مجله علمی پژوهشی «علوم و فناوری‌های پدافند غیرعامل»
سال چهارم، شماره۱، بهار ۱۳۹۲؛ ص۳۰-۲۳

اثر اختلال‌گر پهن‌باند بر کارایی شکل‌دهی پرتو توزیع‌یافته در شبکه واسطه‌ای

مهدی چراغی[1*]، سجاد ایمانی[1]
۱- پژوهشگر دانشگاه جامع امام حسین (ع)
(دریافت: ۹۱/۰۴/۱۰، پذیرش: ۹۲/۰۳/۰۷)

چکیده

در این مقاله، اثر موقعیت‌های مختلف اختلال‌گر پهن‌باند بر دو شبکه مخابرات واسطه‌ای که به‌ترتیب دارای یک و r واسط هستند بررسی شده است. در هر دو شبکه، از روش تقویت و ارسال (AF) در انتقال پیام استفاده شده است. واسط، منبع فرستنده و مقصد گیرنده هر کدام یک آنتن دارند. در شبکه نخست، فرستنده سیگنال پیام خود را از طریق یک لینک مستقیم و نیز یک لینک واسط به گیرنده ارسال می‌کند. در شبکه دوم، لینک مستقیمی وجود ندارد و ابتدا هر واسط توان خود را بر اساس شرایط کانال خود و واسطه‌های دیگر به‌صورت بهینه تنظیم کرده و سپس اقدام به ارسال سیگنال دریافتی خود به سمت مقصد می‌کند. نتایج شبیه‌سازی‌ها برای شبکه نخست نشان می‌دهند زمانی‌که اختلال‌گر در نزدیکی فرستنده باشد، اثر اختلال افزایش یافته و در شبکه دوم، اگر اختلال‌گر نزدیک به واسط باشد، کیفیت سرویس‌دهی در گیرنده کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: شبکه واسطه‌ای، شکل‌دهی پرتو توزیع‌یافته، اختلال‌گر پهن‌باند.

The Effect of the Broadband Jammer on a Distributed Beamforming Performance in a Relay Network

M. Cheraghi[*], S. Imani
Imam Hossein University
(Received: 30/06/2012; Accepted: 28/05/2013)

Abstract

In this paper, the effect of the broadband jammer is considered in two relay communications networks for various positions of the jammer. The first and second network has one and r relays, respectively. In both networks, each relay has one antenna and use Amplify and Forward (AF) protocol to transmit messages. Each of the source and the destination uses one antenna to send and receive messages, respectively. In the first network, the source transmits its signal in two relay-link and direct-link path stoward the destination. In the second network, each relay transmits its received signal after adjusting its power toward the destination. Simulation results show for the first network that when a jammer is close to the source, the jamming effect increases, and in the second network, if the jammer is near to relays, quality of service decrease.

Keywords: Relay Network, Distributed Beamforming, Broadband Jamming.

[*]Corresponding Author Email: Mehdi.cheraghi1@gmail.com

۱. مقدمه

در شبکه‌های مخابرات همیار[1]، برای ایجاد لینک مستقل بین فرستنده و گیرنده از شبکه‌های واسط استفاده می‌شود. از واسط‌ها به‌عنوان لینک کمکی برای بالا بردن کیفیت و اطمینان ارتباطی بین فرستنده و گیرنده استفاده می‌شود. در شبکه‌های واسطه‌ای از روش‌های مختلفی همچون تقویت و ارسال[2] (AF)، کدگشایی و ارسال[3] (DF) و نیز همکاری متقابل کدشده[4] (CC) برای ارسال پیام دریافتی از فرستنده استفاده می‌شود [۱].

