

Resource Allocation Parameters Improvement in Interference-Based Cognitive Radio**Ali Hasan-Nezhad, M.Sc., Sayyed Majid Mazinani, Associate Professor**Electrical Engineering Department- Imam Reza International University, Mashhad, Iran
glassyframe.64@gmail.com, smajidmazinani@imamreza.ac.ir**Abstract**

Interference Alignment is an efficient method of reducing interference in wireless networks, which can be used in radio cognitive networks. In the interference alignment, a suitable pre-encoder matrix will be found in each transmitter that all interferences are limited to a part of the signal subspace in each receiver, which causes the desired signal to be placed in the other part. Therefore, the desired signal can be easily received by a suitable interference removal filter. In this paper, an efficient method for using interference homogeneity in a cognitive radio network is presented. In the proposed method, the selection of radiation vectors for the formation of selection vectors based on adjacent vectors is done in equal steps. Selecting equal steps improves the convergence speed of the algorithm. The results show that computational efficiency and complexity have been greatly improved. To evaluate the proposed method of power allocation in the network, they are evaluated to maximize the network energy efficiency and the other to maximize the total rate of the cognitive radio network while keeping the initial user rate at the threshold level. The simulation results reveal the improvement of network performance using this method in both strategies.

Keywords: cognitive radio network, interference alignment, multi-pregnant multi-antenna communications, special radiation interference homogeneity

Received: 30 June 2022

Revised: 29 September 2022

Accepted: 28 October 2022

Corresponding Author: Dr. Sayyed Majid Mazinani

20.1001.1.23223871.1403.15.60.5.0

مقاله پژوهشی

بهبود پارامترهای تخصیص منابع در رادیو شناختگر مبتنی بر همسونهی تداخل

علی حسن‌نژاد، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، سید مجید مزینانی، دانشیار

گروه مهندسی برق - دانشگاه بین‌المللی امام رضا (ع)، مشهد، ایران
glassyframe.64@gmail.com, smajidmazinani@imamreza.ac.ir

چکیده: همسونهی تداخل یک روش کارآمد در تقلیل تداخل در شبکه‌های بدون سیم است، که می‌تواند در شبکه‌های رادیو شناختگر به کار گرفته شود. در همسونهی تداخل یک ماتریس پیش‌گذر مناسب در هر فرستنده پیدا خواهد شد که همه تداخل‌ها به بخشی از زیرفضای سیگنال در هر گیرنده محدود می‌شود، این کار سبب می‌گردد سیگنال مطلوب در بخش دیگر قرار گیرد. بنابراین سیگنال دلخواه توسط یک فیلتر حذف تداخل مناسب به راحتی قابل دریافت است. در این مقاله یک روش کاؤمد برای به کارگیری همسونهی تداخل در شبکه رادیو شناختگر ارائه شده است. در روش پیشنهادی گزینش بردارهای پرتودهی برای تشکیل بردارهای گزینش بر اساس بردارهای مجاور با گام‌هایی به اندازه‌ی مساوی صورت می‌گیرد. انتخاب گام‌های مساوی سبب بهبود سرعت همگرایی الگوریتم شده است. نتایج حاکی از آن است که کارایی و پیچیدگی محاسباتی بسیار بهبود یافته است. برای ارزیابی روش پیشنهادی در تخصیص توان در شبکه مورد بیشینه‌سازی بهره‌وری انرژی شبکه و دیگری بیشینه‌سازی نرخ مجموع شبکه رادیو شناختگر با حفظ نرخ کاربر اولیه در سطح آستانه، آن‌ها ارزیابی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده بهبود عملکرد شبکه با استفاده از این روش در هر دو استراتژی است.

کلمات کلیدی: شبکه رادیو شناختگر، مخابرات چندآنتنه چندحامله، همسونهی تداخل پرتودهی ویژه، همسونهی تداخل

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۴/۹

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۷/۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۸/۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سید مجید مزینانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: گروه مهندسی برق - دانشگاه بین‌المللی امام رضا، مشهد، ایران

۱- مقدمه

افزایش روزافزون تقاضای سرویس‌ها در سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم، چالش‌های جدیدی را مطرح می‌کند. یکی از بارزترین چالش‌ها در مواجهه با این تقاضا، کمیابی منابع رادیویی است. در دهه گذشته شماری از روش‌ها، برای بهینه‌سازی کارآمد منابع رادیویی در مقاله‌ها ارائه شده است، مانند: رادیوشناختگر [۱]، مخابرات مشارکتی [۲] و مخابرات چند آنتنه [۳]. رادیوشناختگر فناوری نوینی است که قصد دارد کارایی طیف فرکانسی را بالا ببرد. مخابرات مشارکتی و سیستم‌های چند آنتنه، با همان توان کل و پهنای باند سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم پیشین، می‌توانند نرخ داده‌ی سیستم‌های مخابراتی را افزایش دهد. ترکیبی از رادیوشناختگر با مخابرات مشارکتی و یا سیستم‌های چند آنتنه نیز می‌تواند عملکرد سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم آینده را بهبود بخشد. هر چند، ترکیب این روش‌ها موضوعات جدیدی را در سیستم‌های بی‌سیم ایجاد می‌کند که نیاز به بررسی بیشتر دارد [۴].

مسئله تخصیص منبع در شبکه‌های رادیو شناختی^۱ (CR)، حداکثر کردن کارایی کاربران ثانویه را در عین اطمینان از کیفیت سرویس‌دهی کاربران اولیه، هدف‌گذاری می‌کند. بنابراین تداخل دوسویه به سبب لوب‌های کناری بین کاربران اولیه و ثانویه باید در نظر گرفته شود. همچنین توان ارسال هر زیر حامل باید به‌منظور کیفیت کانال و بودجه‌ی توان موجود در کاربر ثانویه تنظیم شود. پژوهش‌های متعددی وجود داشته که تخصیص منبع، در یک آنتن که توسط هر دو کاربران اولیه و ثانویه به‌کار گرفته شده است را مورد بررسی قرار داده است [۵-۷]. سایر پژوهش‌ها، شبکه‌های CR با چند آنتن در کاربران ثانویه، به‌منظور به‌دست آوردن سازمان‌دهی به‌وسیله پرتودهی شناختگر را بررسی می‌کنند [۹-۷]. اخیراً یک ساختار مشارکتی برای سیستم‌های CR با چند آنتن در سمت کاربران اولیه و ثانویه به‌منظور استفاده از مزیت چندورودی چندخروجی (MIMO) برای رله‌کردن مشارکتی ترافیک برای کاربران اولیه ارائه شده است [۹، ۱۰].

همسونهی تداخل^۲ (IA) در حذف تداخل و بالا بردن میزان آزادی^۳ (DOF) بسیار موثر است، اما همچنان چالش‌هایی از قبیل نیاز به بعد، نسبت سیگنال به تداخل و نویز^۴ (SINR) پایین در بعضی شرایط، وابستگی زیاد به اطلاعات کانال ایده‌آل و پیچیدگی محاسباتی را دارا است. SINR پایین به‌طور مشخص یکی از مهم‌ترین این مشکلات است به‌ویژه در شبکه‌های رادیو شناختگر که کاربر اولیه باید کیفیت سرویس^۵ (QoS) حفظ شود [۱۱]. این روش از حوزه زمان و فرکانس به‌طور همزمان بهره می‌گیرد و برای به‌دست آوردن بعد از این دو حوزه استفاده می‌کند در نتیجه برای تامین بعد نیاز به تعداد غیر معقولی آنتن و یا تعداد زیادی زیرحامل ندارد. روش همسونهی تداخل از منظر انتخاب ماتریس پیش‌کدگذار و به‌تبع آن فیلتر دریافتی منعطف است، برخلاف دیگر روش‌های همسونهی تداخل دیگر که اکثراً بردارهای پیش‌کدگذاری خود را برای هدفی خاص از قبیل کاهش تداخل ناشی و غیره معطوف داشته‌اند. این نوع دیدگاه به این روش همسونهی تداخل در هیچ یک از کارهای انجام داده شده تا به امروز دیده نشده است. یکی دیگر از دلایل انتخاب این روش استفاده آن در سیستم‌های مالتی پلکسی تقسیم فرکانس متعامد چند ورودی، چند خروجی^۶ (MIMO-OFDM) است که امروزه کاربرد وسیعی در شبکه‌های مخابراتی پیدا کرده است [۱۲]. همچنین انتخاب این روش همسونهی تداخل با مدل سیستم هماهنگ است به نحوی که در مدل سیستم کاربر اولیه باید با دیگر کاربران ثانویه همکاری کند و تبادل اطلاعات انجام دهد، این اطلاعات می‌تواند شامل نرخ سطح آستانه و یا تعیین نوع استراتژی شبکه باشد [۱۳].

