حذف شده است مشاهده می‌شود علاوه بر بهبود کارایی سیستم، دایورسیتی هم افزایش می‌یابد.

برای حالتی که تعداد آنتن‌ها ۳ می‌باشد بعد از به کارگیری طرح همسوسازی تداخل میزان تداخل ۱۰۰ درصد است یعنی به کارگیری طرح همسوسازی تداخل در کاهش تداخل اثری ندارد، لذا مشابه این است که از همان ابتدا از کد الموتی برای ارسال استفاده شده باشد؛ که در شکل ۸ نمودار احتمال خطا آن نشان داده شده است

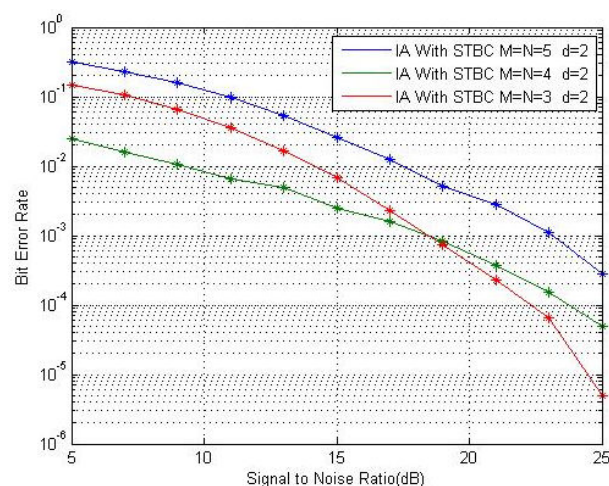
در مرز شرط تحقق‌پذیری الگوریتم همسو نهی تداخل با کاهش تعداد آنتن‌های کاربران ثانویه، بهبود کارایی سیستم در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

در SNRهای بالا مشاهده می‌شود که طرح پیشنهادی (طرح توأم همسوسازی تداخل و کد الموتی) از طرح همسوسازی تداخل کارایی بهتری دارد و باعث حدود ۵/۴ dB کاهش می‌شود اما از طرح کد الموتی کارایی کمتری دارد.



شکل ۹: نمودار احتمال خطا طرح همسوسازی تداخل با کاهش تعداد آنتن‌های کاربران ثانویه

- [6] N. Lee, and J.B. Lim, "A novel signaling for communication on MIMO Y channel: Signal space alignment for network coding," *Proc. Int. Symp. Inf. Theory*, Jun. 28-Jul. 3, 2009.
- [7] B. Nazer, M. Gastpar, S.A. Jafar, and S. Vishwanath, "Interference alignment for cellular networks," *Proc. Int. Symp. Inf. Theory*, Jul. 3, 2009.
- [8] O.O. Koyluoglu, H.E. Gamal, L. Lai, and V.H. Poor, "Interference alignment for secrecy," *ArXiv pre-print cs.IT/0810.1187v1*, [Online], Available online at: <http://arxiv.org/abs/0810.1187v1/>.
- [9] L. Lue, G. Ye Li, and A. Maaref, "Spatial – frequency signal alignment for opportunistic transmission," *IEEE Transaction On Signal Processing*, vol. 62, no. 6, march 2014.
- [10] S.M. Perlaza, M. Debbah, S. Lasaulce, and J.M. Chaufray, "Opportunistic interference alignment in MIMO interference channels," *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 1-5, 2008.
- [11] M. Amir, A. El-Keyi, and M. Nafie, "Constrained interference alignment and the spatial degrees of freedom of MIMO cognitive networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 57, pp. 2994-3004, 2011.
- [12] S. Gollakota, S.D. Perli, and D. Katabi, "Interference alignment and cancellation," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, pp. 159-170, 2009.
- [13] L.E. Li, R. Alimi, D. Shen, H. Viswanathan, and Y.R. Yang, "A general algorithm for interference alignment and cancellation in wireless networks," *Proceedings IEEE INFOCOM*, pp. 1-9, 2010.
- [14] X. Qu, and C.G. Kang, "On feasibility of interference alignment and cancellation for Gaussian interference multiple access channel," *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 2467-2471, 2012.
- [15] X. Qu, and C. Kang, "A Closed-form solution to implement interference alignment and cancellation for a Gaussian interference multiple access channel," *IEEE Transactions on wireless communications*, vol. 13, no. 12, 2014.
- [16] B. Shen, and Z. Li, "Coexistent transmission and user scheduling for CR-MIMO system based on interference alignment and cancellation," *IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 403-407, 2013.
- [17] D.S. Jin, J.H. Kim, and J.S. No, "Combining interference alignment and Alamouti codes for quasi-static MIMO X channel," *18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, pp. 939-940, 2012.
- [18] L. Zhao, S. Biao, and L. Jiandong, "Interference alignment and cancellation based concurrent transmission and scheduling scheme for multiuser CR-MIMO system," *Communications, China*, vol. 10, pp. 36-43, 2013.
- [19] L. Li, H. Jafarkhani, and S.A. Jafar, "When Alamouti codes meet interference alignment: transmission schemes for two-user X channel," *IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT)*, pp. 2577-2581, 2011.
- [20] S. Jung, and J. Lee, "Interference alignment and cancellation for the two-user X channels with a relay," *IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 202-206, 2013.
- [21] A. Zaki, C. Wang, and L.K. Rasmussen, "Combining interference alignment and Alamouti codes for the 3-user MIMO interference channel," *IEEE Wireless*