برای مختل کردن[5] ارتباط مخابراتی از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. از انواع متداول اختلال می‌توان اختلال‌گر پهن‌باند[6]، اختلال‌گر تک فرکانس[7]، اختلال‌گر چند فرکانس[8]، اختلال‌گر هوشمند[9] و اختلال‌گر پالسی[10] را نام برد [۲]. اگر فرکانس کاری (فرکانس مرکزی و پهنای باند) ارتباط مخابراتی هدف مشخص باشد، استفاده از اختلال‌گر تک فرکانس یا باند کسری[11] از لحاظ هزینه مقرون به صرفه است. در ارتباطاتی که از مدولاسیون‌های با قابلیت پرش فرکانسی[12] استفاده می‌شود می‌توان از اختلال‌گر چند فرکانسی برای ایجاد اختلال بهره برد [۳]. در حالتی‌که فرکانس کاری هدف مشخص نباشد و اختلال کامل بر روی هدف مورد نظر باشد، به‌کارگیری اختلال پهن‌باند بهترین نتیجه را خواهد داشت. اختلال در شبکه‌های واسط نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۴]. همچنین اثر اختلال نویز پهن‌باند و عدم قطعیت کانال در شبکه‌ای متشکل از یک جفت فرستنده-گیرنده و N واسط بررسی شده است [۵]. در شبکه‌های ارتباطی دو طرفه از واسط می‌توان برای انتقال اطلاعات به گیرنده و نیز مختل کردن شنودگرهای موجود در شبکه استفاده کرد [۶].

در شبکه‌های واسطه‌ای براساس نوع شبکه، میزان شناخت از سیگنال ارسالی فرستنده و شرایط کانال، الگوریتم‌های بهینه‌ای برای بهبود کیفیت سیگنال دریافتی در گیرنده ارائه شده است. به‌عنوان نمونه، مسئله شکل‌دهی پرتو توزیع‌یافته در شبکه‌ای متشکل از یک جفت فرستنده-گیرنده و چند واسط تک آنتنی بررسی شده است [۷]. در این شبکه اطلاعات کانال به‌صورت کامل در نظر گرفته شده است. شبکه ارائه شده در مرجع [۷] با این تفاوت که تنها آمارگان مرتبه دوم اطلاعات حالت کانال موجود است مورد بررسی قرار گرفته است [۸]. در شبکه‌های که چند جفت فرستنده-گیرنده دارند، برای بهبود کیفیت سیگنال دریافتی در هر گیرنده، کنترل توان واسطه‌ها باید به‌گونه‌ای تنظیم شود که کیفیت سیگنال مطلوب بر آورده شود [۷-۱۰].

در این مقاله، تأثیر موقعیت اختلال‌گر در دو شبکه واسطه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در شبکه نخست، ارتباط بین یک فرستنده و یک گیرنده تک آنتنی از طریق یک واسط تک آنتنیAF و نیز یک لینک مستقیم برقرار است. در این شبکه فرض شده که اطلاعات حالت کانال به‌صورت کامل در اختیار گیرنده و واسط قرار دارد. به علاوه، یک اختلال‌گر پهن‌باند در شبکه وجود دارد و اثر آن در دو موقعیت نزدیک به واسط و نزدیک به فرستنده بررسی شده است.

شبکه دوم شامل R واسط و یک جفت فرستنده-گیرنده است که همگی تک آنتنی هستند. در این شبکه، واسطه‌ها از روش تقویت و ارسال استفاده می‌کنند. هر واسط، مقیاس توان سیگنال دریافتی خود را تغییر داده و سپس آن را به سمت مقصد ارسال می‌کند. در شبکه مذکور، اختلال‌گر پهن‌باندی وجود دارد که در انتقال پیام از فرستنده به گیرنده اختلال ایجاد می‌کند. برای بررسی تأثیر اختلال‌گر در شبکه مذکور، موقعیت اختلال‌گر در دو حالت نزدیک به گیرنده مقصد و نزدیک به واسطه‌ها بررسی می‌شود.

