

ارائه آشکارساز چندآستانه برای سیستم دسترسی چندگانه غیرمتعامد فراسو به همراه محاسبه تحلیلی احتمال خطا

محدثه بهاری^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، سید محمد صابرعلی^۲، استادیار

۱- گروه مهندسی برق-دانشکده فنی و مهندسی-دانشگاه اصفهان-اصفهان-ایران - m.bahari@eng.ui.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق-دانشکده فنی و مهندسی-دانشگاه اصفهان-اصفهان-ایران - sm.saberali@eng.ui.ac.ir

چکیده: در این مقاله، آشکارساز چندآستانه برای سیگنال‌های سیستم دسترسی چندگانه غیرمتعامد فرا سو در کانال محو شدگی رایسی ارائه شده است. سیستم دسترسی چندگانه غیر متعامد با استفاده از اصل برهم‌نهی می‌تواند، منابع را به طور مشترک در اختیار چند کاربر قرار دهد که باعث بهبود ظرفیت سیستم و کارایی طیفی می‌شود. در اینجا روش آشکارساز چندآستانه در مقابل روش آشکارساز حذف تداخل متوالی پیشنهاد می‌شود. روش چندآستانه سیگنال کاربران را مستقیماً و بدون آشکارسازی سیگنال دیگر کاربرها آشکارسازی می‌کند. همچنین مناطق تصمیم‌گیری آشکارساز چندآستانه برای آشکارسازی سیگنال دریافت‌شده در ایستگاه پایه را به دست می‌آوریم. سپس عبارت تحلیلی احتمال خطا را برای روش‌های چندآستانه و حذف تداخل متوالی محاسبه می‌کنیم. نهایتاً نتایج حاصل از محاسبات تحلیلی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه شده و تطبیق آن‌ها برای تایید عبارات نظری هر دو روش ارائه شده است. نتایج به دست آمده از مقایسه دو روش آشکارساز چندآستانه و حذف تداخل متوالی نشان می‌دهد که آشکارساز چندآستانه در سیستم دسترسی چندگانه غیر متعامد فرا سو کارایی بهتری نسبت به روش حذف تداخل متوالی دارد؛ زیرا آشکارساز چندآستانه دارای تاخیر و احتمال خطای کمتر نسبت به روش حذف تداخل متوالی است. احتمال خطای کمتر را در شبیه‌سازی ارائه شده و روابط تحلیل می‌توان مشاهده کرد. همچنین تاخیر کمتر از آن جهت است که روش چندآستانه سیگنال کاربرها را بدون اولویت و مستقیماً می‌تواند آشکارسازی کند، اما روش حذف تداخل متوالی برای آشکارسازی کاربر ضعیف‌تر، باید کاربر قوی‌تر را آشکارسازی کند.

واژه‌های کلیدی: آشکارساز چندآستانه، دسترسی چندگانه غیرمتعامد، فراسو، محو شدگی رایسی.

A Multi-Threshold Detector for Uplink Non-Orthogonal Multiple Access Systems with Analytical Probability of Error Evaluation

Mohadese Bahari, MSc student¹, Sayed Mohamad Saberali, Assistant Professor²

1- Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran, Email: m.bahari@eng.ui.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran, Email: sm.saberali@eng.ui.ac.ir

Abstract: In this paper, we modify the Multi-Threshold (MTh) Detector for detection of uplink non-orthogonal multiple access (NOMA) signals in the Rician fading channels. Non-orthogonal multiple access system using the superposition principle can share resources to multiple users, which improves system capacity and spectral performance. The multi-threshold method is proposed as opposed to the successive interference cancellation (SIC) method. The multi-threshold method detects users' signals directly and without detecting other users' signals. We also obtain the MTh decision regions to detect the received signal at the base station (BS). Then, we compute the analytical probability of error (Pe) expression for the MTh and SIC methods. Computer simulations are performed which confirm the obtained analytic expressions. The results obtained from the comparison of the MTh detector and SIC method shows that the performance of the MTh detector is superior to that of SIC in the uplink non-orthogonal multiple access system, because the MTh detector has less delay and probability of error than those of the SIC method. The better error probability of the MTh can be deduced from the simulation and analytic results. The MTh method has lower delay than SIC because it can detect every users' signals directly and without priority, while, the SIC method must detect the stronger users before detection of weaker users.

Keywords: Multi-Threshold Detector, Non-Orthogonal Multiple Access, Uplink, Rician Fading.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۰۱ تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۰۴ نام نویسنده مسئول: سیدمحمدصابرعلی
نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - دانشگاه اصفهان - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق.

۱- معرفی

از زمان بحث در مورد سیستم مخابرات بی-سیم نسل پنجم (5G)، دسترسی چندگانه غیرمتعامد^۲ (NOMA) به طور مداوم به عنوان یک فناوری نامزد برای سیستم‌های نسل پنجم ذکر شده است [۱]. برخلاف سیستم دسترسی چندگانه متعامد^۳ (OMA) که منابع را به صورت متعامد در اختیار کاربران قرار می‌دهد، NOMA به چندین کاربر امکان می‌دهد تا منابع زمان و فرکانس یکسانی را به صورت غیرمتعامد استفاده کنند که باعث افزایش تعداد کاربران در سیستم مخابراتی می‌شود. در سیستم NOMA معمولاً برای رعایت انصاف بین کاربران، توان کمتری به کاربران با شرایط بهتر اختصاص می‌یابد و بیشتر سهم توان به کاربران دورتر که کانال ضعیف‌تری دارند، اختصاص داده می‌شود [۲].