اخیراً تمایل زیادی نسبت به همسونهی تداخل بر پایه تخصیص منابع برای به‌دست آوردن بازدهی بیشتر برای شبکه‌های CR وجود داشته است. IA یک روش ارسال مشارکتی است که یک نرخ مجموع کارآمد برای کانال‌های تداخل k - کاربره را به‌دست می‌دهد [۱۴]. IA در کانال‌های تداخل MIMO به‌عنوان پیش‌کدگذار در فرستنده‌ها و کدگشاهای حذف تداخل در گیرنده‌ها شکل داده شده‌اند. پیش‌کدگذارها برای همسونهی سیگنال‌های تداخل از فرستنده‌های نامطلوب در یک زیرفضا (زیرفضای تداخل) و سیگنال‌های دلخواه در زیرفضای دیگر (زیرفضای بدون تداخل) طراحی شده‌اند [۱۵، ۱۶]. اغلب کارهای پیشین IA در CR بر روی به‌کارگیری MIMO روی هر دو کاربر اولیه و ثانویه برای اجازه دادن به کاربران ثانویه برای استفاده از حالت‌های ویژه‌ی آزاد و غیرآزاد کاربران اولیه تمرکز دارند. به‌کار بردن MIMO در سمت کاربران ثانویه آزادی بیشتری برای حذف کامل تداخل در گیرنده‌های اولیه ارائه می‌دهد. بنابراین محدودیت‌های تداخل از مسئله بهینه‌سازی کنار گذاشته می‌شود [۱۴] و به جای آن

از تامین نرخ کاربر اولیه صحبت می‌شود، به این معنی که کاربران ثانویه با شرط برآورد کردن نرخ کاربر اولیه مجاز به استفاده از طیف و همکاری با کاربر اولیه را دارا هستند. مسئله یافتن ماتریس‌های پیش‌کدگذار و فیلتر دریافتی با هدف افزایش نرخ چالش اصلی پژوهش‌های صورت گرفته است. در این تحقیق یک روش کارآمد برای ساخت ماتریس پیش‌کدگذار ارائه شده که با یک طرح‌گزینش بردار پرتودهی کارآمد و گزینش بردار پرتودهی مناسب با پیچیدگی قابل قبول، سبب بهبود بهره‌وری انرژی شبکه و بیشینه‌سازی نرخ مجموع شبکه رادیو شناختگر با حفظ نرخ کاربر اولیه در سطح آستانه شده است. بر این اساس می‌توان نوآوری‌های این تحقیق را به‌صورت زیر بیان کرد:

- طرح‌گزینش بردار پرتودهی کارآمد با پیچیدگی قابل قبول

- بهبود بهره‌وری انرژی شبکه و بیشینه‌سازی نرخ مجموع شبکه رادیو شناختگر
در ادامه این مقاله به‌صورت زیر بخش‌بندی شده است. در بخش ۲ مدل سیستم برای همسونهی تداخل پرتودهی ارائه شده است. سپس در بخش ۳ طرح پیشنهادی گزینش بردار پرتودهی ارائه خواهد شد. در بخش ۴ شبیه‌سازی و آنالیز نتایج ارائه خواهد شد و در نهایت در بخش ۵ نتیجه‌گیری کل تحقیق ارائه خواهد شد.

۲- مدل سیستم

در اینجا یک شبکه رادیو شناختگر ارائه شده که شامل یک کاربر اولیه و $K-1$ کاربر ثانویه است و از یک طیف فرکانسی به‌صورت مشترک استفاده می‌کنند. در نتیجه می‌توان به‌صورت یک کانال تداخل K کاربره در نظر گرفته شود. کاربر اولیه در این سیستم بعنوان کاربر اول و $K-1$ کاربر ثانویه بعنوان کاربر ۲ تا K در نظر گرفته می‌شوند. هر کاربر دارای M_k آنتن در فرستنده و N_k در گیرنده است. در اینجا فرض است که کاربران به‌طور مشترک از S زیر حامل برای ارسال اطلاعات خود استفاده می‌کنند. همان‌طور که بیان شد برای از بین بردن تداخل بین کاربران این شبکه شامل کاربر اولیه و کاربران ثانویه از همسونهی تداخل استفاده شده است. سیگنال دریافتی که d_k رشته اطلاعات^۷ در آن موجود است در سمت گیرنده k ام به‌صورت زیر دریافت می‌شود [۱۷].

$$y_k(n) = w_k^H(n) H_{kk}(n) V_k(n) X_k(n) + \sum_{j=1, j \neq k}^k w_k^H(n) H_{kj}(n) V_j(n) X_k(n) + w_k^H(n) Z_k(n) \quad (1)$$

در رابطه (۱) که V_k ماتریس پیش‌کدگذار در سمت فرستنده و W_k فیلتر دریافتی حذف تداخل در سمت گیرنده است. H_{kj} ماتریس ضرایب کانال بین فرستنده j ام و گیرنده k ام است. x_k بردار اطلاعات ارسالی با ابعاد $d_k \times 1$ توسط فرستنده است. n نشان‌دهنده لحظه زمان-گسسته دریافت است. در رابطه (۱) قسمت اول بیانگر سیگنال مطلوب است و قسمت دوم شامل تداخل و نویز دریافتی در گیرنده k ام است. اصل استفاده از همسونهی تداخل برای حذف قسمت تداخل و افزایش درجه آزادی سیستم است. همان‌طور که در بخش معرفی IA بیان شد، شرایط زیر باید در همسونهی تداخل اجرا شود [۱۷]:

$$w_k^H(n) H_{kk}(n) V_k(n) = 0, \quad \forall k \quad (2)$$

$$\text{rank}(w_k^H(n) H_{kk}(n) V_k(n)) = d_k \quad (3)$$

رابطه (۲) برای حذف تداخل و رابطه (۳) برای حفظ ابعاد در فرستنده و گیرنده کاربر k ام است. در ادامه از لحاظ کردن زمان گسسته n در فرمول‌ها برای سهولت صرف‌نظر شده است. همان‌طور که در مقدمه اشاره شد در اینجا از همسونهی تداخل پرتودهی ویژه استفاده شده است. در این روش از دو حوزه فرکانس و فضا برای تامین ابعاد استفاده شده و به‌صورت زیر صورت‌بندی می‌شود:

یک راه برای به‌دست آوردن یک DOF کسری در یک کانال ثابت تداخل چندورودی-چندخروجی، از طریق گسترش سمبل است. با یک گسترش سمبل S تایی کانال، سمبل‌های متوالی S هر یک به طول d_k در فرستنده و گیرنده k ، جمع‌آوری می‌شوند تا یک سوپر-سمبل به طول $(Sd)^A$ را تشکیل دهند. ماتریس کانال گسترش‌یافته از فرستنده z به گیرنده k ، یک ماتریس قطری بلوکی با اندازه $NS \times MS$ با بلوک n ام $(N \times M)$ است شامل H_{kj} است. همچنین، خروجی کانال y_k و نویز تجمعی z_k در گیرنده k ، ابعاد $NS \times 1$ را دارند. برای یک کانال تداخل چندورودی-چندخروجی متغیر با زمان، ماتریس کانال در هر شکاف زمانی n ، متفاوت است؛ بنابراین هر بلوک در ماتریس کانال گسترش‌یافته، متفاوت خواهد بود. برای کانال تداخل چندورودی-چندخروجی

ثابت، ماتریس کانال فرض می‌شود که برای مدت یک سمبل گسترش یافته، ثابت بماند، یعنی هر بلوک در ماتریس کانال گسترش یافته، یکسان خواهد بود. فرضیه کانال ثابت، زمانی می‌تواند صرف نظر شود که کانال فرکانس‌گزین باشد و گسترش سمبل در زیرحامل‌های مختلف در سیستم‌های مدولاسیون چندحامله که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد انجام شود مانند تسهیم فرکانس متعامد چندگانه^۹ (OFDM) ضریب‌های کانال فرض می‌شود که از یک توزیع پیوسته و i.i.d انتخاب می‌شوند (مانند توزیع گوسی مختلط). در این روش فرض می‌شود که تمام گیرنده‌ها و فرستنده‌ها ضرایب کانال کلی همه لینک‌ها را در اختیار دارند. کانال موثر برای سیگنال مطلوب در گیرنده k ، (بعد از فیلترینگ دریافتی) توسط: $W_k^H H_{kk} V_k$ داده می‌شود. توان رشته داده d_k سیگنال مطلوب کاربر k ، توسط مربع بزرگترین مقدار ویژه d_k ام $W_k^H H_{kk} V_k$ داده می‌شود. بنابراین توان نسبی ضعیف-ترین رشته داده مطلوب (که q_{avg} را مشخص می‌کند) را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۸]:

$$q_{avg} = \frac{\Delta}{k} \sum_{k=1}^k q_{k_i} q_k = \frac{\Delta}{\sum_{j=1}^k \partial_j^2 [w_k^H H_{kk} V_k]} \frac{\partial^2 [w_k^H H_{kk} V_k]}{d_k}, q_k \in [0, \frac{1}{d_k}] \quad (4)$$

که $\sigma_i[A]$ ، بزرگترین مقدار ویژه A را نشان می‌دهد. توجه کنید که مقدار بزرگی از q_k نشانگر این است که تقریباً نرخ داده مشابه را می‌توان در همه رشته‌های داده d_k به دست آورد. وقتی که $q_k=0$ ، یکی از ابعاد از دست رفته است که به خاطر فیلترینگ دریافتی است و DOF به دست آمده توسط کاربر k ام به شدت کمتر از d_k خواهد بود. این روش از این لحاظ همان‌طور که در مرجع [۱۹] بررسی شده عملکرد مطلوبی را از خود نشان می‌دهد. فرض کنید رابطه (۵) که نمایانگر بردار پرتودهی متناظر با رشته داده‌ی k ام کاربر باشد، یعنی ستون k ام از ماتریس پیش‌کدگذار در سمت فرستنده است. سپس مجموعه‌ای از معادلات برای همسونهی p رشته داده هر کاربر که باید در زیرفضایی که توسط کاربران تداخل‌کننده دیگر قرار دارند تشکیل شود. این معادلات برای کانال تداخل K کاربره برای $n=1,2,\dots,p$ به صورت زیر است:

$$V_i^{(j)} \in C^{MS \times 1} \quad (5)$$

$$R_X : H_{lk} V_k^{(n)} = \sum_{j=2}^{k-1} H_{lj} V_j^{((k-2)p+n)} \quad (6)$$

$$R_{x2} : H_{2k} V_k^{(n)} = \sum_{j=3}^k H_{2j} V_j^{(p+n)} \quad (7)$$

$$R_{xj} : 3 \leq k \leq K : H_{j(j-1)} V_{j-1}^{(n)} + \sum_{r=2}^{j-2} H_{jr} V_r^{((j-3)p+n)} + \sum_{r=j+1}^k H_{jr} V_r^{((j-3)p+n)} \quad (8)$$