شکل ۹: نمودار احتمال خطا، تأثیر کد فضا-زمان با کاهش تعداد آنتن کاربران ثانویه

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، شبکه‌های رادیوشناخت‌گر مورد مطالعه قرار گرفته است که در آن فضای سفید استفاده نشده وجود دارد که با به کارگیری الگوریتم واتر‌فیلینگ در کاربر اولیه، فضای سفید در اختیار کاربران ثانویه قرار می‌گیرد در شبکه کاربران ثانویه با استفاده از الگوریتم همسوسازی تداخل، نیمی از فضای سیگنال دهی هر کاربر به سیگنال مطلوب و نیمه دیگر به سیگنال تداخلی اختصاص می‌یابد.

در این مقاله، تکنیک حذف و همسوسازی تداخل با استفاده از ارسال کد الموتی کاربران ثانویه برای شبکه‌های رادیوشناخت‌گر مطرح و مورد بحث قرار گرفت به طوری که با کاهش تعداد آنتن‌ها، میزان تداخل ناشی از به کار بردن الگوریتم همسوسازی تداخل صفر نمی‌شود این تداخل با استفاده از ارسال کد الموتی و ایجاد ساختار متعامد در حوزه زمان حذف می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی بهبود عملکرد سیستم را در این حالت نشان می‌دهد، به طوری که علاوه بر کاهش تعداد آنتن‌های کاربران ثانویه و افزایش دایورسیتی، کارایی سیستم حدود ۴/۵ dB بهبود می‌یابد.

مراجع

- [1] S. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, pp. 1451-1458, 1998.
- [2] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A.R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 45, pp. 1456-1467, 1999.
- [3] F. Li, and H. Jafarkhani, "Multiple-antenna interference cancellation and detection for two users using precoders," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 3, pp. 1066-1078, 2009.
- [4] M. Akbari, and A. Falahati, "Spatial-DoF improvement of MIMO cognitive network through interference fusion in conjunction with alignment," *Wireless Personal Com.*, vol. 82, no. 2, pp. 834-843, 2015.
- [5] C. Suh, and D. Tse, "Interference alignment for cellular networks," *Proc. Allerton Conf. Commun., Contr., Computing*, Sep. 23-26, 2008.

constant MIMO interference channel," *SSP'09. IEEE/SP 15th Workshop on Statistical Signal Processing*, pp. 277-280, 2009.

Communications and Networking Conference (WCNC), pp. 3563-3567, 2013.

[22] R. Tresch, M. Guillaud, and E. Riegler, "On the achievability of interference alignment in the K-user