مسئله مهم در اینجا، نحوه‌ی آشکارسازی سیگنال‌ها است. آشکارسازی خطی نمی‌تواند با تداخلگرهای قوی مقابله کند، درحالی که یک آشکارساز غیرخطی می‌تواند اثرات مخرب آن را به حداقل برساند [۳]. یک طرح آشکارسازی غیرخطی برای آشکارسازی چند کاربره، حذف تداخل متوالی^۴ (SIC) است [۳]. در SIC قوی‌ترین سیگنال را ابتدا آشکارسازی می‌کنند و سیگنال دیگر کاربران به عنوان نویز پس زمینه در نظر گرفته می‌شود [۳]. سپس سیگنال قوی‌ترین کاربر از سیگنال دریافتی کم می‌شود و سایر سیگنال‌ها به همین ترتیب آشکارسازی می‌شوند. در این روش احتمال رخ دادن پدیده "انتشارخطا" وجود دارد. به این معنی که اگر آشکارسازی سیگنال با توان بالاتر دچار خطا شود، این خطا در آشکارسازی بیت‌های آر سالی سایر کاربران اثر می‌گذارد و می‌تواند باعث ایجاد خطا در سیگنال‌های آن‌ها نیز گردد. همچنین در روش حذف تداخل متوالی زمان آشکارسازی سیگنال‌های ضعیف‌تر بیشتر می‌باشد. این مسئله باعث کاهش کارایی سیستم مخابراتی می‌شود.

روش دیگر آشکارساز چند آستانه^۵ (MTh) است که از طریق ناحیه‌های تصمیم‌گیری توصیف می‌شود. از آنجا که اثربخشی روش SIC به اختلاف توان کاربران مربوط می‌شود، اگر اختلاف توان کم باشد، آشکارسازی می‌تواند اشتباه شود، اما در روش MTh با وجود اختلاف کم، چون آشکارسازی توسط نواحی تصمیم‌گیری انجام می‌شود، اشتباه در کدبرداری کمتر رخ می‌دهد. در روش MTh برخلاف روش SIC که سیگنال ضعیف نیاز به آشکارسازی سیگنال قوی دارد، سیگنال هر کاربر را مستقیماً می‌توان آشکارسازی کرد یعنی آشکارساز ارائه شده، دارای تأخیر کمتر و احتمال خطای بهتر است. در این مقاله از روش MTh برای غلبه بر مشکلات روش SIC استفاده شده است و عبارات احتمال خطای هر دو روش به‌دست آمده و باهم مقایسه می‌شوند.

۱-۱- مطالعات مرتبط

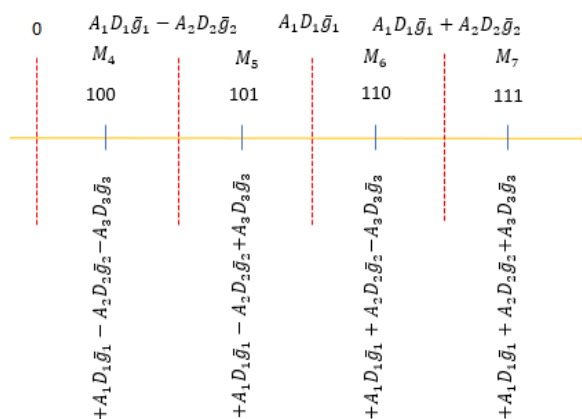
در زمینه آشکارسازی سیگنال‌ها مطالعات بسیاری انجام شده است. در مقاله [۴] یک آشکارساز سیگنال تک کاربر بهینه^۶ (OSUD) ارائه شده که می‌تواند سیگنالی که با تداخل هم‌کانال و نویز گوسی سفید جمع شوند^۷ (AWGN) خراب شده است را آشکارسازی کند. عملکرد آشکارساز OSUD به آشکارساز گیرنده بهینه جداگانه^۸ (IOR) در حالتی که تفاوت سیگنال‌ها تنها در اختلاف توان آن‌ها باشد نزدیک است. در نتیجه آشکارساز OSUD با ساختار ساده‌تری نسبت به IOR به عملکرد مشابه می‌رسد. در [۳] نرخ خطای بیت تحلیلی برای طرح SIC برای آشکارسازی سیگنال‌های دسترسی چندگانه تقسیم‌کد^۹ (CDMA) در حضور تداخلگران ناشناخته ارائه شده است. این طرح نیز در حالتی که سیگنال‌های دلخواه و تداخلگر اختلاف توان زیادی داشته باشند عملکردی نزدیک به آشکارساز چند کاربره بهینه دارد. نویسندگان مقاله [۵] یک سیستم NOMA فراسو را ارائه می‌دهند که با استفاده از آشکارساز SIC سیگنال کاربرها را آشکارسازی می‌کند و عبارات فرم بسته احتمال خطا را برای مدولاسیون QPSK به‌دست آورده اند. در مقاله [۶] یک طرح آشکارسازی چندآستانه برای تشخیص سیگنال‌های قابل تصادم^{۱۰} ارائه شده است. هر کاربر بدون در نظر گرفتن تأیید دریافت صحیح، بسته‌های خود را چند بار در هر فریم ارسال می‌کند. مشکل این روش افزایش تعداد تصادم است. در [۷] عبارت تحلیلی احتمال خطای بیت یک آشکارساز MTh در سیستم مخابراتی متحرک، براساس NOMA فروسو سه کاربره با نویز ناشناخته به‌دست آمده است. روش MTh مستقیماً سیگنال کاربر با بالاترین میزان بهره کانال را بدون آشکارسازی کاربر ضعیف‌تر آشکارسازی می‌کند. در مقاله [۸] یک سیستم دسترسی چندگانه پویای متعامد و غیرمتعامد فراسو، با هدف بیشینگی بازدهی انرژی پیشنهاد شده است. در این پژوهش تخصیص منابع سیستم دو مرحله دارد. مرحله اول شامل تخصیص زیرحامل‌ها، تعیین نوع دسترسی چندگانه و جفت‌سازی کاربران NOMA است که به صورت همزمان صورت می‌گیرد و مرحله دوم تخصیص توان میان کاربران به کمک روش تفاضل محدب است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد بازدهی انرژی سیستم در مقایسه با روش‌های قبل بهبود یافته است. در [۹] جهت دستیابی به ظرفیت و بهره طیفی بالاتر، ترکیب روش NOMA و سیستم MIMO تحت عنوان MIMO-NOMA برای نسل پنجم پیشنهاد شده است. در این مقاله اثر خطای تخمین کانال برای کاربر دور و نزدیک بررسی شده است که اثر خطای تخمین کانال موجب افزایش احتمال خطای سیستم MIMO-NOMA می‌شود که به جهت کاهش اثر خطای تخمین کانال، آشکارساز جدیدی پیشنهاد شده است که باعث بهبود عملکرد در حضور خطای تخمین کانال می‌گردد.

