

الگوریتم جدید انتخاب آنتن در سیستم‌های چندورودی-چندخروجی کلان

صبا اسعد^۱، پژوهش‌گر پسادکتری؛ امیرمسعود ربیعی^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران- saba.asaad@ut.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران- rabiei@ut.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر سیستم‌های چندورودی-چندخروجی کلان به‌عنوان یکی از فن‌آوری‌های پیشنهادی برای استفاده در نسل پنجم سیستم‌های مخابرات بی‌سیم معرفی شده‌اند. از ویژگی‌های این سیستم‌ها افزایش بازدهی طیفی و بازدهی انرژی در مقایسه با سیستم‌های چندورودی-چندخروجی مرسوم است. در این فن‌آوری در هر ایستگاه پایه تعداد زیادی آنتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین تعداد کاربران در سلول‌ها نیز بسیار بیشتر از تعداد کاربران در سلول‌های کنونی است. افزایش تعداد آنتن‌ها، منجر به افزایش پیچیدگی و هزینه‌ی پیاده‌سازی این سیستم‌ها می‌گردد. داشتن یک زنجیره رادیو فرکانسی به‌ازای هر آنتن، هزینه‌ی پیاده‌سازی این سیستم‌ها را به شدت افزایش می‌دهد. از این‌رو روش‌های انتخاب آنتن برای کاهش پیچیدگی پیاده‌سازی در این سیستم‌ها پیشنهاد شده است. در این مقاله یک الگوریتم زیربینه‌ی برای انتخاب آنتن پیشنهاد می‌شود که در آن در هر مرحله هدف انتخاب آنتنی است که بیشینه‌ی نرخ قابل دستیابی را ماکزیمم کند. به این ترتیب آنتنی که در مراحل قبلی انتخاب شده ولی با انتخاب آنتن جدید لزوماً بهینه نیست از مجموعه‌ی آنتن‌های انتخابی خارج می‌شود. مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های موجود حاکی از عملکرد بسیار مطلوب الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌های موجود است.

واژه‌های کلیدی: انتخاب آنتن، پیچیدگی محاسباتی، زنجیره رادیوفرکانسی، سیستم‌های چندورودی-چندخروجی کلان.

A Novel Fast Antenna Selection Algorithm in Massive MIMO Systems

Saba Asaad¹, Postdoctoral Research Fellow; Amir Masoud Rabiei², Assistant professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: saba.asaad@ut.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: rabiei@ut.ac.ir

Abstract: In recent years, Massive Multiple-Input Multiple-Output (MMIMO) systems have emerged as a promising enabling technology to address the ever-growing demand of data traffic in the next generation of wireless networks. These systems received a great deal of interest due to their promise of high performance gains. These gains are mainly achieved at the expense of having a tremendous number of antenna elements within a relatively small physical platform. The growth in the number of antennas, however, significantly increases the Radio Frequency (RF) expenses. Therefore, developing solutions to alleviate this problem has become a major topic of interest. In this paper a stepwise regression approach is proposed to find an effective subset of transmit antennas. In each step of our scheme, we choose the antenna that maximizes the achievable rate and discard the antenna that has been selected in the previous step. Our numerical results show that the proposed antenna selection scheme outperforms the other schemes in the literature.

Keywords: Antenna selection, computational complexity, massive multiple input multiple output, radio frequency chain.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۱۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۰۱

نام نویسنده مسئول: امیرمسعود ربیعی

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر حجم داده مبادله‌شده در شبکه‌های مخابراتی، رشد چشم‌گیری داشته است. این رشد عظیم عمدتاً از افزایش تعداد کاربران شبکه‌های مخابراتی همزمان با افزایش حجم تقاضای هر کاربر ناشی می‌شود. تخمین زده می‌شود که تا پایان دهه‌ی فعلی میلادی، تعداد کاربران تلفن همراه هوشمند از مرز ۲ میلیارد کاربر عبور کند [۱]. از طرف دیگر، افزایش روزافزون کیفیت تصاویر ویدئویی، همزمان با ارائه‌ی خدمات هوشمند از طریق شبکه‌های مخابراتی، حجم اطلاعات انتقالی توسط هر کاربر را به‌صورت نمایی افزایش می‌دهد [۲].

به‌منظور جابه‌جایی این حجم عظیم از داده، شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم نیازمند تغییرات بنیادین در ساختار خود هستند. در حقیقت اعداد و ارقام جمع‌آوری‌شده از مطالعات عددی نشان می‌دهد که بهینه‌سازی ساختارهای موجود به‌تنهایی پاسخگوی این حجم تقاضا نیست. بنابراین ساختار شبکه‌های مخابراتی کنونی باید به‌کلی دست‌خوش تغییر شوند [۳]. نسل جدید شبکه‌های مخابرات بی‌سیم که از آن تحت عنوان نسل پنجم^۱ یاد می‌شود، به‌دنبال ارائه‌ی راهکاری مناسب برای این چالش، با در نظر گرفتن رویکرد فوق یعنی بازطراحی اجزای شبکه‌های مخابراتی است [۴].

پاسخ‌گویی به نیازمندی‌های جدید در شبکه‌های مخابراتی، همزمان با در نظر گرفتن محدودیت‌های سخت‌افزاری موجود، اهمیت بهره‌مندی از ساختارهای کارآمد و طراحی هوشمندانه را بیش از پیش آشکار می‌سازد. ساختارهایی نظیر سیستم‌های چندورودی-چندخروجی^۲ [۵]، شبکه‌های ناهمگون^۳ [۶] شبکه‌های سلولی با سلول‌های کوچک^۴ [۷] و ساختارهای دسترسی چندگانه نوین [۸] از جمله این ساختارها هستند که با بهره‌مندی از ایده‌های نوینی نظیر سیستم‌های چندورودی-چندخروجی کلان و یا ساختارهای دسترسی چندگانه غیرمتعامد^۵ امکان بهبود مؤثر عملکرد سیستم‌های مخابراتی را فراهم می‌آورند.