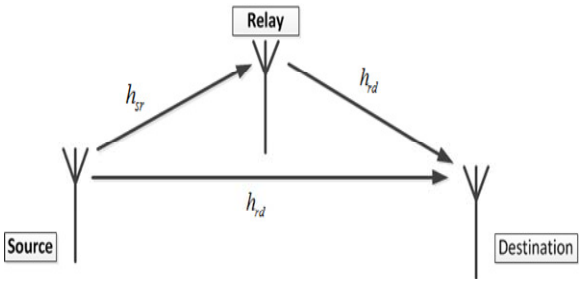
از دستاوردهای این مقاله می‌توان به این موضوع اشاره کرد که اگر در سیستم ارتباطی از واسط یا واسطه‌هایی برای برقراری ارتباط استفاده شود، با قرار دادن اختلال‌گر در موقعیت می‌توان بر روی انتقال سیگنال اختلال مطلوبی ایجاد کرد.

ساختار مقاله به این صورت است که در قسمت دوم تأثیر موقعیت اختلال‌گر در دو حالت و در شبکه تک واسطه‌ای بررسی شده است. در قسمت سوم، بررسی تأثیر موقعیت اختلال‌گر در شبکه چند واسطه‌ای بدون لینک مستقیم آورده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها در قسمت چهارم بیان شده و در نهایت، نتیجه‌گیری در قسمت پنجم مطرح شده است.

۲. تأثیر موقعیت اختلال‌گر در شبکه تک واسط با لینک مستقیم

در شکل (۱)، شبکه واسطه‌ای مورد نظر نشان داده شده است. این شبکه بدون وجود اختلال‌گر قبلاً مورد بررسی قرار گرفته است [۴]. این شبکه شامل یک جفت فرستنده-گیرنده تک آنتنی و نیز یک واسط تک آنتنی است. انتقال اطلاعات از فرستنده به گیرنده در دو مرحله صورت می‌گیرد. در مرحله اول، واسط و گیرنده، سیگنال ارسالی از فرستنده را دریافت می‌کنند. در مرحله دوم، فرستنده خاموش است و واسط بر اساس روش AF سیگنال دریافتی خود را به سمت گیرنده ارسال می‌کند. در ادامه تأثیر محل قرار گرفتن اختلال‌گر را بر روی ارتباط بین گیرنده و فرستنده شرح داده خواهد شد.

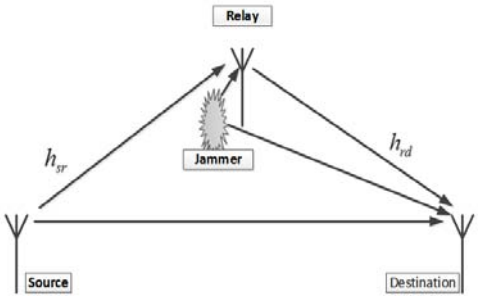
[1] Cooperative Communication
[2] Amplify and Forward
[3] Decode and Forward
[4] Code Cooperation
[5] Jamming
[6] Broadband
[7] Single Tone
[8] Multi Tone
[9] Smart
[10] Pulse
[11] Partial Band
[12] Frequency Hopping



شکل ۱. شبکه واسطه‌ای [۴]

۲-۱. اختلال‌گر نزدیک به واسط

در شکل (۲)، اختلال‌گر در نزدیکی واسط قرار داده شده و فرض بر این است که می‌تواند بر واسط و گیرنده مقصد اثر بگذارد:



شکل ۲. بلوک دیاگرام شبکه در حالتی که اختلال‌گر نزدیک به واسط باشد

همان‌طور که در قسمت اول گفته شد، انتقال اطلاعات از فرستنده به گیرنده در دو مرحله صورت می‌گیرد. در مرحله اول، سیگنال ارسالی از فرستنده در گیرنده و واسط به‌ترتیب به‌صورت زیر دریافت می‌شوند:

$$Y_{sd} = h_{sd} X + n_{sd} \quad (۱)$$

$$Y_{sr} = h_{sr} X + n_{sr} + J \quad (۲)$$

که در روابط بالا، X سیگنال ارسالی از فرستنده، h_{sd} و h_{sr} به‌ترتیب ضریب کانال بین فرستنده و گیرنده و بین فرستنده و واسط، n_{sd} و n_{sr} به‌ترتیب نویز در گیرنده و واسط، Y_{sd} و Y_{sr} به‌ترتیب سیگنال دریافتی در گیرنده و واسط هستند. سیگنال پهن‌باند ارسالی اختلال‌گر J، دارای توزیع گوسی مختلط $J \sim N_c(0, N_j)$ است که بر روی سیگنال دریافتی واسط اثر گذاشته است.