برای محاسبه معادلات بالا، باید به هر کاربر حداقل $(K-1)p$ رشته داده تخصیص داده شود و p تا از این رشته‌ها با تداخل باقی کاربران تداخل‌کننده در هر گیرنده همسونهی شوند. برای نمونه در یک کانال تداخل با چهار کاربر ($K=4$) و دو رشته مختص همسونهی ($p=2$) معادلات به صورت رابطه (۹) نوشته می‌شوند [۲۰]:

$$\begin{cases} H_{14}[V_4^{(1)} V_4^{(2)}] = H_{12}[V_2^{(5)} V_2^{(6)}] + H_{13}[V_3^{(5)} V_3^{(6)}] \\ H_{21}[V_1^{(1)} V_1^{(2)}] = H_{31}[V_3^{(3)} V_3^{(4)}] + H_{34}[V_4^{(3)} V_4^{(4)}] \\ H_{32}[V_2^{(1)} V_2^{(2)}] = H_{31}[V_1^{(3)} V_1^{(4)}] + H_{34}[V_4^{(5)} V_4^{(6)}] \\ H_{43}[V_4^{(1)} V_4^{(2)}] = H_{41}[V_2^{(3)} V_2^{(4)}] + H_{42}[V_3^{(3)} V_3^{(4)}] \end{cases} \quad (9)$$

چهار معادله در رابطه (۹) متناظر با شرایط همسونهی تداخل به ترتیب در گیرنده‌های ۱ تا ۴ است. همان‌طور که مشخص است به هر گیرنده $(K-1)p$ در اینجا یعنی ۶ رشته اطلاعات تخصیص داده شده است. می‌توان معادلات بالا را به شکل ساده‌تر مطابق رابطه (۱۰) بیان کرد:

$$\tilde{V} \hat{H} = 0 \quad (10)$$

که در آن \tilde{V} به صورت رابطه (۱۱) استفاده می‌شود [۲۰]:

$$\hat{V} \square [V_{11}, V_{13}, V_{15}, V_{21}, V_{23}, V_{25}, V_{31}, V_{33}, V_{35}, V_{41}, V_{43}, V_{45}] \quad (11)$$

$$\square V_{kt} \square [V_k^{(l)} V_k^{(l+1)}] \quad (12)$$

$$\hat{H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{12} & 0 & 0 & H_{12} - H_{14} & 0 & 0 & 0 \\ -H_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{22} & 0 & 0 & H_{24} & 0 \\ 0 & H_{31} & 0 & -H_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{34} \\ 0 & 0 & H_{41} & 0 & H_{42} & 0 & -H_{43} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

ماتریس H_2 به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H_2 = \hat{H}^H \hat{H} \quad (14)$$

یک راه‌حل ساده برای مسئله رابطه (۱۰) و در نتیجه به دست آوردن بردارهای ویژه متناظر با مقادیر ویژه صفر ماتریس H_2 و انتخاب p بردار بعنوان بردارهای پیش‌کدگذار است. واضح است که برای اینکه این معادله دارای جواب باشد ماتریس H_2 باید رتبه ناقص 1^0 باشد. ماتریس تعریف شده رابطه (۱۳) دارای ابعاد $KNS \times K(K-1)MS$ است، بنابراین برای اینکه این ماتریس رتبه ناقص شود باید شرط زیر برقرار باشد:

$$K > \frac{N}{M} + 1 \quad (15)$$

اگر شرط فوق برقرار شود یعنی $(K-1)M-N > 0$ و به این معنی است که ماتریس H_2 دارای $KS((K-1)M-N)$ مقدار ویژه صفر و به تبع آن دارای همین مقدار بردار ویژه متناظر با مقدار ویژه صفر است. در اینجا است که طرح پیشنهادی در این مقاله شکل می‌گیرد. مجموعه‌ای به اندازه $KS((K-1)M-N)$ از بردارهایی که سازنده‌ی پیش‌کدگذارها هستند، وجود دارد. بر این اساس که p بردار پرتودهی سیستم از بین آن‌ها انتخاب شده (البته با احراز این شرط که اگر در بین این بردارها، برداری وجود داشته باشد که دارای بردار 1^0 تمام صفر باشد از مجموعه حذف می‌شود و نامعتبر تلقی می‌شود). پس از انتخاب p بردار از مجموعه بردارهای متناظر با مقدار ویژه صفر معتبر، ماتریس پیش‌کدگذار هر کاربر با توجه به رابطه (۱۰) به دست می‌آید. این گزینش بردار انعطاف‌پذیری ویژه‌ای به این روش می‌دهد. روش گزینش بردار پرتودهی می‌تواند در اختیار استراتژی‌های مختلف شبکه از قبیل بالا بردن نرخ یک کاربر خاص که در اینجا می‌تواند کاربر اولیه باشد یا بالا بردن مجموع نرخ شبکه 1^1 و ... قرار گیرد [۲۱]. در مدل سیستم پیشنهاد شده نرخ قابل دسترسی برای کاربر k ام در این سیستم به صورت رابطه (۱۶) بیان می‌شود:

$$R^{[k]} = \log \left| I_d^{[k]} + \frac{w^{[k]H} Q_k w^k}{w^{[k]H} \partial^2 I_{MS} + Q_{k1}} w^k \right| \quad (16)$$

که در آن ماتریس مطلوب در گیرنده k برابر Q_k و ماتریس تداخل برابر Q_{k1} است که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Q_{k1} = H^{[kk]} V^{[k]H} H^{[kk]} \quad (17)$$

$$Q_k = \sum_{i=1, i \neq j}^k \frac{p^{[i]}}{d^{[i]}} H^{[ki]} V^{[i]H} H^{[ki]} \quad (18)$$

$p^{[k]}$ توان ارسالی توسط کاربر k ام است. در اینجا می‌توان استراتژی کلی و در نتیجه تابع هدف در جهت افزایش نرخ کاربر اولیه تعریف کرد و کاربران این شبکه باید پارامترهای خود (در اینجا می‌تواند گزینش بردار پرتودهی) را در راستای تحقق استراتژی مطلوب تغییر دهند. در اینجا می‌توان دو استراتژی کلی و در نتیجه دو تابع هدف در جهت افزایش نرخ کاربر اولیه تعریف کرد و کاربران این شبکه باید پارامترهای خود (در اینجا می‌تواند گزینش بردار پرتودهی) را در راستای تحقق استراتژی تغییر دهند [۲۰].

۱ - همه کاربران اولیه در جهت بیشینه‌سازی نرخ کاربر اولیه تلاش کنند و به افزایش نرخ خود اهمیتی ندهند که تابع هدف آن به صورت $\arg \max \{R^{[1]}\}$ می‌شود که در آن $R^{[1]}$ همان نرخ کاربر اولیه است.

۲ - استراتژی دوم مبتنی افزایش کارایی و نرخ کل سیستم است. یعنی تابع هدف بیشینه‌سازی مجموع نرخ شبکه است و به صورت رابطه (۱۹) بیان می‌شود:

$$\arg \max \left\{ \sum_{k=2}^K R[k] + \lambda R[1] \right\} \quad (19)$$

که λ نشان دهنده میزان اهمیت نرخ کاربر اولیه در شبکه است که در شبکه‌های گوناگون ممکن است متفاوت باشد. در دو زیر بخش بعدی استراتژی نوع اول و دوم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مقاله فرض می‌شود که همه کاربران به اطلاعات وضعیت کانال^{۱۲} (CSI) کامل و دقیق دسترسی دارند، در نتیجه کاربران می‌توانند نرخ را دقیق محاسبه کنند.

۳- طرح‌های پیشنهادی گزینش بردار پرتودهی

همان‌طور که در قسمت قبل بیان شد، روش همسونهی تداخل پرتودهی ویژه $KS((K-1)M-N)$ بردار قابل انتخاب برای همسونهی تداخل در اختیار می‌گذارد که می‌توان از بین آن‌ها p بردار انتخاب و ماتریس‌های ارسال V و فیلتر گیرنده W را برای تمام کاربران به دست آورد. در اینجا با استفاده از این روش دو استراتژی اول و سوم مورد بررسی قرار خواهد گرفت. اگر C_T مجموعه بردارهای پرتودهی معتبر باشد، طبق رابطه (۲۰) داریم:

$$n(C_T) = L_V \quad (20)$$

آنگاه:

$$C_T = \{ \tilde{V}(1), \tilde{V}(2), \dots, \tilde{V}(L_V) \} \quad (21)$$

که در آن درایه‌های بردار پرتودهی به صورت رابطه (۲۱) هستند.

حال اگر C_i ترکیبی شامل p بردار \tilde{V} که قابل انتخاب برای استفاده در شبکه باشد، آنگاه می‌توان تعداد این مجموعه‌ها یعنی $n(C_i)$ در هر الگوریتم را معیاری برای میزان محاسبات دانست. در اینجا مسئله پیدا کردن C ای است (ماتریس‌های پیش‌گذار و فیلتر دریافتی از آن بدست می‌آید) که نرخ را با توجه به استراتژی مورد نظر افزایش دهد. یعنی در این استراتژی موجب افزایش نرخ کاربر اولیه شود. باید به این موضوع اشاره کرد، چون همه‌ی بردارهای \tilde{V} در رابطه (۱۰) صدق می‌کنند، عمل گزینش بردار پرتودهی تاثیری بر درجه آزادی کاربر ندارد و در نتیجه درجه آزادی هر کاربر حفظ می‌شود. یک طرح گزینش بردار پرتودهی کارآمد و یک طرح گزینش بردار پرتودهی مناسب با پیچیدگی قابل قبول ارائه شده است.