مطالعات نظری این سیستم‌ها در حالت حدی که تعداد آنتن‌های گیرنده، فرستنده و یا هر دو به سمت مقادیر بزرگ میل می‌کند، نشان‌گر آن است که در این حالت این سیستم‌ها ویژگی‌های حدی مناسبی از خود نشان می‌دهند [۹، ۱۰]. در واقع در این حالت سیستم‌های چندآنتنی (که تحت عنوان سیستم‌های چندآنتنی کلان از آن‌ها یاد می‌شود) به‌علت افزایش تعداد آنتن‌ها امکان دستیابی به نرخ چندگانگی و تسهیم بالا را به‌صورت توأم دارند [۱۱]. این مساله باعث شده است تا سیستم‌های چندآنتنی کلان^۶ یکی از فن‌آوری‌های مورد توجه در طراحی نسل جدید شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم باشند [۱۲، ۱۳]. در واقع به علت بهره‌مندی از نرخ ارسال بالای داده در پهنای باند محدود، ضمن حل مشکل محوشوندگی کانال، این سیستم‌ها می‌توانند حجم بالایی تقاضای موجود در نسل جدید شبکه‌های بی‌سیم را نیز پاسخگو باشند [۱۴]. در این میان اما مسأله پیاده‌سازی این سیستم‌ها یکی از مهم‌ترین چالش‌های مورد توجه پژوهشگران است. در سال‌های اخیر، با حرکت به

سمت باند فرکانسی امواج میلی‌متری^۷ امکان طراحی آرایه‌های بزرگ آنتن در ابعاد فیزیکی محدود به‌وجود آمده است [۱۵].

با این حال این سیستم‌ها در عمل از نظر هزینه به‌صرفه نیستند. در واقع، علی‌رغم امکان پیاده‌سازی این سیستم‌ها در ابعاد محدود، هزینه‌ی بالای ادوات رادیو فرکانسی^۸ این سیستم‌ها که بخش عمده‌ی هزینه‌ی پیاده‌سازی را شامل می‌شود، فراگیرکردن این سیستم‌ها را به‌عنوان یک فن‌آوری تجاری در حال حاضر دچار چالش می‌سازد.

با توجه به بحث‌های ارائه‌شده، به‌منظور پیاده‌سازی عملی این سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی انبوه و معرفی آن به‌عنوان یک فن‌آوری تجاری در نسل‌های جدید سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم، طراحی این سیستم‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های سخت‌افزاری (که منجر به هزینه‌ی کم پیاده‌سازی می‌گردد) از اهمیت بالایی برخوردار است. این محدودیت‌ها شامل استفاده از تقویت‌کننده‌های توان با بازه‌ی دینامیکی کوچک، محدودیت در تعداد ادوات رادیو فرکانسی، استفاده از بلوک‌های پردازش ساده در محل گیرنده‌ها و یا بهره‌مندی از مدارهای واسط غیر ایده‌آل می‌باشند.

در این مقاله یک الگوریتم زیربهینه، سریع و کارآمد برای انتخاب آنتن در فرستنده و گیرنده‌ی سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی کلان پیشنهاد می‌شود. فرض می‌شود که اطلاعات کانال در سمت گیرنده موجود است. لازم به یادآوری است که برای به‌دست آوردن اطلاعات کانال، به تخمین کانال نیاز است و یکی از روش‌های کارآمد جهت تخمین کانال استفاده از فیلترهای وقفی می‌باشد که در مراجع [۱۶، ۱۷] به‌تفصیل معرفی شده‌اند. در ادامه عملکرد الگوریتم فوق با الگوریتم بهینه‌ی انتخاب آنتن و نیز چند روش زیربهینه‌ی دیگر مقایسه می‌شود. نتایج مقایسه حاکی از عملکرد نزدیک به بهینه‌ی الگوریتم پیشنهادی و برتری آن بر سایر روش‌های زیربهینه‌ی پیشنهادشده در این حوزه است.

ساختار ادامه‌ی مقاله به‌این صورت است که در بخش دوم به بررسی مدل سیستم استفاده‌شده در این مقاله پرداخته می‌شود. در فصل سوم الگوریتم انتخاب آنتن پیشنهادی معرفی شده و پارامترهای مربوط به این الگوریتم بررسی می‌شوند. در ادامه و در فصل چهارم به ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها پرداخته‌شده و الگوریتم مطرح‌شده با الگوریتم‌های مطرح در این حوزه مقایسه می‌شود. در فصل پنجم، خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده در مقاله ارائه خواهد شد.

نحوه استفاده از نمادها در این مقاله به این صورت است که حروف بزرگ انگلیسی پررنگ، حروف انگلیسی کوچک پررنگ و حروف انگلیسی کوچک معمولی به ترتیب نماینده ماتریس، بردار و اعداد اسکالر هستند. $(\cdot)^H$ و $(\cdot)^T$ به ترتیب نشانگر فرم‌های ترانزپوز و هرمیتی از یک ماتریس هستند. نماد $\mathbb{E}\{\cdot\}$ نشان‌دهنده میانگین آماری و $\det(\cdot)$ نماد دترمینان ماتریس است. $\text{tr}(\mathbf{A})$ مجموع عناصر روی قطر اصلی ماتریس مربعی \mathbf{A} و $\|\mathbf{B}\|_F$ نرم فروبنیوس ماتریس \mathbf{B} است.

۲- مدل سیستم

در روابط بالا، $\{\sigma_i\}_{i=1}^{N_s}$ مقادیر ویژه‌ی ماتریس کانال \mathbf{H} هستند. ظرفیت کانال برای نسبت سیگنال به نویز بالا به صورت زیر تخمین زده می‌شود [۶]:

$$\begin{aligned} C(\mathbf{H}) &\approx N_s \log_2 \frac{\rho}{N_s} + \sum_{i=1}^{N_s} \log_2 \sigma_i^2 \\ &= N_s \log_2 \frac{\rho}{N_s} + \log_2 \prod_{i=1}^{N_s} \sigma_i^2 \\ &= N_s \log_2 \frac{\rho}{N_s} + \log_2 (\det[\mathbf{H}^H \mathbf{H}]) \end{aligned} \quad (11)$$

با توجه به رابطه‌ی (۱۱) مسئله‌ی بهینه‌سازی (۸) برای سیگنال به نویزهای بالا به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\tilde{\mathbf{H}}_{opt} = \max_{\tilde{\mathbf{H}} \in S(\tilde{\mathbf{H}})} \det(\tilde{\mathbf{H}}^H \tilde{\mathbf{H}}) = \max_{\tilde{\mathbf{H}} \in S(\tilde{\mathbf{H}})} |\det[\tilde{\mathbf{H}}]|^2 \quad (12)$$

روندی مشابه روند فوق برای حل مسئله در سیگنال به نویزهای پایین وجود دارد، در این حالت ظرفیت به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$C(\mathbf{H}) \approx \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N_s} \text{tr}(\mathbf{H}\mathbf{H}^H) \right) \quad (13)$$

به کمک رابطه‌ی $\|\mathbf{H}\|_F = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)}$ رابطه‌ی (۱۳) به صورت زیر ساده می‌شود [۱۸]:

$$C(\mathbf{H}) = \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N_s} \|\mathbf{H}\|_F^2 \right) \quad (14)$$