لازم به ذکر است که ضرایب کانال به‌صورت کامل شناخته شده، مستقل از یکدیگر و دارای توزیع رایلی هستند. همچنین فرض شده است که نویز موجود در شبکه دارای توزیع گوسی مختلط $(n \sim N_c(0, N_0))$ است که مستقل از ضرایب کانال و سیگنال اختلال‌گر است.

در مرحله دوم انتقال سیگنال، فرستنده خاموش است و واسط سیگنال دریافتی خود را بعد از تنظیم توان به سمت فرستنده ارسال می‌کند. در نهایت، گیرنده مقصد، حاصل جمع سیگنال اختلال‌گر و سیگنال واسط را دریافت می‌کند و به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$Y_{rd} = h_{rd}\left(bY_{sr} + J\right) + n_{rd} \quad (۳)$$

در این رابطه، h_{rd} ضریب کانال بین واسط و گیرنده است و b پارامتر مهم در روش ارسال AF است و به‌عنوان ضریب تقویت سیگنال ارسالی از واسط به سمت مقصدتعیین می‌شود. از آنجایی‌که میزان توان ارسالی از واسط مقدار محدودی است، این پارامتر باید به‌گونه‌ای مشخص شود که قید توان ارسالی واسط را برآورده سازد که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$P = E\left[bY_{sr}\, b^{*} Y_{sr}^{*}\right] \quad (۴)$$

با جایگذاری رابطه (۲) در رابطه (۴)، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} P &= b^2 E\left[(h_{sr}X + n_{sr} + J)(h_{sr}X + n_{sr} + J)^{*}\right] \\ &= b^2 (P|h_{sr}|^2 + N_0 + N_j) \end{aligned} \quad (۵)$$

رابطه بالا با توجه به توضیحات داده شده قبلی و با فرض اینکه توان ارسالی از منبع فرستنده پیام و واسط یکسان و برابر P باشد محاسبه شده است. در نهایت، b به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$b = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P|h_{sr}|^2 + N_0 + N_j}} \quad (۶)$$

روش‌های مختلفی برای ترکیب کردن سیگنال‌های دریافتی که از مسیرهای مختلف به گیرنده می‌رسند وجود دارد [۱۱]. برای داشتن بهترین آشکارسازی در خروجی گیرنده، باید سیگنال‌های دریافتی در گیرنده را به‌گونه‌ای ترکیب کرد که SNR بیشینه شود. با توجه به اینکه در شبکه مذکور از چندگانگی فضایی[1] برای افزایش کیفیت سیگنال دریافتی در مقصد استفاده شده است، برای داشتن بهترین خروجی از ترکیب خطی حاصل از جمع وزن‌دهی شده آنها استفاده می‌شود. به این ساز و کار، ترکیب‌کننده به نسبت بیشینه[2] (MRC) گفته می‌شود [۱۲]. از این رو، بر اساس معیار MRC می‌توان نوشت:

$$Y_{mrc} = a_1 Y_{sd} + a_2 Y_{rd} \quad (۷)$$

در رابطه بالا، Y_{mrc} خروجی MRC، a_1 و a_2 ضرایب آن است و باید به‌گونه‌ای باشند که SNR بیشینه شود. با جایگذاری رابطه (۲) در رابطه (۳) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} Y_{rd} &= bh_{rd}\left(h_{sr}X + n_{sr} + J\right) + n_{rd} + h_{rd}J \\ &= b\, h_{sr}\, h_{rd}\, X + \eta \end{aligned} \quad (۸)$$