۲-۱- نوآوری مقاله

مقیاس کوچک است. تابع چگالی احتمال برای متغیر تصادفی رایسی $f_G(g_i) = \frac{g_i}{\sigma^2} I_0 \left(\frac{sg_i}{\sigma^2} \right) e^{\left(-\frac{g_i^2 + s^2}{2\sigma^2} \right)}$ است [۱۱] که s^2 توان مولفه مسیر مستقیم^{۱۲} (LOS) و $2\sigma^2$ توان مولفه چندمسیری (بدون مسیر مستقیم) و نسبت این دو با k نشان داده می شود $(k = \frac{s^2}{2\sigma^2})$ و I_0 بسل اصلاح شده نوع اول از مرتبه صفر است. D_i نشان دهنده افت مقیاس بزرگ است که در اثر فاصله گرفتن از فرستنده و با توان افت مسیر β به وجود می آید. n نویز سفید گوسی جمع شونده با میانگین صفر و $\sigma_0^2 = 1$ می باشد.

بدون از دست دادن کلیت مساله، با فرض دانستن ضرایب کانال، اختصاص توان به سیگنال های NOMA به گونه ای انجام می شود که $A_1 \bar{h}_1 > A_2 \bar{h}_2 > A_3 \bar{h}_3$ باشد. نواحی تصمیم گیری برای آشکارساز چندآستانه برای دو حالت $A_1 \bar{h}_1 > A_2 \bar{h}_2 + A_3 \bar{h}_3$ و $A_1 \bar{h}_1 < A_2 \bar{h}_2 + A_3 \bar{h}_3$ مطابق روش ارائه شده در [۱۱] در شکل (۱) و (۲) رسم شده است. برای به دست آوردن نواحی تصمیم گیری باید تعداد حالاتی که برای سیگنال دریافت شده وجود دارد را نوشت و با توجه به اندازه، آن ها را مرتب نمود و روی محور (خطوط آبی) نشان داد. سپس خطوط جداکننده را بایستی با استفاده از میانگین گیری به دست آورد. در این شکل $\bar{q}_i$ میانگین نامین ضریب کانال است.

در ادامه نشان داده می شود که تحت شرایطی می توان به کارایی احتمال خطای بهتر از آشکارساز متداول SIC برای این سیگنال ها رسید، که منجر به کاهش مصرف توان برای رسیدن به احتمال خطای مشخص در یک سیستم می گردد.



شکل (۱): نواحی تصمیم گیری MTH در حالت $A_1 \bar{h}_1 > A_2 \bar{h}_2 + A_3 \bar{h}_3$ برای مقادیر مثبت رسم شده است و برای مقادیر منفی، شکل دقیقاً نسبت به صفر قرینه می شود.

در گذشته به دلیل رخ دادن پدیده انتشارخطا در SIC و بالا بردن کارایی احتمال خطای آشکارساز SIC، سیستم های NOMA مبتنی بر کد ارائه شده است، که این مشکل را در سمت فراسوی سیستم NOMA حل می کند. با این وجود سیستم های NOMA مبتنی بر کد دارای پیچیدگی بالایی می باشند [۱۰]. در این مقاله روش ارائه شده در [۱۱]، در کانال های محوشدگی رایسی و برای سمت فراسوی سیستم مخابراتی تعمیم داده شده است. ارائه آشکارساز MTH برای سمت فراسو باعث می شود با پیچیدگی قابل قبول بتوانیم به کارایی بهتر از SIC برسیم.

نواحی تصمیم گیری برای سمت فراسوی سیستم و برای کانال رایسی در [۱۱] به دست آمده است. در این مقاله نواحی تصمیم گیری و عبارت های تحلیلی برای سمت فراسوی سیستم NOMA و برای کانال رایسی به دست آمده و با آشکارساز SIC مقایسه می شود. در سمت فراسو سیگنال دریافتی یک کاربر مشخص، مجموع سیگنال های همه کاربران است که در ضریب کانال کاربر مورد نظر ضرب می شود، در حالی که در سمت فراسو ضریب کانال سیگنال های کاربران مختلف در سیگنال های آن ها ضرب می شود و حاصل جمع در ایستگاه پایه ظاهر می گردد.

۲- مدل سیستم

در این مقاله یک سیستم NOMA فراسو را ارائه می شود که از یک ایستگاه ایه^{۱۱} (BS) و سه کاربر تشکیل شده است. برای سادگی شاخص زمان در نظر گرفته نمی شود. سیگنال دریافتی در BS با فرض جبران شدن فاز [۱۲] به صورت زیر است:

$$y = A_1 h_1 b_1 + A_2 h_2 b_2 + A_3 h_3 b_3 + n \quad (1)$$

در رابطه ی بیان شده $A_i = \sqrt{\alpha_i P_s}$ سطح سیگنال دریافتی کاربر i ام است، α_i ضریب تخصیص توان و P_s توان کل می باشد، $b_i \in \{+1, -1\}$ بیت های اطلاعات است که با احتمال برابر ارسال شده است. h_i ضریب کانال بین BS و کاربر i ام است و به صورت زیر مدل می شود [۱۳]:

$$h_i = d_i^{-\frac{\beta}{2}} g_i = D_i g_i \quad (2)$$

$$d_i = d^{K-i}$$

$$K=3, i=1, 2, 3$$

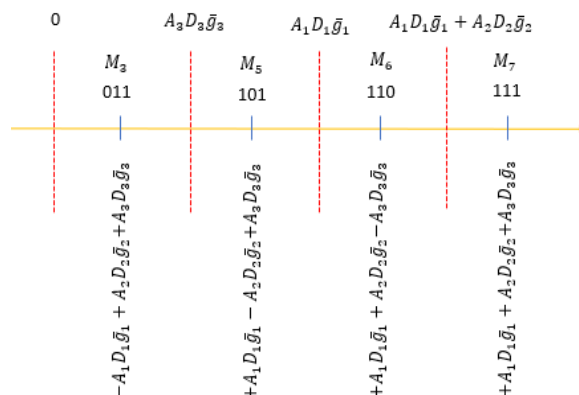
که β توان افت مسیر، d_i فاصله بین کاربر و BS ($d_1 > d_2 > d_3$)، K تعداد کاربران و g_i متغیر تصادفی رایسی که نشان دهنده محوشدگی

$$\begin{aligned}
 P_{e_1} &= P_r \{ \hat{x}_1 = 1 | x_1 = -1 \} P_r \{ x_1 = -1 \} \\
 &+ P_r \{ \hat{x}_1 = -1 | x_1 = 1 \} P_r \{ x_1 = 1 \} = P_r \{ \hat{x}_1 = 1 | x_1 = -1 \} \\
 P_{e_1} &= P_r \{ \hat{x}_1 = 1 | x_1 = -1 \} = \\
 &P_r \{ y \in (M_4 \cup M_5 \cup M_6 \cup M_7) | y = -A_1 D_1 g_1 + w_1 \} = \\
 &\int_{M_4, M_5, M_6, M_7} f_{w_1}(y + A_1 D_1 g_1) dy = \\
 &\int_{M_4, M_5, M_6, M_7} \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty f_{w_1}(y + A_1 D_1 g_1 | g_1, g_2, g_3) \\
 &f_G(g_1) f_G(g_2) f_G(g_3) dg_1 dg_2 dg_3 dy = \\
 &\int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{M_4, M_5, M_6, M_7} \frac{1}{4} \left\{ N_{\sigma_0} \left(y + A_1 D_1 g_1 + (-A_2 D_2 g_2 - A_3 D_3 g_3) \right) + \right. \\
 &N_{\sigma_0} \left(y + A_1 D_1 g_1 + (+A_2 D_2 g_2 - A_3 D_3 g_3) \right) + \\
 &N_{\sigma_0} \left(y + A_1 D_1 g_1 + (-A_2 D_2 g_2 + A_3 D_3 g_3) \right) + \\
 &\left. N_{\sigma_0} \left(y + A_1 D_1 g_1 + (+A_2 D_2 g_2 + A_3 D_3 g_3) \right) \right\} \\
 &f_G(g_1) f_G(g_2) f_G(g_3) dy dg_1 dg_2 dg_3
 \end{aligned} \quad (۴)$$

که M_I ها مناطقی هستند که در شکل (۱) و (۲) نشان داده شده است. با استفاده از رابطه [۱۵, Eq.2.33.1] یک قسمت از انتگرال داخلی رابطه (۴) برای رسیدن به عبارت نهایی احتمال خطای کاربر اول به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\begin{aligned}
 &\int_{M_4, M_5, M_6, M_7} \frac{1}{4} N_{\sigma_0} \left(y + A_1 D_1 g_1 + (-A_2 D_2 g_2 - A_3 D_3 g_3) \right) dy = \\
 &\frac{1}{4} \int_{M_4, M_5, M_6, M_7} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0}} \exp \left(-\frac{(y + A_1 D_1 g_1 - A_2 D_2 g_2 - A_3 D_3 g_3)^2}{2\sigma_0^2} \right) dy = \\
 &\frac{1}{8} \operatorname{erf} \left(\frac{y + A_1 D_1 g_1 - A_2 D_2 g_2 - A_3 D_3 g_3}{\sqrt{2\sigma_0}} \right)_{M_4, M_5, M_6, M_7} = \\
 &\sum_{l \in \{4,5,6,7\}} \frac{1}{8} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{\sup(M_l) + A_1 D_1 g_1 - A_2 D_2 g_2 - A_3 D_3 g_3}{\sqrt{2\sigma_0}} \right) - \right. \\
 &\left. \operatorname{erf} \left(\frac{\inf(M_l) + A_1 D_1 g_1 - A_2 D_2 g_2 - A_3 D_3 g_3}{\sqrt{2\sigma_0}} \right) \right)
 \end{aligned} \quad (۵)$$

در رابطه (۵) از N_{σ_0} نسبت به y انتگرال گرفته شده و کران بالا و پایین انتگرال از شکل (۱) و (۲) و با توجه به ناحیه ی هر M_I انتخاب شده است. بعد از محاسبه انتگرال هر چهار جمع رابطه (۴)، در نهایت عبارت (۶) به دست می آید. همین محاسبات را می توان به طور مشابه برای Pe کاربر دوم و سوم انجام داد. بعد از محاسبه انتگرال های



شکل (۲): نواحی تصمیم گیری MTh در حالت $A_1 \bar{h}_1 < A_2 \bar{h}_2 + A_3 \bar{h}_3$ برای مقادیر مثبت رسم شده است و برای مقادیر منفی، شکل دقیقاً نسبت به صفر قرینه می شود.