در رابطه‌ی (۱۴) $\|\mathbf{H}\|_F$ نرم فروبنیوس ماتریس \mathbf{H} است که برابر با مجموع مربعات درایه‌های ماتریس \mathbf{H} است، یعنی:

$$\|\mathbf{H}\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_r} |h_{ij}|^2} \quad (15)$$

با توجه به رابطه‌ی (۱۴) مسئله‌ی بهینه‌سازی (۸) برای سیگنال به نویزهای پایین به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\tilde{\mathbf{H}}_{opt} = \max_{\tilde{\mathbf{H}} \in S(\tilde{\mathbf{H}})} \|\tilde{\mathbf{H}}\|_F^2 \quad (16)$$

رابطه‌ی ورودی خروجی برای یک سیستم چندورودی-چندخروجی با N_s آنتن در فرستنده و N_r آنتن در گیرنده، به صورت زیر توصیف می‌شود [۶]:

$$\mathbf{r}(t) = \sqrt{\frac{\rho}{N_s}} \mathbf{H}\mathbf{s}(t) + \mathbf{w}(t) \quad (1)$$

که در رابطه‌ی (۱):

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_{N_s}(t)]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{r}(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_{N_r}(t)]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{w}(t) = [w_1(t), w_2(t), \dots, w_{N_r}(t)]^T \quad (4)$$

در روابط بالا $\mathbf{s}(t)$ ، $\mathbf{r}(t)$ و $\mathbf{w}(t)$ به ترتیب سیگنال ارسالی، سیگنال دریافتی و بردار نویز جمع‌شونده با میانگین صفر و ماتریس \mathbf{H} ماتریس کانال با ابعاد $N_r \times N_s$ است. هم‌چنین بدون ازدست‌دادن کلیت مساله فرض می‌شود $\mathbb{E}\{|w_i(t)|^2\} = 1$

در این مقاله فرض می‌شود که اطلاعات کانال فقط در گیرنده در موجوداست و فرستنده اطلاعاتی در مورد ضرایب کانال ندارد. به این ترتیب فرستنده توان را به صورت یکنواخت بین آنتن‌های خود تقسیم و اطلاعات را روی کانال ارسال می‌کند. در این حالت ظرفیت کانال برای هر تحقق کانال برابر است با [۶]:

$$C(\mathbf{H}) = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \right) \quad (5)$$

$$= \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_s} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \quad (6)$$

در رابطه‌ی (۵) و (۶)، \mathbf{I}_n ماتریس یکانی واحد با ابعاد $n \times n$ است. اگر فرض شود در سمت گیرنده L_r زنجیره‌ی رادیو فرکانسی وجود دارد، در مسئله‌ی انتخاب آنتن هدف یافتن آنتن‌هایی است که ظرفیت را ماکزیمم کنند. ظرفیت کانال پس از انتخاب آنتن‌ها برابر است با:

$$\tilde{C}(\mathbf{H}) = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \tilde{\mathbf{H}}^H \tilde{\mathbf{H}} \right) \quad (7)$$

در رابطه (۷) ماتریس $\tilde{\mathbf{H}}$ ماتریس کانال متناظر با آنتن‌های انتخابی با ابعاد $L_r \times N_s$ است. در این جا هدف یافتن $\tilde{\mathbf{H}}_{opt}$ است به طوری که ظرفیت ماکزیمم شود یعنی:

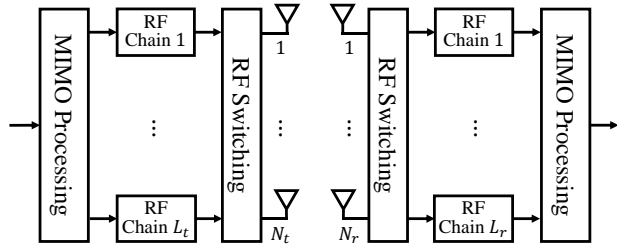
$$\tilde{\mathbf{H}}_{opt} = \max_{\tilde{\mathbf{H}} \in S(\tilde{\mathbf{H}})} \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \tilde{\mathbf{H}}^H \tilde{\mathbf{H}} \right) \quad (8)$$

که در رابطه‌ی (۸)، $S(\tilde{\mathbf{H}})$ مجموعه‌ی تمام زیرماتریس‌های با ابعاد $L_r \times N_s$ از ماتریس کانال است. لازم به یادآوری است که:

$$\det \left(\mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \right) = \prod_{i=1}^{N_s} \left(1 + \frac{\rho}{N_s} \sigma_i^2 \right) \quad (9)$$

$$C(\mathbf{H}) = \sum_{i=1}^{N_s} \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N_s} \sigma_i^2 \right) \quad (10)$$

می‌توان گفت در اولین مرحله با یک مجموعه‌ی تهی از آنتن‌ها شروع کرده و آنتنی انتخاب می‌شود که بیشترین اثر را در ماکزیمم کردن ظرفیت دارد. در هر مرحله از فرمول‌های به‌روز کردن بهینه استفاده می‌



شکل ۱: شمای الگوریتم انتخاب آنتن در فرستنده و گیرنده

شود و این روند ادامه می‌یابد تا تعداد آنتن‌ها برابر با تعداد ادوات رادیوفرکانسی موجود در سیستم شود. در واقع در این الگوریتم به صورت پیش‌رونده آنتن‌هایی که باعث افزایش نرخ قابل‌دستیابی می‌شود، انتخاب می‌شوند. نکته‌ای که در این میان حائز اهمیت است آن است که مسئله‌ی انتخاب آنتن در حالت کلی جداسدنی^{۱۵} نیست و انتخاب آنتن‌ها به صورت تک‌تک در حالت کلی معادل با انتخاب همزمان بهترین آنتن‌ها نیست و لزوماً به جواب بهینه منجر نمی‌شود. از این‌رو در الگوریتم پیشنهادی از مرحله‌ی دوم به بعد، پس از انتخاب هر آنتن یک بار به بررسی آنتن‌های انتخابی در مراحل قبلی پرداخته می‌شود. به این‌نحو که به‌ازای هر آنتن انتخاب‌شده در مراحل قبلی هر آنتن یک بار حذف‌شده و با آنتن‌های باقی مانده که هنوز انتخاب نشده‌اند جایگزین می‌شود. در ادامه معیار ظرفیت محاسبه شده و آنتنی که در مراحل قبلی الزاماً بهینه نبوده ولی انتخاب شده‌است با یک آنتن جدید جایگزین می‌شود. در نهایت مجموعه‌ی اندیس‌های آنتن‌های انتخاب شده به‌روزرسانی می‌شود. الگوریتم پیشنهادی انتخاب آنتن در ادامه آمده است.