که $\eta = bh_{rd}\left(n_{sr} + J\right) + n_{rd} + h_{rd}J$ و دارای توزیع گوسی مختلط با

[1] Spatial Diversity
[2] Maximum Ratio Combining

میانگین صفر و واریانس κ است ($\eta \sim N_c(0,\kappa)$ و $\kappa = |h_{rd}|^2\left(b^2\left(N_0+N_j\right)+N_j\right)+N_0$). براساس[۱۳]، رابطه (۷) با توجه به (۱)و (۸)، به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned} Y_{mrc} &= \sum a_i Y_i \\ &= \mathbf{a}_{mrc}^T(\mathbf{h}X+\mathbf{z}) \\ &= \mathbf{a}_{mrc}^T\mathbf{h}X + \mathbf{a}_{mrc}^T\mathbf{z} \end{aligned} \quad (۹)$$

که در رابطه بالا، $\mathbf{a}_{mrc}=\begin{bmatrix}a_1 & a_2\end{bmatrix}^T$، $\mathbf{z}=\begin{bmatrix}n_{sd} & n_j\end{bmatrix}^T$ و $\mathbf{h}=\begin{bmatrix}h_{sd} & bh_{rd}h_{sd}\end{bmatrix}^T$ است.

با توجه به اینکه در خروجی گیرنده $\mathrm{SNR}=P_s/P_z$، توان‌های دریافتی سیگنال مطلوب و توان سیگنال نویز به اضافه توان اختلال به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$P_s = E\left[\left|\mathbf{a}_{mrc}{}^T\mathbf{h}X\right|^2\right] = P\left|\mathbf{a}_{mrc}{}^T\mathbf{h}\right|^2 \quad (۱۰)$$

$$P_z = E\left[\left|\mathbf{a}_{mrc}{}^T\mathbf{z}\right|^2\right] \quad (۱۱)$$

بر اساس دو رابطه بالا، SNR به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{SNR} = \frac{P_s}{P_z} = P\frac{\left|\mathbf{a}_{mrc}{}^T\mathbf{h}\right|^2}{E\left[\left|\mathbf{a}_{mrc}{}^T\mathbf{z}\right|^2\right]} \quad (۱۲)$$

بر اساس آنچه در مرجع [۱۲] آمده، ضرایب MRC، $\mathbf{a}_{mrc}$، به‌صورت زیر به‌دست آورده می‌شود:

$$\mathbf{a}_{mrc} = \begin{bmatrix} \dfrac{h_{sd}^*\sqrt{P}}{N_0} \\ \dfrac{b\,h_{sr}^*h_{rd}^*\sqrt{P}}{|h_{rd}|^2\left(b^2\left(N_0+N_j\right)+N_j\right)+N_0} \end{bmatrix} \quad (۱۳)$$

۲-۲. اختلال‌گر نزدیک به فرستنده

در شکل (۳)، فرض شده است که اختلال‌گر نزدیک به فرستنده است و بر سیگنال دریافتی مقصد و نیز واسط اثر می‌گذارد. همانند قسمت قبل، روش انتقال اطلاعات در دو مرحله صورت می‌گیرد. در مرحله نخست به‌صورت زیر است:

$$Y_{sd} = h_{sd}(X+J)+n_{sd} \quad (۱۴)$$

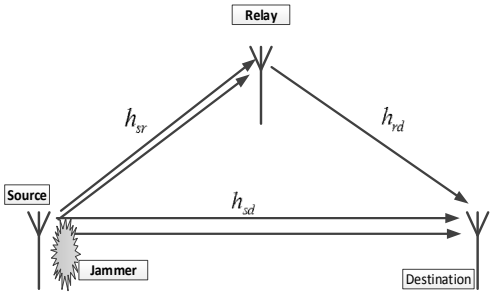
$$Y_{sr} = h_{sr}(X+J)+n_{sr} \quad (۱۵)$$