۳-۱- طرح گزینش بردار پرتودهی کارآمد

یکی از راه‌های مناسب برای گزینش مجموعه بردارهای پرتودهی، جستجو کردن و محاسبه نرخ و سپس انتخاب بهترین مجموعه (که در اینجا مجموعه‌ای است که بیشترین نرخ را به دست می‌دهد) است. در این شیوه باید نرخ تمامی ترکیب‌های بردارهای پرتودهی یا همان تمامی مجموعه‌های C_i ممکن محاسبه شود. محاسبه نرخ به معنی ساختن ماتریس پیش‌گذار فرستنده و فیلتر دریافتی در گیرنده برای تمامی کاربران است. همان‌طور که گفته شد تعداد مجموعه‌های موجود معیار خوبی برای میزان پیچیدگی است که به صورت رابطه (۲۲) بیان می‌شود:

$$n(C_i) = \binom{L_V}{p} \quad (22)$$

در آن علامت $\binom{L_V}{p}$ معرف جایگشت است. این میزان در L_V های خیلی کوچک زیاد نمی‌شود اما در جایی که تعداد مجموعه‌ها زیاد است به شکل چشم‌گیری افزایش می‌یابد و دیگر از نظر میزان محاسبات مطلوب تلقی نمی‌شود. بنابراین، روش گزینش بردار پرتودهی کارآمد در جاهایی که تعداد کاربران و همچنین تعداد آنتن آن‌ها کم باشد مناسب بنظر می‌رسد اما در جاهای شلوغ یا در سیستم‌هایی که کانال متغیر با زمان است و زمان محاسبات نقش اساسی دارد. این روش کاربردی نبوده و باید به سراغ روش‌های مناسب که از نظر سرعت انجام محاسبات کارایی بالاتری داشته باشند. این طرح در ادامه پیشنهاد شده است.

۲-۳- طرح‌گزینش بردار پرتودهی پیشنهادی

همان‌طور که در بالا اشاره شد بدلیل محاسبات زیاد طرح کارآمد خیلی کم کاربرد بوده و اکثر شبکه‌ها طرحی با سرعت بالا و محاسبات اندک و کارایی نزدیک به بهینه نیازمندند. در این طرح پیشنهادی، گزینش بردارهای پرتودهی برای تشکیل C_i ها براساس بردارهای مجاور با گام‌هایی به اندازه μ است. یعنی اگر مطابق تعریف رابطه (۲۱) بردارهای پرتودهی چیده شده باشند، مجموعه بردارهای پرتودهی به‌صورت زیر شکل می‌گیرند که در آن C_i زیرمجموعه C_T است:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_1 = \{v^{(1)}, v^{(2)}, \dots, v^{(p)}\} \\ c_2 = \{v^{(u+1)}, v^{(u+2)}, \dots, v^{(u+p)}\} \\ c_3 = \{v^{(p+u+1)}, v^{(p+u+2)}, \dots, v^{(u+2p)}\} \\ \vdots \\ c_i = \{v^{(pi+u+1)}, v^{(pi+u+2)}, \dots, v^{(u+2pi)}\} \end{array} \right. \quad (23)$$

در نظر داشته باشید برای اینکه در این طرح تمام بردارهای پرتودهی حداقل یک بار انتخاب شوند باید شرط $1 \leq \mu \leq p$ برقرار شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود هر مجموعه با مجموعه بعدی‌اش در μ عضو با هم تفاوت دارند، در نتیجه μ برابر یک به معنی حداکثر تعداد گروه در این روش است و $\mu = p$ به معنی عدم همپوشانی بین گروه‌ها بوده و در نتیجه شامل کمترین تعداد گروه است. می‌توان μ را اندازه گام نامید زیرا برای تشکیل گروه بعدی نیاز به رفتن جلو به اندازه μ است. از منظر محاسباتی، این روش با اندازه گام یک (μ برابر یک) که بیشترین تعداد گروه را در اختیار دارد، با استفاده از معیار تعداد مجموعه‌ها برابر است با رابطه (۲۴) که به میزان قابل توجه نسبت در مقایسه با روش قبلی میزان محاسبات کاهش یافته‌است.

$$n(C_i^{\mu=1}) = L_v - 1 \quad (24)$$

۳-۳- مدل مورد نظر برای شبیه‌سازی

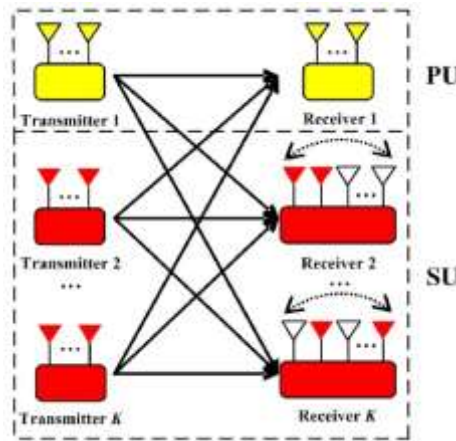
در این قسمت مدل سیستم دقیقاً مانند بخش قبل است، یعنی شبکه دارای یک کاربر اولیه $K-1$ کاربر ثانویه است. برای رفع تداخل نیز از همان شیوه پرتودهی ویژه و همچنین طرح ارائه شده در تحقیق یعنی گزینش بردار پرتودهی بهره گرفته شده است. تنها تفاوت این بخش با بخش قبل در این است که به هر گیرنده ثانویه، برای کمک به کارایی شبکه، تعداد بیشتری آنتن اختصاص داده خواهد شد تا کاربر ثانویه با انتخاب بعضی از آن‌ها به افزایش نرخ یا حفظ کیفیت سرویس کاربر اولیه کمک کند. این مدل در شکل (۱) نشان داده شده است. در اینجا فرستنده k مانند قبل دارای $M^{[k]}$ ولی در هر گیرنده ثانویه $L_a^{[k]}$ آنتن وجود دارد که $N^{[k]}$ را گزینش و مورد استفاده قرار می‌دهد. گزینش $N^{[k]}$ از $L_a^{[k]}$ در شبکه، مجموعه‌ای از ترکیب‌ها ارائه می‌دهد که تعداد کل ترکیب‌های موجود در این مجموعه به صورت معادله (۲۵) بیان می‌شود. در نتیجه ما مجموعه‌ای S عضوی از ترکیب‌های مختلف آنتن‌ها وجود دارد که می‌توان هر یک را در شبکه استفاده کرد. اگر هر ترکیب این مجموعه با A_i نمایش داده شود، آن‌گاه مجموعه C_a برابر با رابطه (۲۶) است.

$$S = \prod_{k=2}^K \binom{L_a^{[k]}}{N^{[k]}} \quad (25)$$

$$C_a = \{A_1, A_2, \dots, A_S\} \quad (26)$$

نکته جالب توجه در اینجا است که هر یک از این ترکیب‌ها یک مجموعه کامل بردار پرتودهی در اختیار شبکه قرار می‌دهد، یعنی با انتخاب هر ترکیب آنتن، L_v بردار پرتودهی ایجاد می‌شود که باید p تا از آن‌ها برای استفاده در سیستم انتخاب شود. بنابراین به‌طور کل تعداد ترکیب موجود در رابطه (۲۷) آمده است:

$$S \times \binom{L_v}{p} \quad (27)$$



شکل (۱): مدل سیستم رادیو شناختگر با گزینش آنتن در گیرنده کاربر ثانویه
Figure (1): Cognitive radio system model for antenna selection at secondary user receiver

در ادامه به ارائه دو روش برای گزینش بهترین ترکیب بردار پرتودهی و آنتن پرداخته خواهد شد. در تمام این روش‌ها این موضوع لحاظ شده است که اعضای هر مجموعه بردارهای پرتودهی کامل فقط با ترکیب آنتن به وجود آورنده این بردارها می‌توانند ترکیب شوند.

۳-۴- طرح گزینش بردار پرتودهی و آنتن کارآمد

در این طرح برای پیدا کردن مناسب‌ترین ترکیب، نرخ شبکه با توجه به نوع استراتژی با استفاده از تمامی ترکیب‌های آنتن‌ها و بردارهای پرتودهی مختصشان محاسبه می‌شود و بهترین ترکیب انتخاب و مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان‌طور که مشهود است این طرح به تعداد ترکیب موجود در رابطه (۲۷) نرخ را محاسبه می‌کند که این رقم در بیشتر حالت‌ها رقم بزرگی محسوب می‌شود. در نتیجه این طرح از منظر سنگینی محاسبات طرح مطلوبی تلقی نمی‌شود و در جاهایی که به محاسبات سبک‌تر و در نتیجه سرعت بالای محاسبات نیاز است، می‌توان از طرح‌های پیشنهادی استفاده کرد.

۳-۵- طرح گزینش بردار پرتودهی و آنتن پیشنهادی دوم (گزینش تصادفی)

از آنجایی که تعداد اعضای مجموعه قابل انتخاب بسیار زیاد است، یکی از راه‌های انتخاب یک ترکیب از مجموعه می‌تواند براساس گزینش تصادفی باشد. به این صورت که ابتدا دو مجموعه به صورت تصادفی انتخاب شود و عملکرد هر یک بررسی شود (در اینجا همان نرخ کاربر اولیه یا نرخ مجموع کل شبکه بسته به نوع استراتژی شبکه است). سپس مجموعه‌ای که عملکرد بهتری دارد انتخاب شود. دوباره مجموعه‌ای دیگر به صورت تصادفی انتخاب و با این مجموعه مقایسه شود و این عمل n بار تکرار شود. می‌توان در این روش یک سطح آستانه برای عملکرد شبکه در نظر گرفت و عملکرد مجموعه‌های انتخاب شده را با آن مقایسه نمود. میزان سنگینی محاسبات در این روش به تعداد دفعات گزینش تصادفی در این روش وابسته است که در اینجا برابر n است.