الگوریتم پیشنهادی

- (1) Fast Ant. Sel. ($N_r, N_s, L_r, \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_{N_r}, \rho$)
- (2) $\mathfrak{X}^0 = \{1, 2, \dots, N_r\}, \mathcal{J}^0 = \emptyset$
- (3) For $\forall i \in \mathfrak{X}^0$
- (4) $\alpha_i^0 := \mathbf{h}_i^H \mathbf{h}_i$
- (5) End
- (6) choose $j_1^* = \arg \max_i \alpha_i^0$
- (7) $\mathcal{J}^0 = \{j_1^*\}, \mathfrak{X}^1 = \mathfrak{X}^0 - j_1^*$
- (8) $\tilde{\mathbf{H}}_1 = [\mathbf{h}_{j_1^*}^H]$
- (9) $\mathbf{B}_1 = \mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \mathbf{h}_{j_1^*} \mathbf{h}_{j_1^*}^H$
- (10) For $n := 2$ to L_r
- (11) For $\forall i \in \mathfrak{X}^{n-1}$
- (12) $\tilde{\mathbf{H}}_n = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}}_{n-1} \\ \mathbf{h}_i^H \end{bmatrix}$
- (13) $\mathbf{B}_n = \mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \tilde{\mathbf{H}}_n \tilde{\mathbf{H}}_n^H$
- (14) $\alpha_i^n := \mathbf{h}_i^H \mathbf{B}_n^{-1} \mathbf{h}_i$
- (15) Choose $j_n^* = \arg \max_i \alpha_i^n$

یکی از راه‌های یافتن زیرماتریس بهینه حل مسئله‌ی بهینه‌سازی بالا است. در ادامه یک الگوریتم زیربهینه^۹ برای یافتن آنتن‌های انتخابی ارائه شده است.

۳- الگوریتم پیشنهادی

در این بخش یک الگوریتم زیربهینه برای انتخاب آنتن در گیرنده ارائه می‌شود. مبحث انتخاب آنتن از این جهت مهم است که داشتن یک زنجیره رادیو فرکانسی به‌ازای هر آنتن در سیستم‌های چندرودی-چندخروجی در حالتی که تعداد آنتن‌ها بسیار زیاد است به مراتب پیچیده‌تر و گرانیقیمت‌تر از سیستم‌های چندآنتنی عادی است. علاوه بر هزینه‌های پیاده‌سازی این سیستم‌ها مصرف انرژی سخت‌افزاری ممکن است به شدت افزایش پیدا کند و همین موضوع بهینگی این سیستم‌ها را از نظر مصرف انرژی زیر سؤال می‌برد. معیارهای مختلفی برای انتخاب آنتن وجود دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به معیار ظرفیت سیستم، نسبت سیگنال به نویز پس از پردازش^{۱۰} و مربع خطای میانگین اشاره کرد. در این مقاله معیار ظرفیت برای انتخاب آنتن در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، فرض می‌شود N_s آنتن در فرستنده و N_r آنتن در گیرنده وجود دارد و تعداد L_r زنجیره‌ی رادیوفرکانسی در گیرنده موجود است به طوری که $1 \leq L_r \leq N_r$ و هدف انتخاب L_r آنتن در گیرنده است به گونه‌ای که بهترین عملکرد به دست آید. راه‌حل بهینه‌ای که در این زمینه مطرح می‌شود جستجوی کامل^{۱۱} است. در این حالت باید به منظور یافتن آنتن‌های بهینه، ظرفیت کانال یعنی رابطه‌ی (۵)، به‌ازای تمام حالت‌های ممکن انتخاب L_r آنتن از N_r آنتن یعنی $\binom{N_r}{L_r}$ محاسبه شود، پیچیدگی محاسباتی این روش هنگام افزایش تعداد آنتن‌ها، بسیار زیاد است، به طوری که در زمان چندجمله‌ای امکان پذیر نیست و لذا مسئله از نوع غیر چندجمله‌ای سخت است. به منظور رهایی از این مشکل، راه‌حل‌های زیربهینه‌ای مطرح شده‌اند که در عین پیچیدگی محاسباتی کم‌تر، عملکرد قابل قبولی از خود نشان می‌دهند. دسته‌ی اول از الگوریتم‌های مطرح‌شده از الگوریتم‌های جستجوی حریصانه برای کاهش پیچیدگی استفاده می‌کند و شامل الگوریتم‌های انتخاب پیش‌رونده^{۱۲} و انتخاب بازگشتی^{۱۳} و یا ترکیبی از این دو الگوریتم است و دسته‌ی دیگر که به استفاده از معیارهایی نظیر انتخاب قوی‌ترین آنتن‌ها^{۱۴} می‌پردازد.

از مهم‌ترین مقالات در این زمینه می‌توان به [۲۰، ۱۹] اشاره کرد که هر دو به انتخاب آنتن در گیرنده می‌پردازند. در ادامه‌ی مقاله، یک الگوریتم زیربهینه برای انتخاب آنتن در گیرنده مطرح شده و با الگوریتم‌های مطرح‌شده در [۲۰، ۱۹] مقایسه می‌گردد. سپس این الگوریتم به الگوریتم انتخاب آنتن در فرستنده تعمیم داده می‌شود.

۳-۱ الگوریتم انتخاب آنتن پیشنهادی

در پروتکل مطرح‌شده در این قسمت مدل مطرح‌شده در بخش ۲ در نظر گرفته می‌شود. برای توضیح پروتکل مطرح‌شده به‌طور خلاصه،

لم ۲ (فرمول وودبری): اگر \mathbf{A} یک ماتریس مربعی وارون پذیر و \mathbf{V} یک ماتریس مستطیلی باشد، بر اساس لم وودبری می توان دید [۲۱]:

$$[\mathbf{A} + \mathbf{V}\mathbf{V}^H]^{-1} = \mathbf{A}^{-1} + \mathbf{A}^{-1}\mathbf{V}(\mathbf{I} - \mathbf{V}^H\mathbf{A}^{-1}\mathbf{V})^{-1}\mathbf{V}^H\mathbf{A}^{-1}$$

به کمک بسط مرتبه یک ملاحظه می شود:

$$\tilde{\mathbf{H}}_{n+1}^H \tilde{\mathbf{H}}_{n+1} = \tilde{\mathbf{H}}_n^H \tilde{\mathbf{H}}_n + \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H \quad (19)$$

به این ترتیب رابطه (۱۷) به کمک بسط مرتبه یک به صورت زیر در می آید:

$$C(\tilde{\mathbf{H}}_{n+1}) = \log_2 \det(\mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \tilde{\mathbf{H}}_{n+1}^H \tilde{\mathbf{H}}_{n+1}) \quad (20)$$

$$= \log_2 \det\left(\mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \tilde{\mathbf{H}}_n^H \tilde{\mathbf{H}}_n + \frac{\rho}{N_s} \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H\right) \quad (21)$$