۳- محاسبه احتمال خطا

در این قسمت عبارت احتمال خطا^{۱۳} (Pe) برای هر سه کاربر به دست می آید. فرض کنید کاربران از مدولاسیون BPSK در سیستم NOMA استفاده می کنند و احتمال ارسال سیگنال ها برابر است. به همین دلیل و به خاطر تقارن مساله عبارت Pe برای کاربر i ام به صورت $P_{e_i} = P_r \{ \hat{x}_i = 1 | x_i = -1 \}$ و $i = 1, 2, 3$ است. در اینجا Pe کاربر اول محاسبه می شود و دو کاربر دیگر با انجام محاسبات مشابه به دست می آید. سیگنال در یافتی را می توان به صورت $y = A_1 D_1 g_1 b_1 + w_1$ که $w_1 = A_2 h_2 b_2 + A_3 h_3 b_3 + n$ است، نوشت، یعنی دو کاربر دیگر را به صورت نویز مشاهده در نظر می گیریم. به دلیل اینکه، در رابطه w_1 جمع سه متغیر تصادفی مستقل وجود دارد، می توان با محاسبه کانولوشن تابع چگالی آنها، تابع چگالی احتمال نویز مشاهده را به دست آورد. با توجه به استقلال بیت های کاربران مختلف از نویز و یکدیگر، تابع چگالی احتمال w_1 با استفاده از [۱۴, Eq.7.6] به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned}
 f_{w_1}(w_1 | g_1, g_2, g_3) &= \\
 &\frac{1}{4} \left(N_{\sigma_0} \left(w_1 + (-A_2 D_2 g_2 - A_3 D_3 g_3) \right) + N_{\sigma_0} \left(w_1 + (+A_2 D_2 g_2 - A_3 D_3 g_3) \right) \right. \\
 &\left. + N_{\sigma_0} \left(w_1 + (-A_2 D_2 g_2 + A_3 D_3 g_3) \right) + N_{\sigma_0} \left(w_1 + (+A_2 D_2 g_2 + A_3 D_3 g_3) \right) \right)
 \end{aligned} \quad (۳)$$

$$\text{که } N_{\sigma_0}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} \exp \left(-\frac{x^2}{2\sigma_0^2} \right) \text{ می باشد.}$$

در نتیجه Pe کاربر اول برای آشکارساز چند آستانه را می توان برای هر دو حالت $A_1 \bar{h}_1 < A_2 \bar{h}_2 + A_3 \bar{h}_3$ و $A_1 \bar{h}_1 > A_2 \bar{h}_2 + A_3 \bar{h}_3$ استفاده از قانون بیز^{۱۴} و تقارن مسئله به صورت زیر محاسبه کرد:

که $\bar{g}_i$ به جای مقدار دقیق استفاده می‌شود. Pe تحلیلی کاربران برای روش SIC با استفاده از قانون بیز به صورت زیر است:

$$P_{e_{SIC_1}} = P_r\{\hat{x}_1=1 | x_1=-1\} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} P_r(-A_1 D_1 g_1 + A_2 D_2 g_2 + A_3 D_3 g_3 + n > 0 | g_1, g_2, g_3) f_G(g_1) f_G(g_2) f_G(g_3) dg_1 dg_2 dg_3 = \frac{1}{4} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \sum_{i,j \in \{+1, -1\}} Q\left(\frac{A_1 D_1 g_1 + i A_2 D_2 g_2 + j A_3 D_3 g_3}{\sqrt{\frac{N_0}{2}}}\right) f_G(g_1) f_G(g_2) f_G(g_3) dg_1 dg_2 dg_3 \quad (10)$$

رابطه‌های دوم و سوم هم به همین ترتیب به دست می‌آید:

$$P_{e_{SIC_2}} = \frac{1}{4} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \sum_{i,j \in \{+1, -1\}} Q\left(\frac{A_2 D_2 g_2 + i A_1 D_1 g_1 + j A_3 D_3 g_3 + l A_4 D_4 \bar{g}_1}{\sqrt{\frac{N_0}{2}}}\right) - \sum_{i,j \in \{+1, -1\}} Q\left(\frac{A_2 D_2 g_2 + i A_1 D_1 g_1 + j A_3 D_3 g_3}{\sqrt{\frac{N_0}{2}}}\right) f_G(g_1) f_G(g_2) f_G(g_3) dg_1 dg_2 dg_3$$

$$P_{e_{SIC_3}} = \frac{1}{4} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} - \sum_{i,j \in \{+1, -1\}} Q\left(\frac{A_3 D_3 g_3 + i A_1 D_1 g_1 + j A_2 D_2 g_2}{\sqrt{\frac{N_0}{2}}}\right) - \sum_{i,j \in \{+1, -1\}} Q\left(\frac{A_3 D_3 g_3 + i A_1 D_1 g_1 + j A_2 D_2 g_2 + l A_4 D_4 \bar{g}_1}{\sqrt{\frac{N_0}{2}}}\right) + \sum_{i,j,l,k \in \{+1, -1\}} Q\left(\frac{A_3 D_3 g_3 + i A_1 D_1 g_1 + j A_2 D_2 g_2 + l A_4 D_4 \bar{g}_1 + k A_2 D_2 \bar{g}_2}{\sqrt{\frac{N_0}{2}}}\right) f_G(g_1) f_G(g_2) f_G(g_3) dg_1 dg_2 dg_3 \quad (11)$$

$$P_{e_{SIC_4}} = \frac{1}{4} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \sum_{i,j \in \{+1, -1\}} Q\left(\frac{A_4 D_4 \bar{g}_1 + i A_1 D_1 g_1 + j A_2 D_2 g_2 + k A_3 D_3 g_3}{\sqrt{\frac{N_0}{2}}}\right) - \sum_{i,j \in \{+1, -1\}} Q\left(\frac{A_4 D_4 \bar{g}_1 + i A_1 D_1 g_1 + j A_2 D_2 g_2}{\sqrt{\frac{N_0}{2}}}\right) + \sum_{i,j,l,k \in \{+1, -1\}} Q\left(\frac{A_4 D_4 \bar{g}_1 + i A_1 D_1 g_1 + j A_2 D_2 g_2 + l A_3 D_3 g_3 + k A_2 D_2 \bar{g}_2}{\sqrt{\frac{N_0}{2}}}\right) f_G(g_1) f_G(g_2) f_G(g_3) dg_1 dg_2 dg_3 \quad (12)$$