۳-۶- تخصیص توان و استفاده از روش گزینش بردار پرتودهی

در این زیر بخش به تخصیص توان و همچنین استفاده از روش پیشنهادی در استراتژی نوع دوم که افزایش نرخ کاربران ثانویه به شرط تضمین نرخ اولیه بود، پرداخته خواهد شد. در اشتراک‌گذاری رادیو شناختگر طیف فرولایه رایج، حد تحمل تداخل معمولاً برای محدود کردن توان کل تداخل و نویز در کاربر ثانویه به صورت رابطه (۲۸) بیان می‌شود [۱۹]:

$$P_{\text{interference}} + P_{\text{noise}} = k_B T_{\text{th}} B \quad (28)$$

که در آن P_{noise} و $P_{\text{interference}}$ به ترتیب توان دریافتی تداخلات ایجاد شده به وسیله‌ی کاربران ثانویه و توان نویز در گیرنده اولیه هستند. T_{th} حد تداخل و P_{th} حد توان تداخل و نویز متناظر با T_{th} است. k_B ثابت بولتزمن و B پهنای باند گیرنده است. توان

دریافتی کاربر اولیه را در نظر بگیرید، P_{pu} غیرقابل تغییر است، بنابراین آستانه نرخ ارسال P_{pu} ، P_U می‌تواند به شکل فرمول (۱۶) بیان شود.

$$R_{th} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{pu}}{P_{th}} \right) \quad \text{و} \quad R_{pu} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{pu}}{P_{interference} + P_{noise}} \right) \quad (29)$$

بنابراین یک تناظر یک‌به‌یک بین حد تداخل T_{th} و آستانه نرخ ارسال کاربر اولیه R_{th} وجود دارد. بنابراین آستانه نرخ ارسال کاربر اولیه R_{th} ، که با حد تحمل تداخل متناظر است، می‌تواند برای تضمین کیفیت سرویس‌دهی کاربر اولیه تطبیق پیدا کند. در زیربخش‌های قبل، توان ارسال شده برابری برای هر کاربر در نظر گرفته شد. زیرا استفاده از تخصیص توان به‌طور مشخص موجب بهبود عملکرد شبکه می‌شد و نتیجه قابل پیش‌بینی می‌بود. ولی در این بخش به دلیل وجود شرط نرخ کاربر اولیه و وابسته بودن این شرط به توان از تخصیص توان با دو رویکرد کلی، یکی تخصیص توان در جهت افزایش بازدهی شبکه و دیگری افزایش نرخ کاربران ثانویه استفاده شده است. در این بخش فرض شده است که توان ارسال شده مجموع همه‌ی کاربران به کمتر از مقدار ثابتی محدود شده باشد. مثلاً مانند رابطه زیر:

$$\sum_{k=1}^K P_t^{[k]} \leq P_t^{\max} \quad (30)$$

دلیل این شرط می‌تواند از عدم ایجاد تداخل قابل توجه بر روی باندهای کناری نشأت بگیرد. موضوع بازده انرژی، جنبه‌ی مهمی در مخابرات بی‌سیم امروز است و در این زیربخش بعد مسئله تخصیص توان با بازده انرژی بالا در شبکه‌های CR مبتنی بر روش پیشنهادی در همسوسه‌ی تداخل مورد بررسی قرار گرفته‌شده است.

۷-۳- تخصیص توان با بیشینه‌سازی نرخ کاربران ثانویه

در الگوریتم تخصیص توان بیشینه‌سازی بازده انرژی شبکه ارائه شده، هنگامی که نرخ ارسال کاربر اولیه از نرخ آستانه بیشتر باشد، نرخ ارسال کاربران ثانویه به‌طور کامل بهینه‌سازی نشده و این به این معنی است که توان بیشتری از آنچه نیاز است به کاربر اولیه اختصاص داده شده است. علاوه بر این اگر نرخ ارسال کاربران ثانویه برآورده نشده باشد، کاربران ثانویه باید کاربر اولیه دیگری را برای اشتراک‌گذاری طیف جستجو کنند. بنابراین، نرخ کاربران ثانویه می‌تواند بر اساس محدودیت آستانه نرخ کاربر اولیه بیشینه‌سازی شود به این معنی که نرخ کاربر اولیه در همان مقدار سطح آستانه خود باقی بماند و بیش از توان آستانه به کاربر اولیه تعلق نگیرد. یک الگوریتم تخصیص توان با بیشینه‌سازی نرخ کاربران ثانویه در این زیربخش ارائه شده است. با توجه به رابطه نرخ، تابع هدف بیشینه‌سازی نرخ کاربران ثانویه با تخصیص توان و گزینش بردار پرتوده‌ی به‌صورت زیر می‌شود:

$$c_i = \max_{P_t^{[2]}, \dots, P_t^{[k]}} \sum_{k=2}^k \log \left| I_d + \frac{P_t^{[k]}}{d} \left(\frac{w^{[k]H} Q_k w_k}{\sum_{j=2, j \neq k}^k (P_t^{[j]}/d) w^{[k]H} Q_{jk} w^{[k]} + \delta^2 I_d} \right) \right| \quad (31)$$

$$P_t^{[k]} \geq 0, \forall k = 2, \dots, k$$

که در آن:

$$\begin{cases} P_t^{[k]} \geq P_{t-th} \\ \sum_{k=1}^k P_t^{[k]} \leq P_t^{\max} \end{cases} \quad (32)$$

همان‌طور که در رابطه (۳۲) پس از تامین نرخ کاربر اولیه دیگر به آن توانی مازاد تعلق نمی‌گیرد و توان باقی‌مانده به کاربران ثانویه به‌منظور بالا بردن نرخ خود می‌رسد. الگوریتم تخصیص توان با بیشینه‌سازی نرخ کاربران ثانویه می‌تواند با گام‌های زیر در هر شکاف زمانی بیان شود.

۱- هنگامی که یک شکاف زمانی آغاز می‌شود، با استفاده از روش همسونهی تداخل پرتوهای ویژه مجموعه‌های بردارهای پرتوهای به‌دست آید و هم‌هی ماتریس‌های پیش‌کدگذار و فیلتر دریافتی محاسبه شوند.

۲- حد توان ارسالی کاربر، $P_{t,th}$ برای تضمین آستانه‌ی نرخ آن R_{th} ، به ازای هر ماتریس پیش‌کدگذار و فیلتر دریافتی محاسبه شود و آن مجموعه بردارهایی که شرط را برآورده می‌کنند در گام چهارم مورد استفاده قرار گیرند.

$$P_t^{[k]} = P_t^{\max_{t,th}} \quad (33)$$

آن‌گاه به گام چهارم، در غیر این‌صورت به گام پنجم برود.

۳- مسئله بهینه‌سازی تخصیص توان $k-1$ کاربر ثانویه، مطابق فرمول (۲۹) انجام شده و مجموعه بردار متناظر با بیشترین مجموع نرخ کاربران ثانویه انتخاب گردد.

۴- در این حالت کاربران ثانویه حق استفاده از این طیف را ندارند و تمام طیف و همچنین p_i^{\max} به کاربر اولیه اختصاص داده می‌شود و کاربران ثانویه می‌توانند کاربر اولیه‌ی دیگری را برای اشتراک بیابند.

۵- پس از ارسال در طول زمان T با توان تخصیص داده‌شده، یک شکاف زمانی به پایان رسیده. به گام ۱ بروید.

از توضیحات الگوریتم تخصیص توان بهینه‌سازی بازده انرژی شبکه و الگوریتم تخصیص توان با بهینه‌سازی نرخ کاربران ثانویه این مهم برداشت می‌شود که هنگامی که در رابطه (۳۴)، دو الگوریتم یکسان هستند. هنگامی که رابطه (۳۵)، نرخ کاربران ثانویه در الگوریتم تخصیص توان با بهینه‌سازی نرخ کاربران ثانویه، از الگوریتم تخصیص توان بهینه‌سازی بازده انرژی شبکه، مطابق انتظار بیشتر خواهد بود.