حال به کمک لم ۱ اگر فرض شود که ماتریس های \mathbf{A} ، \mathbf{u} و \mathbf{v} به صورت زیر هستند:

$$\mathbf{A} = \mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \tilde{\mathbf{H}}_n^H \tilde{\mathbf{H}}_n \quad (22)$$

$$\mathbf{u} = \frac{\rho}{N_s} \mathbf{h}_j \quad (23)$$

$$\mathbf{v}^T = \mathbf{h}_j^H \quad (24)$$

ملاحظه می شود:

$$C(\tilde{\mathbf{H}}_{n+1}) = C(\tilde{\mathbf{H}}_{n+1}) + \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N_s} \mathbf{h}_j^H \left(\mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \tilde{\mathbf{H}}_n^H \tilde{\mathbf{H}}_n\right)^{-1} \mathbf{h}_j\right) \quad (25)$$

عبارت (۲۵) سهم هر آنتن را در افزایش ظرفیت نشان می دهد و باید آنتنی انتخاب شود که عبارت فوق را ماکزیمم می کند. از آن جا که تابع لگاریتم یک تابع اکیداً یکنوا است، ماکزیمم کردن تابع هدف ظرفیت معادل با ماکزیمم کردن آرگومان داخل آن است. اگر فرض شود:

$$\mathbf{B}_n = \left(\mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \tilde{\mathbf{H}}_n^H \tilde{\mathbf{H}}_n\right) \quad (26)$$

آن گاه ملاحظه خواهد شد:

$$\alpha_i^n := \mathbf{h}_i^H \mathbf{B}_n^{-1} \mathbf{h}_i \quad (27)$$

و آنتنی انتخاب می شود که α_i^n را ماکزیمم کند:

$$j_n^* = \arg \max_i \alpha_i^n \quad (28)$$

حالت خاص: در اولین مرحله الگوریتم از آن جا که هنوز هیچ آنتنی انتخاب نشده است و مجموعه \mathcal{J} یک مجموعه تهی است، رابطه ظرفیت با فرض انتخاب زامین سطر به صورت زیر محاسبه می شود:

$$C(\mathbf{h}_j) = \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N_s} \mathbf{h}_j^H \mathbf{h}_j\right) \quad (29)$$

اگر مقدار $\mathbf{h}_j^H \mathbf{h}_j$ با نماد α_i^0 نمایش داده شود، در اولین مرحله باید آنتنی پیدا شود که مقدار α_i^0 را ماکزیمم می کند. شایان ذکر است در این جا نیز چون تابع لگاریتم یک تابع اکیداً یکنواست، ماکزیمم کردن آرگومان لگاریتم کافی است. به این ترتیب می توان نوشت:

$$j_1^* = \arg \max_i \alpha_i^0 \quad (30)$$

$$\mathcal{J}^n = \mathcal{J}^{n-1} \cup \{j_n^*\}, \mathcal{I}^n = \mathcal{I}^{n-1} - \{j_n^*\}, \quad (16)$$

$$\tilde{\mathbf{H}}_n = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}}_{n-1} \\ \mathbf{h}_{j_n^*}^H \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\text{for } \ell := 1 \text{ to } n - 1 \quad (18)$$

$\tilde{\mathbf{H}}_n^\ell = \text{eliminate } \ell \text{ rows of } \tilde{\mathbf{H}}_n$

$$\mathbf{A}_\ell = \mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} (\tilde{\mathbf{H}}_n^\ell)^H \tilde{\mathbf{H}}_n^\ell \quad (19)$$

$$\beta_\ell := \mathbf{h}_\ell^H \mathbf{A}_\ell^{-1} \mathbf{h}_\ell \quad (20)$$

End

For $\forall k \in \mathcal{I}^n$

$$\beta_k := \mathbf{h}_k^H \mathbf{A}_\ell^{-1} \mathbf{h}_k \quad (21)$$

End

Choose $k^* = \arg \max_{k \in \mathcal{I}^n} \beta_k$

if $\beta_{k^*} > \beta_\ell$

$$j_n^* \leftrightarrow k^*, \tilde{\mathbf{H}}_n(\ell, :) = \tilde{\mathbf{H}}_n(k, :) \quad (22)$$

$$\mathcal{I}^n = \mathcal{I}^n \cup \{j_n^*\} - \{k^*\} \quad (23)$$

$$\mathcal{J}^n = \mathcal{J}^n \cup \{k^*\} - \{j_n^*\} \quad (24)$$

End

(31) End

شایان ذکر است که ورودی های این الگوریتم ماتریس کانال \mathbf{H} تعداد آنتن های انتخابی یا همان تعداد زنجیره های رادیوفرکانسی L_r و نسبت سیگنال به نویز یعنی ρ و خروجی الگوریتم پیشنهادی فوق مجموعه کانال متناظر با آنتن های انتخابی یعنی $\tilde{\mathbf{H}}$ است. در بخش بعدی این مقاله به بررسی پارامترهای مورد نیاز در پروتکل پیشنهادی انتخاب آنتن و فرمول به روزرسانی مورد نیاز برای انتخاب آنتن پرداخته می شود.

۳-۲- پارامترهای الگوریتم انتخاب آنتن

در الگوریتم پیشنهادی در هر مرحله هدف انتخاب آنتنی است که بیشینه نرخ قابل دستیابی را ماکزیمم کند و آنتنی که در مراحل قبلی انتخاب شده است، ولی با انتخاب آنتن جدید در مرحله بعدی لزوماً بهینه نیست از مجموعه آنتن های انتخابی خارج شده و با یک آنتن جدید جایگزین شود. اگر فرض شود در مرحله n م الگوریتم، n آنتن انتخاب شده است، ماتریس کانال در این مرحله با $\tilde{\mathbf{H}}_n$ نمایش داده می شود که یک ماتریس با ابعاد $n \times N_s$ و منطبق بر n سطر انتخاب شده از ماتریس کانال، یعنی ماتریس \mathbf{H} است. شایان ذکر است که در الگوریتم مطرح شده \mathbf{h}_j^H نماد سطر j ام ماتریس \mathbf{H} است، به علاوه مجموعه \mathcal{J} شامل اندیس های آنتن های انتخاب شده است. در مرحله $n + 1$ ، اگر فرض شود زامین سطر ماتریس \mathbf{H} یعنی آنتن j ام انتخاب شده است، به کمک رابطه (۶) ملاحظه می شود:

$$C(\tilde{\mathbf{H}}_{n+1}) = \log_2 \det(\mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \tilde{\mathbf{H}}_{n+1}^H \tilde{\mathbf{H}}_{n+1}) \quad (17)$$

لم ۱ (فرمول شِرمِن مُرِیسِن): اگر \mathbf{A} یک ماتریس مربعی وارون پذیر و \mathbf{u} و \mathbf{v} بردارهای ستونی باشند، طبق لم شِرمِن مُرِیسِن می توان نوشت [۱۸]:

$$\det(\mathbf{A} + \mathbf{u}\mathbf{v}^T) = (1 + \mathbf{v}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{u}) \det(\mathbf{A}) \quad (18)$$

۴- نتایج عددی و شبیه‌سازی‌ها

هم‌چنین در مورد قسمت دوم الگوریتم یعنی بررسی دوباره آنتن‌های انتخاب شده، اگر n آنتن انتخاب شده در این مرحله را با $\tilde{\mathbf{H}}_n$ نمایش دهیم، ماتریسی که با حذف شدن ℓ امین سطر از این ماتریس حاصل می‌شود را با $\tilde{\mathbf{H}}_n^\ell$ نمایش داده می‌شود.