و در مرحله دوم انتقال اطلاعات، واسط سیگنال دریافتی خود را بعد از تقویت با ضریب b به سمت گیرنده ارسال می‌کند. از این رو، سیگنال دریافتی در گیرنده در این مرحله به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Y_{rd} = bh_{rd}Y_{sr}+n_{rd} \quad (۱۶)$$

مشابه قسمت قبل، ضریب تقویت توان متناسب با قید توان ارسالی واسط P برابر خواهد شد با $b=\sqrt{P}\Big/\sqrt{(P+N_j)|h_{sr}|^2+N_0}$. همچنین بر اساس آنچه که در قسمت قبل گفته شد می‌توان ضرایب MRC را برای این حالت به صورت زیر به‌دست آورد:

$$\mathbf{a}_{mrc} = \begin{bmatrix} \dfrac{h_{sd}^*\sqrt{P}}{N_0+|h_{sd}|^2N_j} \\ \dfrac{b\,h_{sr}^*h_{rd}^*\sqrt{P}}{b^2|h_{rd}|^2\left(|h_{sr}|^2N_j+N_0\right)+N_0} \end{bmatrix} \quad (۱۷)$$



شکل ۳. بلوک دیاگرام شبکه درحالتی که اختلال‌گر نزدیک به فرستنده باشد

۳. تأثیر موقعیت اختلال‌گر در شبکه چند واسطه‌ای بودن لینک مستقیم

در ابتدا، مسئله برای حالتی بیان می‌شود که اختلال‌گر در شبکه وجود ندارد [۷]. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، ابتدا فرستنده سیگنال $\sqrt{P_0}s$ را به سمت واسطه‌ها ارسال می‌کند. فرض بر این است که $E\left[|s|^2\right]=1$ و واسط iام سیگنال مذکور را که دچار محوشدگی شده و با نویز نیز جمع شده، r_i دریافت می‌کند. بر این اساس سیگنال دریافتی در هر واسط به صورت زیر بیان می‌شود:

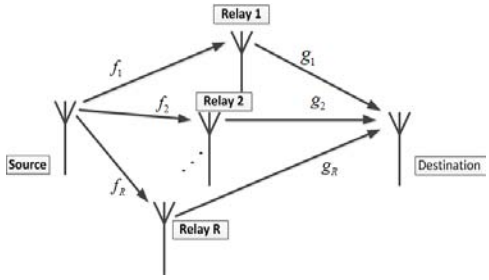
$$r_i = \sqrt{P_0}f_is+\upsilon_i \quad (۱۸)$$

که f_i ضریب کانال بین فرستنده و واسط iام و υ_i نیز نویز دریافتی در واسط iام با توزیع $\upsilon_i \sim N_c(0,1)$ است. در مرحله دوم، هر واسط، سیگنال دریافتی خود را بعد از نرمالیزه سازی و تنظیم توان به سمت مقصد ارسال می‌کند که به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$t_i = \alpha_i\sqrt{\frac{P_i}{1+|f_i|^2P_0}}e^{j\theta_i}r_i \quad (۱۹)$$

در رابطه بالا، α_i ضریب کنترل توان مربوط به واسط iام است. سیگنال دریافتی در مقصد x به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$x = \underbrace{\sqrt{P_0}\sum_{i=1}^{R}\frac{\alpha_i f_i g_i \sqrt{P_i}}{\sqrt{1+|f_i|^2 P_0}}\,s}_{\text{Desired signal}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{R}\frac{\alpha_i g_i \sqrt{P_i}}{\sqrt{1+|f_i|^2 P_0}}\upsilon_i + \omega}_{\text{Noise component}} \quad (۲۰)$$



شکل ۴. مدل شبکه [۷]

که در معادله (۲۰)، g_i ضریب کانال بین واسط iام و گیرنده مقصد و ω نیز نویز دریافتی در گیرنده است. از این رو، SNR در گیرنده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{SNR} = P_0 \frac{\left(\sum_{i=1}^{R}\frac{\alpha_i |f_i g_i|\sqrt{P_i}}{\sqrt{1+|f_i|^2 P_0}}\right)^2}{\left(1+\sum_{i=1}^{R}\frac{\alpha_i^2 |g_i|^2 P_i}{1+|f_i|^2 P_0}\right)} \quad (۲۱)$$