$$P_{t,th} \geq P_t^{\max} \quad (34)$$

$$P_{t,lower}^{[1]} < P_t^{\max} \quad (35)$$

۴- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در تمامی شبیه‌سازی‌ها، یک شبکه رادیو شناخت‌گر که شامل ۱ کاربر اولیه و ۲ کاربر ثانویه است در نظر گرفته شده است. تعداد آنتن‌ها در هر فرستنده برابر ۲ آنتن و در هر گیرنده نیز برابر ۲ آنتن است. در اینجا روش همسونهی پرتوهای ویژه با استفاده از ۵ کانال به کار رفته است و هر کاربر ۴ رشته اطلاعات را برای گیرنده‌اش ارسال می‌کند (S_d برابر ۴ است). در نتیجه همسونهی تداخل به ما مجموعه‌ای شامل $KS((N-1)M-N)$ بردار پرتوهای که در اینجا این مقدار برابر با ۳۰ بردار پرتوهای است، می‌دهد. مقدار p یعنی تعداد زیررشته‌هایی که روی هم قرار می‌گیرند، نیز برابر با ۲ در نظر گرفته شده است. همه نمودارها پس از متوسط‌گیری از ۱۰۰۰ ارسال سمبل به‌دست آمده است. سایر پارامترهای شبکه در جدول (۱) این اطلاعات نشان داده شده است. در شکل (۲) با استفاده از روش کارآمد گزینش بردار پرتوهای به مقایسه دو استراتژی اول و دوم، یعنی استراتژی مبتنی بر صرفاً افزایش نرخ کاربر اولیه و استراتژی مبتنی بر افزایش مجموع نرخ کل شبکه پرداخته شد. همچنین برای دید بهتر نسبت به عملکرد روش گزینش بردار پرتوهای، نرخ همسونهی پرتوهای ویژه بدون گزینش بردار پرتوهای نیز رسم شده است. همان‌طور که در شکل مشهود است با استفاده از گزینش بردار پرتوهای بدون نیاز به منابعی اضافه شبکه تاحدودی منعطف تشکیل داده شد، که فقط با انتخاب بردار می‌تواند نرخ کاربر اولیه یا نرخ مجموع شبکه را افزایش دهد. همانگونه که در شکل (۲) نشان داده شده است با افزایش مقدار SINR در روش‌های مورد بررسی، نرخ مجموع شبکه را افزایش یافته است. به دلیل گزینش کارآمد بردار همسونهی تداخل، مقدار نرخ مجموع روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های شکل دهی پرتو هماهنگ^{۱۴}، نرخ بهینه کاربران اولیه و ثانویه بهبود قابل توجه داشته است. در شکل (۳) مقایسه بین احتمال انقطاع نرخ کاربر اولیه در هر دو استراتژی ذکر شده توسط گزینش بردار پرتوهای با روش پرتوهای ویژه بدون گزینش انجام شده است، که به صورت رابطه (۳۶) است:

$$\{R_i < R_{th}\} \Pr\{\text{outage}\} = Pr \quad (36)$$

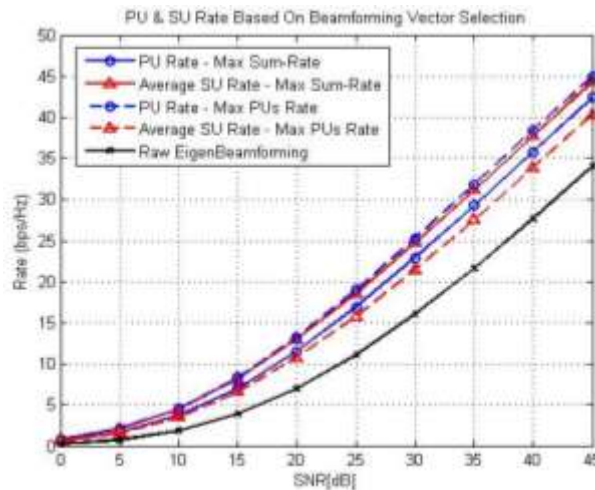
جدول (۱): پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی

Table (1): Parameters used in the simulation

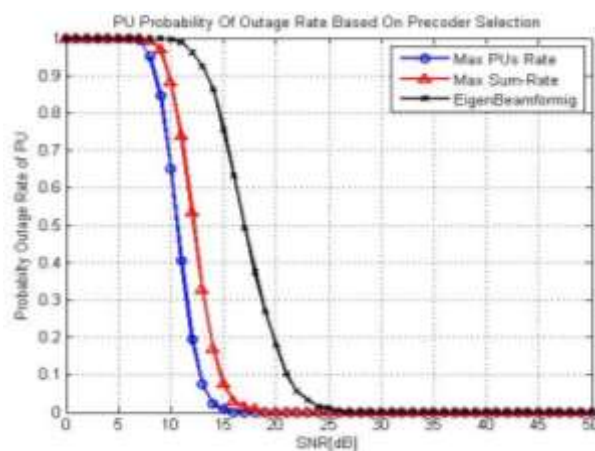
مقدار	پارامتر
۱	کاربر اولیه
۲	کاربر ثانویه
۵	تعداد کانال استفاده شده در روش پیشنهادی
۲	تعداد آنتن‌ها در هر فرستنده
۲	تعداد آنتن‌ها در هر گیرنده
۴	تعداد رشته اطلاعات ارسال Sd
۲	تعداد زیررشته‌هایی که روی هم قرار می‌گیرند
۱۰۰۰	تعداد سمبل ارسال شده
23 dBm	بیشترین توان ارسال کاربران
-174 dBm	توان نویز
$128.1 + 37.6 \log(d)$	تلفات مسیر لینک سلولی
$40 \log(d) + 30 \log(f) + 49$	تلفات مسیر غیر مستقیم (NLOS) لینک D2D

که در آن R_1 نرخ کاربر اولیه است و R_{th} نرخ سطح آستانه است. در اینجا نرخ سطح آستانه بر روی ۵ بیت بر هر تیز تنظیم شده است. در این دو شکل اخیر و همچنین در بقیه اشکال در استراتژی نوع سوم ضریب λ که نشانگر اولویت کاربر اولیه است برابر با یک در نظر گرفته شده است، به این معنی که هیچ اولییتی نسبت به کاربران ثانویه ندارد. این استراتژی در جاهایی که کاربر ثانویه برای کمک به کاربر اولیه می‌آید و مقداری از محاسبات کاربر اولیه را کم می‌کند به کار می‌رود. به عنوان مثالی از چنین شبکه‌ای می‌توان به شبکه‌های ماکروسل^{۱۴} و فمتوسل‌ها^{۱۵} اشاره نمود. ایستگاه ماکروسل در محیط‌های داخلی و سرپسته به علت تلفات توان زیاد ناشی از دیوارها، سطح توان دریافتی بسیار پایین است، در نتیجه نسبت سیگنال به تداخل نیز پایین خواهد بود. به بیان دیگر باید تداخل در این شبکه‌ها کاشه پیدا کند. فمتوسل به عنوان ایستگاه پایه خانگی کوچک و ارزان برای رفع این مشکل پیشنهاد شده است. فمتوسل به راحتی توسط کاربر نصب می‌شود و در هر لحظه می‌تواند توسط کاربر روشن یا خاموش شود. فمتوسل‌ها در محدوده فرکانسی مشترک با ماکروسل کار می‌کنند [۲۲]. با استفاده از طرح پیشنهادی در همسوسه‌ی تداخل، تداخل بین لایه‌ای زیاد از ایستگاه پایه ماکروسل به کاربرهای فمتوسل و از نقطه دسترسی فمتوسل به کاربرهای ماکروسل را به حداقل ممکن خواهند رساند. در نتیجه نسبت سیگنال به تداخل کاربرها را به شدت پایین خواهد آمد. در این شبکه فمتوسل‌ها برای کمک به کاهش بار در ماکروسل‌ها به شبکه اضافه می‌شوند. حال اینکه در استراتژی نوع اول تمام تمرکز بر روی کاربر اولیه است و همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است، نسبت به دیگر کاربران اولویت دارد. در حقیقت اگر مقدار λ افزایش یابد، وزن کاربر اولیه نسبت به کاربران ثانویه در تابع هدف افزایش می‌یابد، و هر چه این مقدار بیشتر افزایش یابد، استراتژی نوع سوم به نوع اول نزدیک‌تر می‌شود. در شکل (۴) دو طرح گزینش بردار پرتودهی کارآمد و طرح پیشنهادی دوم ارائه شده در حالت افزایش نرخ کاربر اولیه و همچنین طرح اولیه‌ی پرتودهی ویژه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این نمودارها نشان‌دهنده نرخ کاربر اولیه در استراتژی مبتنی بر افزایش نرخ این کاربر است و کارایی هر روش را در بالا بردن نرخ کاربر اولیه نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، طرح پیشنهادی دوم با اندازه گام یک بسیار به طرح کارآمد از نظر عملکرد نزدیک است. اما از نظر پیچیدگی محاسبات، روش کارآمد پیشنهادی برابر جایگشت p از N که در اینجا تعداد بردار پرتودهی ما است، بوده در حالیکه در روش پیشنهادی دوم این مقدار با اندازه گام یک برابر $N-1$ و با اندازه گام دو این مقدار برابر $(N-1)/2$ است که میزان محاسبات با پارامترهای تعیین شده در این شبیه‌سازی، در طرح کارآمد تقریباً ۱۰۰ برابر طرح پیشنهادی دوم است. طرح پیشنهادی دوم با اندازه گام دو نیز برای مقایسه رسم شده است که از نظر عملکرد نسبت به دو روش دیگر مطلوب نیست، هر چند پایین‌ترین میزان محاسبات را در پی دارد اما می‌توان با دو برابر کردن میزان محاسبات به عملکرد کارآمد نزدیک شده و کارایی شبکه را بالا برد. در شکل‌های (۵) و (۶) نرخ کاربر اولیه و مجموع نرخ کل شبکه با یکدیگر توسط طرح پیشنهادی کارآمد گزینش بردار