۳-۳- پیچیدگی محاسباتی الگوریتم پیشنهادی

پیچیدگی محاسباتی الگوریتم پیشنهادی توسط پیچیده‌ترین حلقه‌ی تکرار در جدول ۱ تعیین می‌شود. بدین‌منظور در ادامه به بررسی پیچیدگی محاسباتی حلقه‌های تکرار در الگوریتم پیشنهادی انتخاب آنتن پرداخته خواهد شد.

با مراجعه به جدول ۱ مشاهده می‌شود که در بند ۳، حلقه‌ی تکرار دارای پیچیدگی‌ای از مرتبه‌ی $N_s N_r$ است. حلقه‌ی بند ۱۲ نیز دارای پیچیدگی محاسباتی از مرتبه‌ی $N_s^2 L_r N_r$ است. عمده‌ی پیچیدگی محاسباتی مربوط به محاسبه‌ی وارون یک ماتریس است. بدین‌منظور از رابطه‌ی فرمول وودبری (لم ۲) برای محاسبه‌ی وارون ماتریس B_n استفاده می‌شود و بدین ترتیب پیچیدگی محاسباتی به‌صورت قابل قبولی کاهش یافته و به کمک لم ۲ پیچیدگی محاسباتی بند ۱۳ از مرتبه‌ی $N_s^2 N_r L_r$ خواهد بود. شایان ذکر است که با استفاده از لم ۲ می‌توان نوشت:

$$B_n = I_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \tilde{\mathbf{H}}_n \tilde{\mathbf{H}}_n^H \quad (31)$$

و بدین ترتیب ماتریس A و V در لم فوق به‌صورت زیر انتخاب می‌شوند:

$$A = I_{N_s} \quad (32)$$

$$V = \sqrt{\frac{\rho}{N_s}} \tilde{\mathbf{H}}_n \quad (33)$$

با بحث‌هایی مشابه، پیچیدگی بندهای ۱۹، ۲۰ و ۲۳ از الگوریتم فوق به‌ترتیب از مرتبه‌ی $N_s^2 L_r^2$ ، $N_s^2 L_r^2$ و $N_s^2 N_r L_r$ به‌دست می‌آید. شایان ذکر است که در بند ۲۳ برای محاسبه‌ی وارون A_ℓ از لم ۲ یعنی رابطه‌ی وودبری بهره گرفته شده است. بدین ترتیب پیچیدگی کلی الگوریتم پیشنهادی از مرتبه‌ی $\mathcal{O}(N_s^2 N_r L_r)$ خواهد شد.

۳-۴- انتخاب آنتن در فرستنده

همان‌طور که در ابتدای الگوریتم گفته شد، الگوریتم مطرح‌شده به انتخاب آنتن در گیرنده می‌پردازد. اما تحلیل مسئله در حالت فرستنده نیز به‌سادگی قابل انجام است. به‌این‌منظور کافی است در روابط بالا N_s ، L_s و I_{N_s} با N_r ، L_r و I_{N_r} جایگزین شوند و بالعکس. توجه داشته باشید که عبارت ظرفیت کانال نسبت به مزدوج هرمیتی ماتریس کانال ثابت است و کافی است در الگوریتم پیشنهادی $\tilde{\mathbf{H}}_n$ را با $\tilde{\mathbf{H}}_n^H$ جایگزین کنیم و دانستن کانال در فرستنده برای انتخاب آنتن الزامی است.

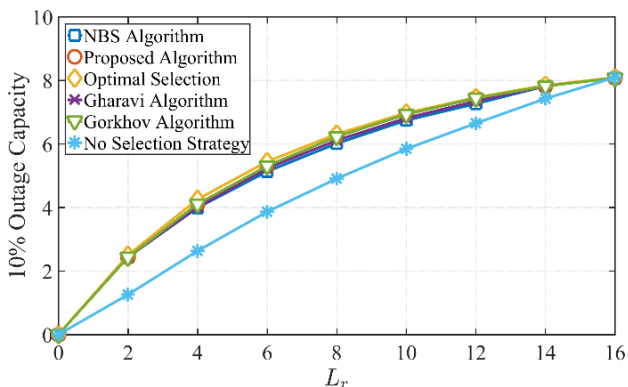
۱. الگوریتم قوی‌ترین آنتن: یکی از معیارهایی که برای انتخاب بهترین آنتن‌ها به‌خصوص در سیستم‌های چند آنتنی کلان استفاده می‌شود معیار قوی‌ترین آنتن‌ها است. بدین‌منظور برای انتخاب آنتن‌ها در فرستنده و یا گیرنده، اندازه ستون‌های ماتریس کانال از قوی به ضعیف مرتب می‌شوند. سپس ستون‌های متناظر با اندیس L ستون قوی به‌عنوان بهترین کانال‌ها انتخاب می‌شوند [۲۲].

۲. الگوریتم انتخاب پس‌رونده: در این الگوریتم در اولین مرحله ابتدا تمامی آنتن‌ها انتخاب می‌شوند و در هر مرحله آنتنی که کم‌ترین اثر را در کاهش ظرفیت دارد، حذف می‌شود. این روند ادامه پیدا می‌کند تا زمانی که تعداد آنتن‌ها به تعداد ادوات فرکانسی موجود در سیستم برسد. در مقاله [۲۰] به کمک این روش انتخاب آنتن در گیرنده صورت می‌گیرد. در این مقاله معیار انتخاب آنتن‌ها ظرفیت سیستم است.