به وجود آمده با استفاده از [۱۵, Eq.2.33.1]، نتایج Pe آشکارساز چندآستانه به صورت زیر می‌شود:

$$P_{e_1} = \frac{1}{8} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \sum_{l \in \{4,5,6,7\}} \left\{ \text{erf}\left(\frac{\sup(M_l) + A_1 D_1 g_1 + T_{1i}}{\sqrt{2\sigma_0}}\right) - \text{erf}\left(\frac{\inf(M_l) + A_1 D_1 g_1 + T_{1i}}{\sqrt{2\sigma_0}}\right) \right\} f_G(g_1) f_G(g_2) f_G(g_3) dg_1 dg_2 dg_3 \quad (6)$$

$$P_{e_2} = \frac{1}{8} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \sum_{l \in \{2,3,6,7\}} \left\{ \text{erf}\left(\frac{\sup(M_l) + A_2 D_2 g_2 + T_{2i}}{\sqrt{2\sigma_0}}\right) - \text{erf}\left(\frac{\inf(M_l) + A_2 D_2 g_2 + T_{2i}}{\sqrt{2\sigma_0}}\right) \right\} f_G(g_1) f_G(g_2) f_G(g_3) dg_1 dg_2 dg_3 \quad (7)$$

$$P_{e_3} = \frac{1}{8} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \sum_{l \in \{1,3,5,7\}} \left\{ \text{erf}\left(\frac{\sup(M_l) + A_3 D_3 g_3 + T_{3i}}{\sqrt{2\sigma_0}}\right) - \text{erf}\left(\frac{\inf(M_l) + A_3 D_3 g_3 + T_{3i}}{\sqrt{2\sigma_0}}\right) \right\} f_G(g_1) f_G(g_2) f_G(g_3) dg_1 dg_2 dg_3 \quad (8)$$

که T_i ها به شرح زیر است:

$$T_1 = [(-A_2 D_2 g_2 - A_3 D_3 g_3), (A_2 D_2 g_2 - A_3 D_3 g_3), (-A_2 D_2 g_2 + A_3 D_3 g_3), (+A_2 D_2 g_2 + A_3 D_3 g_3)]$$

$$T_2 = [(-A_1 D_1 g_1 - A_3 D_3 g_3), (A_1 D_1 g_1 - A_3 D_3 g_3), (-A_1 D_1 g_1 + A_3 D_3 g_3), (+A_1 D_1 g_1 + A_3 D_3 g_3)]$$

$$T_3 = [(-A_1 D_1 g_1 - A_2 D_2 g_2), (A_1 D_1 g_1 - A_2 D_2 g_2), (-A_1 D_1 g_1 + A_2 D_2 g_2), (+A_1 D_1 g_1 + A_2 D_2 g_2)]$$

$\sup\{M_l\}$ و $\inf\{M_l\}$ به ترتیب بزرگترین کران پایین و کوچکترین کران بالا ناحیه M_l است. به طور مثال، $\sup\{M_6\} = A_1 D_1 \bar{g}_1 + A_2 D_2 \bar{g}_2$ و $\inf\{M_6\} = A_1 D_1$ است.

در ادامه، عبارات تحلیلی احتمال خطای روش SIC برای مقایسه با احتمال خطای روش MTh به دست می‌آید. آشکارسازی کاربرها با استفاده از روش SIC برای هر سه کاربر به صورت زیر است:

$$\hat{b}_1 = \text{sign}(y)$$

$$\hat{b}_2 = \text{sign}(y - A_1 D_1 \bar{g}_1 \hat{b}_1)$$

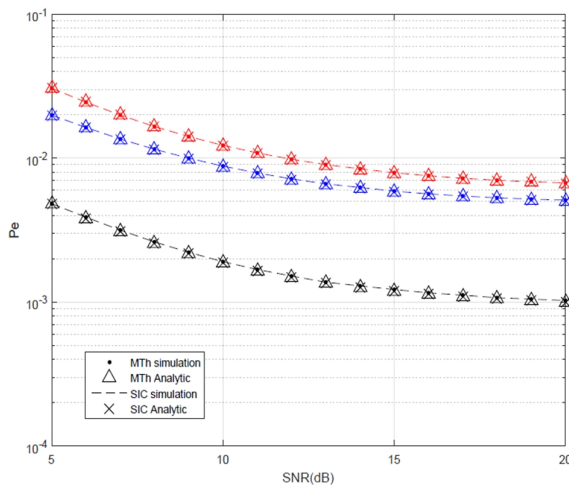
$$\hat{b}_3 = \text{sign}(y - A_1 D_1 \bar{g}_1 \hat{b}_1 - A_2 D_2 \bar{g}_2 \hat{b}_2) \quad (9)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

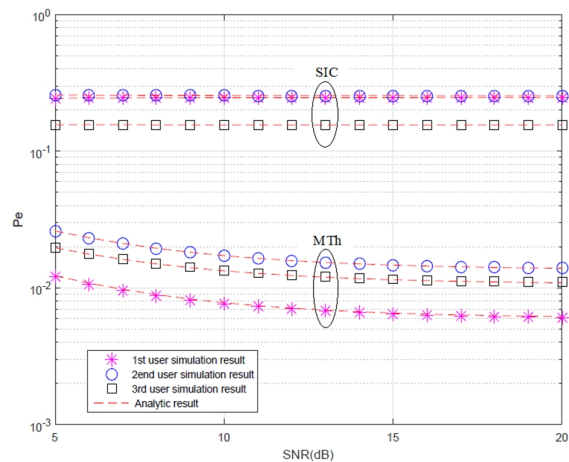
در این بخش نتایج شبیه‌سازی برای مقایسه روش‌های MTh و SIC و همچنین تایید عبارات تحلیلی به‌دست‌آمده در بخش‌های قبل، ارائه شده‌ست. نتایج در حالتی برر سی شده‌ست که کانال با محو شدگی رایسی با ضریب $k = 19 \text{ dB}$ و $k = 17 \text{ dB}$ و $\sigma^2 = 1$ ، $d = 1.1$ و $\beta = 2$ می‌باشند. نویز کانال AWGN دارای $\sigma_0^2 = 1$ است و ضرایب A_i ثابت در نظر گرفته شده‌است. نتایج Pe برای کاربران مختلف برحسب $SNR(\text{dB})$ در شکل (۳)، (۴)، (۵) و (۶) آورده شده‌ست. برای شکل (۳)، پارامترها $A_1 = 9$ ، $A_2 = 4$ و $A_3 = 2$ و $k = 19 \text{ dB}$ برای شکل (۴)، پارامترها $A_1 = 12$ ، $A_2 = 8$ و $A_3 = 5$ و $k = 19 \text{ dB}$ و شکل (۵)، پارامترها $A_1 = 6$ ، $A_2 = 3$ و $A_3 = 1$ و $k = 17 \text{ dB}$ و برای شکل (۶)، پارامترها $A_1 = 9$ ، $A_2 = 6$ و $A_3 = 4$ و $k = 17 \text{ dB}$ می‌باشد. مقادیر $\bar{h}_i$ با تغییر پارامتر $k(\text{dB})$ تغییر می‌کند و برای شکل (۳) و (۴) برابر $\bar{h}_1 = \bar{h}_2 = \bar{h}_3 = 12.63$ و برای شکل (۵) و (۶) برابر $\bar{h}_1 = \bar{h}_2 = \bar{h}_3 = 10.06$ می‌باشد.