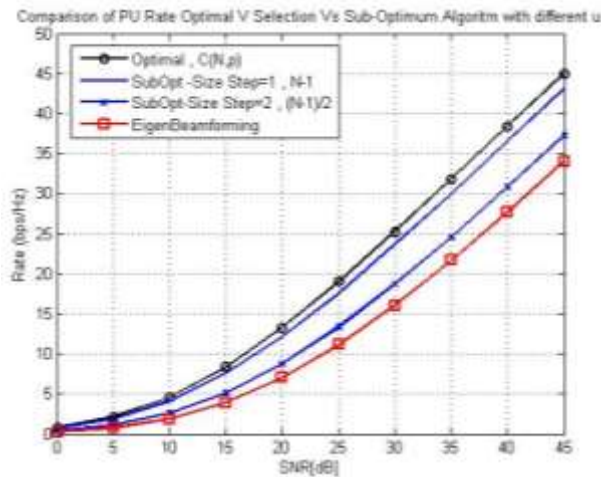
پرتودهی و آنتن تواما مقایسه شده است. در شکل‌های (۴) الی (۶) مشخص است که اضافه نمودن چند آنتن در گیرنده‌های ثانویه چقدر به بهبود عملکرد سیستم کمک می‌کند. در شکل (۷) احتمال انقطاع نرخ با سطح آستانه ۵ بیت بر هر تر رسم شده است و به وضوح عملکرد سیستم بهبود یافته است. در شکل (۷) به مقایسه طرح پیشنهادی کارآمد و طرح‌های پیشنهادی دوم پرداخته شده است. باز هم معیار را نرخ کاربر اولیه در استراتژی افزایش نرخ کاربر اولیه قرار داده شد. در اینجا میزان محاسبات دو طرح پیشنهادی دوم برابر گرفته شده تا بتوان هر چه بهتر این دو طرح را با یکدیگر مقایسه نمود. پس در طرح پیشنهادی دوم گزینش مجموعه تصادفی رابطه (۲۷) (میزان محاسبات در بهترین بردار برای آنتن) مجموعه به‌طور تصادفی انتخاب می‌شوند و بهترین آن‌ها لحاظ می‌شود. همان‌طور که مشهود است برنده بلامنازع این رقابت طرح پیشنهادی دوم بهترین بردار برای بهترین آنتن است که با اختلاف نسبت به دیگر طرح پیشنهادی دوم در نزدیکی طرح کارآمد جای گرفته است. در این مقایسه طرح گزینش آنتن بدون گزینش بردار پرتودهی نیز برای مقایسه آورده شده که به وضوح مشخص است که طرح گزینش بردار پرتودهی به چه میزان عملکرد سیستم را بهبود بخشیده است. به‌منظور مقایسه تلفات بسته (PL)، همانند ارزیابی در میزان تداخل، مقدار SINR افزایش داده شده است. هم‌زمان مقدار تلفات بسته (PL) محاسبه شده است. شکل (۹) نشان دهنده مقدار تلفات بسته (PL) در شبکه مورد نظر است. همان‌گونه که از شکل پیداست، مقدار تلفات بسته به ازای افزایش SINR در روش پیشنهادی از مقدار حدود ۰/۹۵ تا ۰/۷۴ کاهش یافته است.



شکل (۲): مقایسه دو استراتژی نرخ شبکه با استفاده از روش گزینش بردار پرتودهی کارآمد
Figure (2): Comparison of two network rates with efficient beam forming method

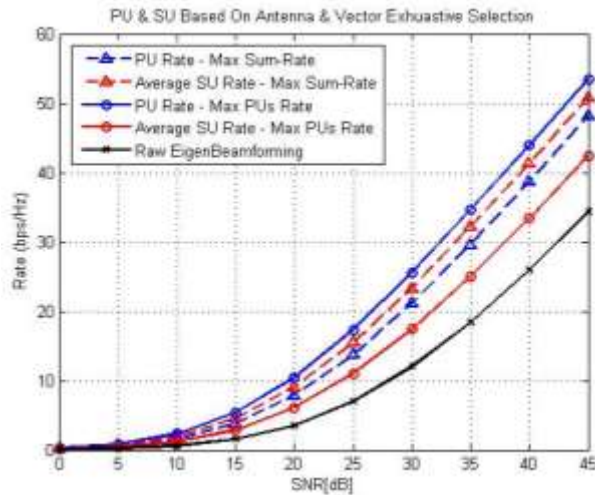


شکل (۳): احتمال نرخ انقطاع کاربر اولیه به دو استراتژی نرخ شبکه با استفاده از روش گزینش بردار پرتودهی
Figure (3): Probability of the initial user interruption is calculated according to the two network rate strategies using the radiation vector selection



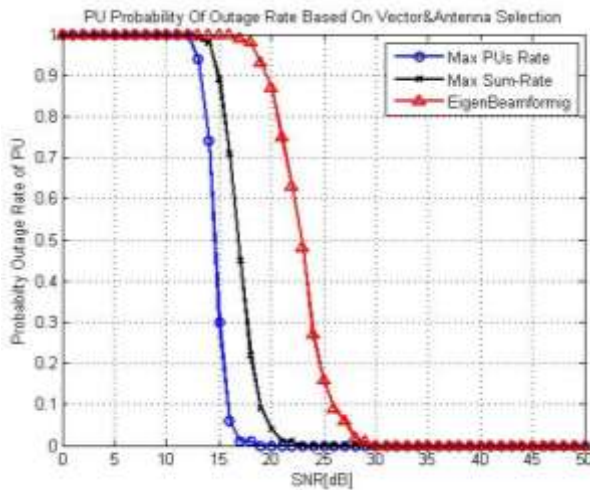
شکل (۴): نرخ کاربر اولیه در استراتژی افزایش نرخ اولیه برای مقایسه عملکرد روش گزینش بردار پرتوهای کارآمد و زیر بهینه با دو اندازه گام $u=1$ و $u=2$ و روش همسویی تداخل پرتوهای ویژه

Figure (4): Initial user rate in the initial rate increase strategy for comparing the performance of the efficient and optimum beam forming method with the two step size $u=1$ and $u=2$ and the corresponding beam forming method



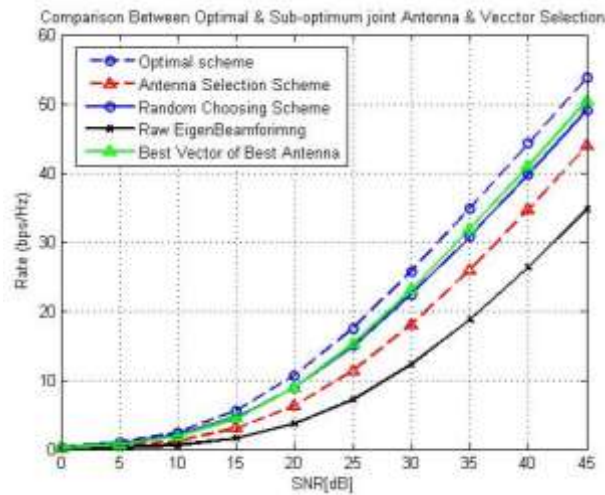
شکل (۵): مقایسه دو استراتژی نرخ شبکه با استفاده از روش گزینش بردار پرتوهای و آنتن تواما

Figure (5): Comparison of the two network model strategies using beam forming and antenna vector selection method.



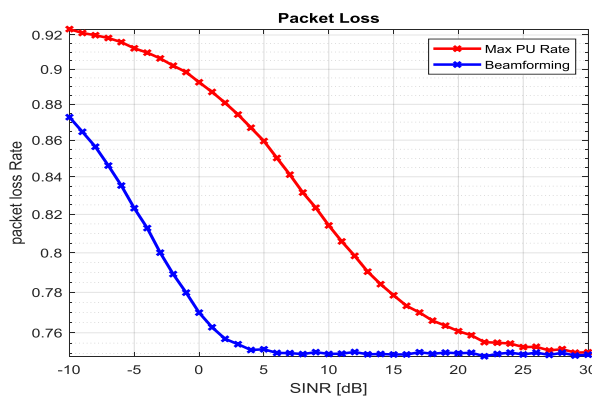
شکل (۶): احتمال نرخ انقطاع کاربر اولیه با توجه به دو استراتژی نرخ شبکه با استفاده از روش گزینش بردار پرتوهای و آنتن تواما

Figure (6): Probability of the initial user interruption according to two network rate strategies using the vector selection method of beam forming and antenna.



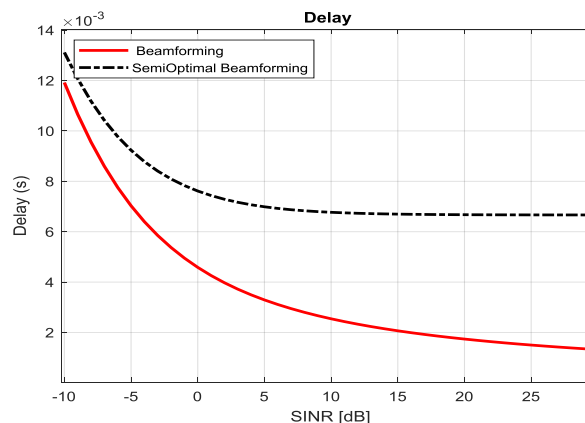
شکل (۷): نرخ کاربر اولیه در استراتژی افزایش نرخ کاربر اولیه با استفاده از روش‌های کارآمد، روش گزینش تصادفی، گزینش بهترین بردار بهترین آنتن و گزینش آنتن و همچنین طرح همسونهی تداخل پرتو دهی ویژه

Figure (7): Primary user rate in the initial user rate increases using efficient methods, random selection method, best - vector selection and antenna selection and special beam forming scheme



شکل (۸): نشان دهنده مقدار تلفات بسته (PL) در شبکه مورد نظر در مقایسه با روش شکل دهنده پرتو هماهنگ

Figure (8): Shows the number of packet loss (PL) in the network compared to the beam forming method



شکل (۹): مقایسه تاخیر با افزایش مقدار SINR در شبکه پیشنهادی و روش شکل دهنده پرتو هماهنگ

Figure (9): Comparison of delay by increasing the value of SINR in the proposed network forms and forms

اگرچه در روش شکل دهنده پرتو هماهنگ این مقدار هم از ۰/۹۵ تا ۰/۷۴ کاهش نشان داده است، مهم‌ترین قسمت برتری روش پیشنهادی، رسیدن به حداقل مقدار در SINR پایینتر است. به بیان دیگر در پیشنهادی، در مقدار SINR حدود ۱۰ دسیبل -