۳. الگوریتم انتخاب پیش‌رونده: از آن‌جا که در الگوریتم انتخاب پس‌رونده هر بار از تمام آنتن‌ها برای مدل‌سازی استفاده می‌کند و در هر مرحله تنها یک آنتن با تأثیر کم‌تر حذف می‌گردد، از نظر پیاده‌سازی پیچیده و پرهزینه است و تنها زمانی به‌صرفه است که تعداد آنتن‌ها کم باشد. در [۱۹] برای کاهش هزینه‌ی پیاده‌سازی و بهبود عملکرد از روش انتخاب پیش‌رونده به‌منظور انتخاب آنتن استفاده می‌کند، به این نحو که ابتدا با یک مجموعه‌ی تهی شروع کرده و در هر مرحله آنتنی را انتخاب می‌کند که باعث افزایش بیشینه‌ی ظرفیت می‌شود.

پس از بیان الگوریتم‌های فوق به‌منظور مقایسه‌ی الگوریتم پیشنهادی در این مقاله با الگوریتم انتخاب بهینه‌ی آنتن‌ها و هم‌چنین الگوریتم قوی‌ترین آنتن، الگوریتم انتخاب پس‌رونده و الگوریتم انتخاب پیش‌رونده‌ی آنتن، شبیه‌سازی‌های کامپیوتری انجام شده است. در این شبیه‌سازی‌ها تمام نقاط شبیه‌سازی با متوسط‌گیری روی ۱۰۰۰۰ تحقق مستقل کانال انجام شده است. شبیه‌سازی‌ها برای تعداد مختلف آنتن در گیرنده انجام شده و ظرفیت خاموشی ۱۰ درصد به‌دست آمده است. رخ‌داد خاموشی به‌صورت کم‌تر شدن اطلاعات متقابل محقق شده توسط کانال از یک نرخ ارسال هدف تعریف می‌شود. نرخ اطلاعات متقابل برای یک کانال به‌صورت:

$$I = \log_2(1 + \gamma) \quad (34)$$



شکل ۵: ظرفیت خاموشی ۱۰ درصد به صورت تابعی از L_r با پارامترهای $N_s = ۸$ و $N_r = ۱۲۸$ و $\rho = ۱۵$ dB

تعریف می‌شود که γ سیگنال به نویز کانال است. از آن‌جا که متوسط اطلاعات متقابل کانال تابعی از ضرایب کانال (که خود این ضرایب متغیر تصادفی هستند) است، بنابراین رخداد کم‌تر شدن اطلاعات متقابل از نرخ هدف (رخداد خاموشی) نیز یک متغیر تصادفی خواهد بود. در نتیجه احتمال خاموشی به صورت زیر بیان می‌شود:

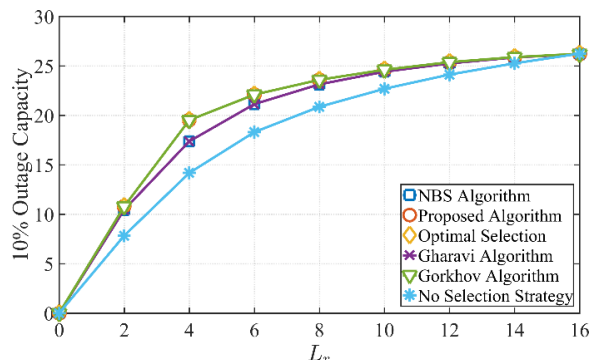
$$P_{out} \triangleq \Pr\{I < R\} \quad (۳۵)$$

شکل ۲ نمودار ظرفیت خاموشی را بر حسب تعداد آنتن‌های انتخابی برای $N_s = ۴$ ، $N_r = ۱۶$ و $SNR = ۰$ dB نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود الگوریتم پیه‌شنهادی، الگوریتم پس‌رونده و الگوریتم انتخاب بهینه‌ی آنتن‌ها عملکردی بسیار نزدیک به هم دارند. به ازای تمام مقادیر L_r الگوریتم انتخاب قوی‌ترین آنتن‌ها مشابه یک باند پایین عمل می‌کند ولی هم‌چنان فاصله‌ی قابل توجهی با الگوریتم انتخاب آنتن‌ها به صورت تصادفی دارد.

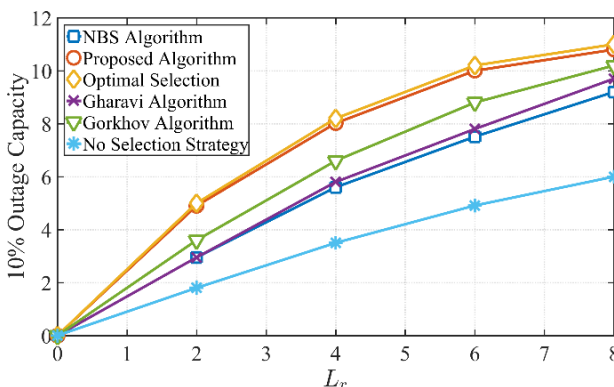
شکل ۳ نمودار ظرفیت خاموشی را بر حسب تعداد آنتن‌های انتخابی برای $N_s = ۴$ ، $N_r = ۱۶$ و $SNR = ۱۵$ dB نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود ظرفیت خاموشی به صورت خطی با L_r افزایش می‌یابد و این روند ادامه پیدا می‌کند تا زمانی که $L_r = N_s$ شود و بعد از آن روند تغییرات کندتر می‌شود. همان‌طور که در این حالت مشاهده می‌شود انتخاب قوی‌ترین آنتن‌ها یک باند پایین برای ظرفیت خاموشی است.

در ادامه ظرفیت خاموشی بر حسب آنتن‌های انتخابی برای مقادیر بزرگ تعداد آنتن در گیرنده شبیه‌سازی شده است. شکل ۴ ظرفیت خاموشی را بر حسب تعداد آنتن‌های انتخابی برای پارامترهای $N_s = ۸$ ، $N_r = ۱۲۸$ و $SNR = ۰$ dB نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود به ازای مقادیر بزرگ N_r الگوریتم پیه‌شنهادی عملکرد بهتری را نسبت به الگوریتم پیش‌رونده و پس‌رونده از خود نشان می‌دهد.