شکل (۳) و (۵) عملکرد Pe عبارت تحلیلی و شبیه‌سازی روش‌های MTh و SIC را برای حالت $A_1\bar{h}_1 > A_2\bar{h}_2 + A_3\bar{h}_3$ نشان می‌دهد، که در این حالت منحنی احتمال خطای هر دو روش بر هم منطبق هستند. همچنین منحنی‌های به‌دست‌آمده توسط شبیه‌سازی بر منحنی‌های تحلیلی منطبق است که صحت روابط تحلیلی به‌دست‌آمده را تایید می‌کند. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود کارایی روش MTh در این حالت برابر روش SIC می‌باشد.

شکل (۴) و (۶) عملکرد Pe عبارت تحلیلی و شبیه‌سازی روش‌های MTh و SIC را برای حالت $A_1\bar{h}_1 < A_2\bar{h}_2 + A_3\bar{h}_3$ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، روش MTh بهتر از روش SIC عمل می‌کند. همچنین منحنی‌های به‌دست‌آمده توسط شبیه‌سازی بر منحنی‌های تحلیلی منطبق است که صحت روابط تحلیلی به‌دست‌آمده را تایید می‌کند.



شکل (۳): منحنی‌های شبیه‌سازی و تحلیلی احتمال خطا برحسب $SNR(\text{dB})$ برای آشکارسازهای MTh و SIC در حالت $A_1\bar{h}_1 > A_2\bar{h}_2 + A_3\bar{h}_3$ با مقادیر $k = 19 \text{ dB}$ و $A_1 = 9, A_2 = 4, A_3 = 2$



شکل (۴): منحنی‌های شبیه‌سازی و تحلیلی احتمال خطا برحسب $SNR(\text{dB})$ برای آشکارسازهای MTh و SIC در حالت $A_1\bar{h}_1 < A_2\bar{h}_2 + A_3\bar{h}_3$ با مقادیر $k = 19 \text{ dB}$ و $A_1 = 12, A_2 = 8, A_3 = 5$

با مقایسه شکل‌های (۴) و (۶) مشاهده می‌شود، با کاهش مقادیر $k(\text{dB})$ و A_i منحنی‌های احتمال خطای روش‌های MTh و SIC به هم نزدیک‌تر می‌شوند. لازم به ذکر است که اگر فقط پارامتر $k(\text{dB})$ کاهش یابد، باز هم منحنی‌های MTh و SIC به هم نزدیک می‌شوند. اگر مقدار $k(\text{dB})$ افزایش یابد، این منحنی‌ها از هم دورتر می‌شوند. همچنین با کاهش دو پارامتر مشاهده می‌شود مقدار عددی احتمال خطا در شکل‌های (۵) و (۶) بیشتر از شکل‌های (۳) و (۴) شده‌است.

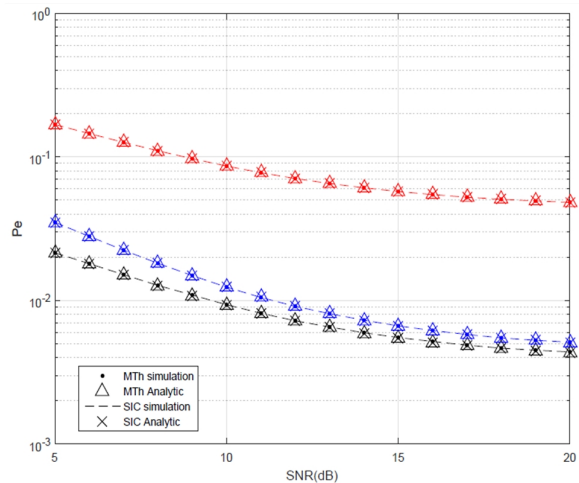
سپاسگزاری

این پژوهش تحت شماره قرارداد RD-51-9911-0039 توسط مرکز تحقیق و توسعه شرکت ارتباطات سیار ایران (همراه اول) و جهت پیشرفت حوزه فناوری اطلاعات و ارتباطات مورد حمایت قرار گرفته است.