میلی‌وات به کمترین مقدار خود رسیده است. اما در شکل‌دهنده هماهنگ، در ۲۰ دسیبل-میلی‌وات این رخداد صورت گرفته است. به بیان دیگر با ارائه روش اصلاح شده پیشنهادی، مصرف انرژی در رسیدن به تلفات بسته اصلاح شده نیز کاهش خواهد یافت، که از مزایای روش پیشنهادی است. با تغییر افزایشی مقدار SINR انتظار می‌رود که مقدار تاخیر کاهش یابد. به بیان دیگر با افزایش تعداد کاربران مقدار تداخل نیز افزایش خواهد یافت. اما افزایش تداخل را می‌توان با افزایش مقدار SINR جبران کرد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، با افزایش مقدار SINR مقدار تداخل کاهش یافته است. اما با افزایش تعداد کاربران میزان تداخل نیز افزایش یافته است. این در حالی است که در روش پیشنهادی در مقایسه با روش شکل‌دهنده‌ی پرتو هماهنگ میزان افزایش تداخل نسبت به روش شکل‌دهنده‌ی پرتو هماهنگ بسیار کمتر است. شکل (۹) این مقایسه را نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله بهبود تخصیص منابع در شبکه‌های رادیو شناخت‌گر چندآنتنه چندحامله مشارکتی با استفاده از همسونهی تداخل مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق با استفاده از روش پیشنهادی و نوین انتخاب بردار پرتو دهی کارآمد در روش همسونهی تداخل پرتو دهی ویژه، با دو استراتژی شبکه مخابرات رادیو شناخت‌گر یکی مبتنی بر افزایش نرخ کاربر اولیه و دیگری افزایش نرخ مجموع کل شبکه مورد بررسی قرار داده شده است. نتایج نشان داد که با استفاده از این روش بدون نیاز به افزودن منابع اضافی از قبیل زیر حامل یا آنتن می‌توان شبکه‌ای منعطف داشت که با توجه به استراتژی شبکه رادیو شناخت‌گر می‌تواند ابزاری برای بهبود کارایی سیستم باشد. با توجه به نتایج پدید آمده هر دوی طرح‌های تداخل و همچنین طرح‌های زیر کارآمد پیشنهادی می‌تواند در شبکه‌های رادیو شناخت‌گر مختلف بنا به استراتژی و نوع شبکه به کار گرفته شود. همچنین به تخصیص توان در شبکه رادیو شناخت‌گر در راستای استراتژی‌های پیشینه‌سازی بازده انرژی و پیشینه‌سازی نرخ کاربران ثانویه با تضمین نرخ سطح آستانه کاربر اولیه پرداخته شده است.

References

مراجع

- [1] S. Xiao, X. Zhou, D. Feng, Y. Yuan-Wu, G. Y. Li, W. Guo, "Energy-efficient mobile association in heterogeneous networks with device-to-device communications", *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 15, no. 8, pp. 5260-5271, Aug. 2016 (doi: 10.1109/TWC.2016.2555797).
- [2] Y. Ni, J. Zhao, Y. Wang, H. Zhu, "Beamforming and interference cancellation for D2D communication assisted by two-way decode-and-forward relay node", *China Communications*, vol. 15, no. 3, pp. 100-111, March 2018 (doi: 10.1109/CC.2018.8331994).
- [3] M. Lin, J. Ouyang, W.P. Zhu, "Joint beamforming and power control for device-to-device communications underlaying cellular networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 1, pp. 138-150, Jan. 2016 (doi: 10.1109/JSAC.2015.2452491).
- [4] M. Lin, Q. Huang, T. Cola, W. Jun-Bo, J. Wang, M. Guizani, W. Jin-Yuan, "Integrated 5G-satellite networks: A perspective on physical layer reliability and security", *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no.6, Article Number: 152159, Oct. 2020 (doi:10.1109/MWC.001.2000143).
- [5] J. Shi, Q. Zhang, L. Ying-Chang, X. Yuan, "Distributed deep learning power allocation for D2D network based on outdated information", *Proceeding of the IEEE/WCNC*, pp. 1-6, Seoul, Korea (South), May 2020 (doi: 10.1109/WCNC45663.2020.9120717).
- [6] Y. Wang, L. Chen, Y. Zhou, X. Liu, F. Zhou, N. Al-Dhahir, "Resource allocation and trajectory design in UAV-assisted jamming wideband cognitive radio networks", *IEEE Trans. on Cognitive Communications and Networking*, vol. 7, no. 2, pp. 635-647, Aug. 2020 (doi: 10.1109/TCCN.2020.3014208).
- [7] F. Aghaei, A. Avokh, "MRCSC: A cross-layer algorithm for joint multicast routing, channel selection, scheduling, and call admission control in multi-cell multi-channel multi-radio cognitive radio wireless networks", *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 64, Article Number: 101150, April 2020 (doi: 10.1016/j.pmcj.20-20.101150).
- [8] T. Wang, Y. Wang, X. Wang, Y. Cao, "A detailed review of D2D cache in helper selection", *World Wide Web*, vol. 23, no. 4, pp. 240, April 2020 (doi: 10.1007/s11280-019-00756-z).
- [9] R. Liu, K. Guo, K. An, S. Zhu, C. Li, and L. Gao, "Performance Evaluation of NOMA-Based Cognitive Integrated Satellite Terrestrial Relay Networks With Primary Interference", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 71422-71434, May 2021 (doi: 10.1109/ACCESS.2021.3078630).

- [10] M. Haus, M. Waqas, A.Y. Ding, Y. Li, S. Tarkoma, J. Ott, "Security and privacy in device-to-device (D2D) communication: A review", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 1054-1079, Jan. 2017 (doi: 10.1109/COMST.2017.2649687).
- [11] A.D. Borah, M. Hussain, J. Bora, "Performance analysis of interference alignment-based precoding", *Electronic Systems and Intelligent Computing: Springer*, pp. 919-927, Sept. 2020 (doi: 10.1007/978-981-15-7031-5_87).
- [12] A.M. Soman, R. Nakkeeran, S.M. John, "Improved DFT-based channel estimation for spatial modulated orthogonal frequency division multiplexing systems", *IEICE Communications Express*, vol. 11, no. 5, pp. 208-215, May 2022 (doi: 10.1587/comex.2022XBL0020).
- [13] G. Peter, J. Livin, A. Sherine, "Hybrid optimization algorithm based optimal resource allocation for cooperative cognitive radio network", *Array*, vol. 12, Article Number: 100093, March 2022 (doi: 10.1016/j.array.2021.100093).
- [14] V.R. Cadambe, S.A. Jafar, C. Wang, "Interference alignment with asymmetric complex signaling- Settling the Høst-Madsen-Nosratinia conjecture", *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 56, no. 9, pp. 4552-4565, Aug. 2010 (doi: 10.1109/TIT.2010.2053895).
- [15] M.H. Al-Ali, K. Ho, "Enhanced precoder for secondary user of MIMO cognitive radio in the presence of CSIT uncertainties in the desired and interference links", *Signal Processing*, vol. 190, Article Number: 108294, Aug. 2021 (doi: 10.1016/j.sigpro.2021.108294).
- [16] A. Avokh, G. Mirjalily, "Performance analysis of broadcasting in small-scale multi-radio multi-channel wireless mesh networks", *Proceeding of the IEEE/ICACT*, pp. 537-542, PyeongChang, Korea (South), Feb. 2012.
- [17] C. Hellings, F. Askerbeyli, W. Utschick, "Two-user SIMO interference channel with treating interference as noise: Improper signaling versus time-sharing", *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 68, pp. 6467-6480, Sept. 2020 (doi: 10.1109/TSP.2020.3027903).
- [18] M. Soleymani, I. Santamaria, P.J. Schreier, "Improper gaussian signaling for the K -user MIMO interference channels with hardware impairments", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 10, pp. 11632-11645, Aug. 2020 (doi: 10.1109/TVT.2020.3015558).
- [19] P. Mohapatra, K. Nissar, C.R. Murthy, "Interference alignment algorithms for the K -user constant MIMO interference channel", *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 59, no. 11, pp. 5499-5508, Aug. 2011 (doi: 10.1109/TSP.2011.2164069).
- [20] M.A. Beigi, S.M. Razavizadeh, "Cooperative beamforming in cognitive radio networks", *Proceeding of the IEEE/IFIP*, pp. 1-5, Paris, France, Dec. 2009 (doi: 10.1109/WD.2009.5449675).
- [21] D. Zhang, Z. Chen, M. K. Awad, N. Zhang, H. Zhou, X.S. Shen, "Utility-optimal resource management and allocation algorithm for energy harvesting cognitive radio sensor networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 12, pp. 3552-3565, Sept. 2016 (doi: 10.1109/JSAC.2016.2611960).
- [22] H. Kalbkhani, V. Solouk, M.G. Shayesteh, "Resource allocation in integrated femto-macrocell networks based on location awareness", *IET Communications*, vol. 7, pp. 917-932, May 2015 (doi: 10.1049/iet-com.2-014.0691).
- [22] Hashem Kalbkhani, Vahid Solouk, Mahrokh G. Shayesteh, "Resource allocation in integrated femto-macrocell networks based on location awareness", *IET Communications*, vol. 7, pp. 917-932, 2015 (doi: 10.1049/iet-com.2014.0691).

زیر نویس ها

1. Cognitive radio
2. Interference alignment
3. Degree of freedom
4. Signal to interference and noise ratio
5. Quality of service
6. Multiple-input, multiple-output orthogonal frequency-division multiplexing
7. Data stream
8. Super-symbol
9. Orthogonal frequency division multiplexing
10. Rank deficient
11. Sum-rate
12. Channel state information
13. Beam forming
14. Macrocell
15. Femtocell