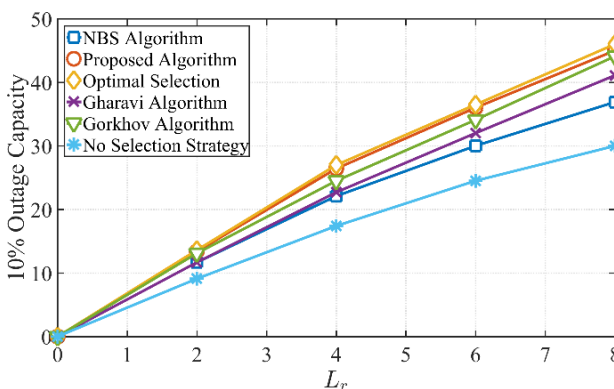
دلیل این موضوع آن است که دو الگوریتم فوق مسئله‌ای را که لزوماً جداسدنی نیست به صورت جداسدنی حل می‌کنند و در ابعاد بزرگ لزوماً نتایج بهینه‌ای از خود نشان نمی‌دهند ولی الگوریتم پیه‌شنهادی از این جهت که در هر مرحله آنتن‌های انتخاب‌شده در



شکل ۲: ظرفیت خاموشی ۱۰ درصد به صورت تابعی از L_r با پارامترهای $N_s = ۴$ و $N_r = ۱۶$ و $\rho = ۰$ dB



شکل ۳: ظرفیت خاموشی ۱۰ درصد به صورت تابعی از L_r با پارامترهای $N_s = ۴$ و $N_r = ۱۶$ و $\rho = ۱۵$ dB



شکل ۴: ظرفیت خاموشی ۱۰ درصد به صورت تابعی از L_r با پارامترهای $N_s = ۸$ و $N_r = ۱۲۸$ و $\rho = ۰$ dB

- IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 5, pp. 44-51, May 2014.
- [8] Z. Ding, Z. Yang, P. Fan and H. V. Poor, "On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 21, no.12, pp. 1501-1505, Dec. 2014.
- [9] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin and R. Zhang, "An overview of massive MIMO: Benefits and challenges," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 742-758, Oct. 2014.
- [10] S. Asaad, A.M. Rabiei and R. Müller, "Massive MIMO with Antenna Selection: Fundamental Limits and Applications," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 12, pp. 8502-8516, Dec. 2018.
- [11] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, Feb. 2014.
- [12] S. Asaad, A. Bereyhi, A. M. Rabiei, R. R. Müller and R. F. Schaefer, "Optimal Transmit Antenna Selection for Massive MIMO Wiretap Channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 4, pp. 817-828, Apr. 2018.
- [13] A. Garcia-Rodriguez, G. Geraci, L. G. Giordano, A. Bonfante, M. Ding and D. Lopez-Perez, "Massive MIMO unlicensed: A new approach to dynamic spectrum access," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 6, pp. 186-192, Jun. 2018.
- [14] E. Björnson, J. Hoydis and L. Sanguinetti, "Massive MIMO has unlimited capacity," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 1, pp. 574-590, Jan. 2018.
- [15] A. L. Swindlehurst, E. Ayanoglu, P. Heydari and F. Capolino, "Millimeter-wave massive MIMO: the next wireless revolution?" *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 9, pp. 56-62, Sep. 2014.
- [۱۶] احمدرضا جنابزاده و محسن مجیری، «عملکرد فیلتر شکافدار وقتی در تخمین فرکانس سیگنال‌های تناوبی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۵، شماره ۱، صفحه ۱-۹، بهار ۱۳۹۴.
- [۱۷] احسان دشتیان، مجید اخوت و حمید آرزومند، «تخمین کانال MIMO با استفاده از QRD و الگوریتم وقتی LMS»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۸، شماره ۲، صفحه ۶۰۹-۶۱۶، تابستان ۱۳۹۷.
- [18] K. B. Petersen and M. S. Pedersen *The Matrix Cookbook*, Technical University of Denmark, 2012.
- [19] A. Gorokhov, "Antenna selection algorithms for MEA transmission systems," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, Orlando, USA, vol. 3, pp. 2857-2860, May 2002.
- [20] S. Sanayei and A. Nosratinia, "Asymptotic capacity analysis of transmit antenna selection," *International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Chicago, IL, USA, p. 241, 2004.
- [21] L. Hogben, *Handbook of Linear Algebra*, CRC Press, 2006.
- [22] E. A. Neasmith and N. C. Beaulieu, "New results on selection diversity," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 46, no. 5, pp. 695-704, May 1998.

مراحل قبلی را دوباره بررسی می‌کند نتایج بهتری ارائه می‌دهد. شایان ذکر است که در این حالت نیز الگوریتم انتخاب قوی‌ترین آنتن‌ها یک باند پایین برای انتخاب آنتن است و همچنان عملکرد بهتری از انتخاب تصادفی آنتن‌ها دارد. شکل ۵ نیز نتایج مشابهی را برای مقادیر $N_s = 8$ ، $N_r = 128$ و $SNR = 15$ dB نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوریتم پیشنهادی نتایج بهتری را نسبت به سایر روش‌ها نشان می‌دهد.

۵- نتیجه

در این مقاله، یک الگوریتم زیربینه‌ی سریع برای انتخاب آنتن ارائه شد. الگوریتم فوق در ابعاد کوچک مشابه با الگوریتم انتخاب بهینه عمل می‌کند. لازم به ذکر است که در ابعاد کوچک الگوریتم بهینه‌ی انتخاب آنتن نتایج مشابهی با الگوریتم پیش‌رونده و الگوریتم پس‌رونده دارد. ولی دو الگوریتم فوق در ابعاد بالا نتایج خوبی نشان نمی‌دهند در حالی که الگوریتم ارائه‌شده در این مقاله در ابعاد بالا نتایجی نزدیک به الگوریتم انتخاب بهینه با پیچیدگی کم‌تر دارد.

مراجع

- [1] B. Furht and S. A. Ahson, *Long Term Evolution: 3GPP LTE Radio and Cellular Technology*, CRC Press, 2016.
- [2] C. Petersen, M. Mühleisen and A. Timm-Giel, "Modeling aeronautical data traffic demand," *Wireless Days (WD)*, Toulouse, France, 2016.
- [3] G. Pimmy and R. Kumar Jha, "Next generation cellular networks and green communication," *International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS)*, Bengaluru, India, pp. 522-524, Jan. 2018.
- [4] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. E. Lozano, A. C. K. Soong and J. Zhang, "What will 5G be?" *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, Jun. 2014.
- [5] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," *European Transactions on Telecommunications*, vol. 10, no. 6, pp. 585-595, Sep. 1999.
- [6] A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei, T. Ji, T. Luo, M. Vajapeyam, T. Yoo, O. Song and D. Malladi, "A survey on 3GPP heterogeneous networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 10-21, Jun. 2011.
- [7] V. Jungnickel, K. Manolakis, W. Zirwas, B. Panzner, V. Braun, M. Lossow, M. Sternad, R. Apelfrojd and T. Svensson, "The role of small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G,"

زیر نویس‌ها

- ⁹ Suboptimal
¹⁰ Post-processing
¹¹ Exhaustive Search
¹² Forward Selection (FS)
¹³ Backward Elimination (BE)
¹⁴ Norm Based Selection (NBS)
¹⁵ Decoupled

- ¹ 5th Generation (5G)
² Multiple Input Multiple Output (MIMO)
³ Heterogeneous Networks
⁴ Small Cells
⁵ Non-orthogonal
⁶ Massive MIMO
⁷ Millimeter Waves
⁸ Radio Frequency (RF)