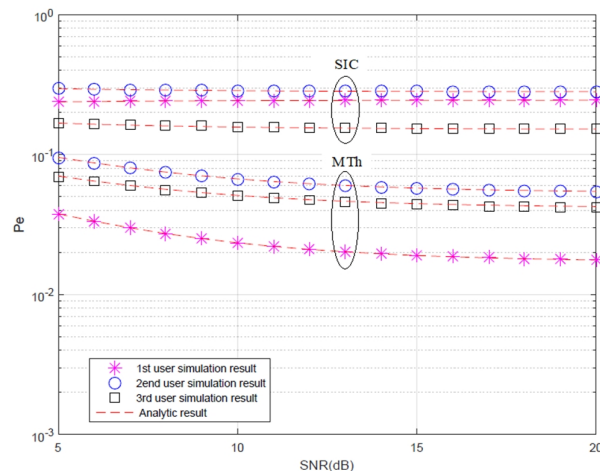
مراجع

- [1] B. Kim, Y. Park, and D. Hong, "Partial Non-Orthogonal Multiple Access (P-NOMA)," IEEE Wireless Communications Letters, Vol. 8, No. 5, pp. 1377-1380, October 2019.
- [2] Z. Ding, M. Peng, and H. Vincent Poor, "Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems," IEEE Communications Letters, Vol. 19, No. 8, pp. 1462-1465, August 2015.
- [3] S.M. Saberali, and H. Amindavar, "Nonlinear Detector Design for CDMA Signals in the Presence of Unknown Interferers Using Maximum Entropy Method and Comparison with SIC," IEEE Communications Letter, Vol. 18, No. 5, pp. 737-740, May 2014.
- [4] S. M. Saberali, H. Amindavar, and A. R. Moghaddamjoo, "BER Calculation and Investigation of Optimal Single User Detector for a BPSK Signal Contaminated by Cochannel Interferer," IEEE Communications Letters, Vol. 12, No. 10, pp. 705-707, October 2008.
- [5] X. Wang, F. Labeau, L. Mei, "Closed-Form BER Expressions of QPSK Constellation for Uplink Non-Orthogonal Multiple Access," IEEE Communications Letters, Vol. 21, No. 10, pp. 2242-2245, October 2017.
- [6] G. Bartoli, N.C. Beaulieu, R. Fantacci, and D. Marabissi, "An Effective Multiuser Detection Scheme for MPR Random Access Networks," IEEE Transactions on Communications, Vol. 65, No. 3, pp. 1119-1130, March 2017.
- [7] B. Alinezhad Seyyedmahalleh, S.M. Saberali, F. Parvaresh, and M. Majidi, "On the Performance of ECF-based Multi-Threshold Receiver in NOMA Systems for Vehicular Communications with Unknown Impulsive Noise," Vehicular Communications, Vol. 29, 2021.
- [8] ع. ترابزاده، م. مجیدی و م. باغانی، «بهبود بازدهی انرژی در شبکه‌های فراسوی دسترسی چندگانه پویای متعامد و غیر متعامد»، مجله پردازش سیگنال پیشرفته، جلد ۴، شماره ۱، صفحات ۲۷-۱۷، بهار و تابستان ۱۳۹۹.
- [9] ن. مظفرزاده و ح. خالقی بیزکی، «طراحی گیرنده مقاوم نسبت به خطای تخمین در سیستم MIMO-NOMA»، مجله پردازش سیگنال پیشرفته، جلد ۵، شماره ۱، صفحات ۸۷-۷۹، بهار و تابستان ۱۴۰۰.

- [10] Z. Liu and L. Yang, "Sparse or Dense: A Comparative Study of Code-Domain NOMA System," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 20, No. 8, August 2021.
- [11] T. Analooei, S.M. Saberali, M. Majidi, "Multi-Threshold Detector with Fair Power Allocation Coefficients for NOMA Signals with Statistical CSI," IEEE Communications Letter, Vol. 25, No. 12, pp. 3970-3974, December 2021.
- [12] S. L. Shieh and Y. C. Huang, "A Simple Scheme for Realizing the Promised Gains of Downlink Nonorthogonal Multiple Access," IEEE Transactions on Communications, Vol. 64, No. 4, pp. 1624-1635, April 2016.
- [13] P. Xu, K. Cumanan, "Optimal Power Allocation Scheme for Non-Orthogonal Multiple Access with α -Fairness," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 35, No. 10, pp. 2357-2369, October 2017.
- [14] A. L. Garcia, Probability, Statistics, and Random Processes for Electrical Engineering (3rd Edition), Pearson Prentice Hall, Upper saddle River, NJ, USA 2008.
- [15] I. Gradshteyn and I. Ryzhik, Table of Integrals, Series, and Products (7th Edition), Academic Press, San Diego, CA, USA, 2007.



شکل (۵): منحنی‌های شبیه‌سازی و تحلیلی احتمال خطا بر حسب SNR(dB) برای آشکارسازهای MTh و SIC در حالت $A_1\bar{h}_1 > A_2\bar{h}_2 + A_3\bar{h}_3$ با مقادیر $k = 17 \text{ dB}$ و $A_1 = 6, A_2 = 3, A_3 = 1$



شکل (۶): منحنی‌های شبیه‌سازی و تحلیلی احتمال خطا بر حسب SNR(dB) برای آشکارسازهای MTh و SIC در حالت $A_1\bar{h}_1 < A_2\bar{h}_2 + A_3\bar{h}_3$ با مقادیر $k = 17 \text{ dB}$ و $A_1 = 9, A_2 = 6, A_3 = 4$

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک طرح آشکارسازی چندآستانه برای سیستم NOMA فراسو با محوشدگی رایسی ارائه و عملکرد روش پیشنهادی با روش SIC مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی و روابط تحلیلی نشان می‌دهد کارایی روش MTh در حالت $A_1\bar{h}_1 < A_2\bar{h}_2 + A_3\bar{h}_3$ بهتر از روش SIC است، همچنین روش MTh تاخیر کمتری برای آشکارسازی سیگنال ضعیف‌تر دارد.

زیر نویس ها

- [^] Individually Optimal Receiver
- [^] Code Division Multiple Access
- [^] Collision
- [^] Base Station
- [^] Line Of Sight
- [^] Probability of error
- [^] Bayes

- [^] Fifth Generation
- [^] Non-Orthogonal Multiple Access
- [^] Orthogonal Multiple Access
- [^] Successive Interference Cancellation
- [^] Multi Threshold
- [^] Optimal Single User Detector
- [^] Additive White Gaussian Noise