در [۷] نشان داده شده است که ضرایب کنترل توان بهینه می‌تواند از طریق رابطه زیر محاسبه شود:

$$x_j^{(i)} = \begin{cases} 1, & j = \tau_1,\ldots,\tau_i, \\ \lambda_i \phi_j & j = \tau_{i+1},\ldots,\tau_R. \end{cases} \quad (۲۲)$$

در رابطه (۲۲)، $(\tau_1,\tau_2,\ldots,\tau_R,\tau_{R+1}=R+1)$ شاخص مرتب شده مربوط به شماره هر یک از R واسط است و بر این اساس که $\phi_{\tau_1}\geq\phi_{\tau_2}\geq\ldots\phi_{\tau_R}\geq\phi_{\tau_{R+1}}=0$ مرتب شده‌اند. i در رابطه بالا برابر کوچک‌ترین مقدار i است که به ازای آن $\lambda_i < \phi_{\tau_{i+1}}^{-1}$ باشد و λ_i و $\phi_{\tau_{i+1}}^{-1}$ به‌ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\lambda_i \triangleq \frac{1+\sum_{m=1}^{i} a_{\tau_m}^2}{\sum_{m=1}^{i} b_{\tau_m}} \quad (۲۳)$$

$$\phi_j \triangleq \frac{|f_j|\sqrt{1+|f_j|^2 P_0}}{|g_j|\sqrt{P_j}} \quad (۲۴)$$

در (۲۳)، $b_j \triangleq \frac{|f_j g_j|\sqrt{P_j}}{\sqrt{1+|f_j|^2 P_0}}$ و $a_j \triangleq \frac{|g_j|\sqrt{P_j}}{\sqrt{1+|f_j|^2 P_0}}$ است.

۳- ۲. اختلال‌گر در نزدیکی گیرنده مقصد

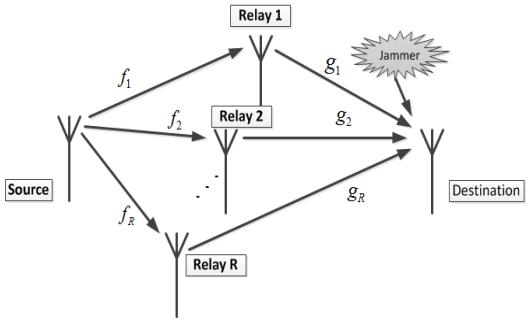
بر اساس شکل (۵)، سیگنال دریافتی در مقصد به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$x = \underbrace{\sqrt{P_0}\sum_{i=1}^{R}\frac{\alpha_i |f_i g_i|\sqrt{P_i}}{\sqrt{1+|f_i|^2 P_0}}\,s}_{\text{Desired signal}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{R}\frac{\alpha_i |g_i|\sqrt{P_i}}{\sqrt{1+|f_i|^2 P_0}}\upsilon_i + \omega}_{\text{Noise component}} + \underbrace{J}_{\text{Jamming component}} \quad (۲۵)$$

که در آن، J نشان دهنده سیگنال اختلال‌گر در گیرنده مقصد با توزیع $J \sim N_c(0,N_J)$ که N_J نشان دهنده توان سیگنال اختلال‌گر در گیرنده مقصد است. از این رو، SNJR به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{SNJR} = P_0 \frac{\left(\sum_{i=1}^{R}\frac{\alpha_i |f_i g_i|\sqrt{P_i}}{\sqrt{1+|f_i|^2 P_0}}\right)^2}{\left(1+N_J+\sum_{i=1}^{R}\frac{\alpha_i^2 |g_i|^2 P_i}{1+|f_i|^2 P_0}\right)} \quad (۲۶)$$

اما از آنجایی که در روند محاسبه ضرایب شکل‌دهی پرتو، مقدار توان تداخلی اختلال‌گر تأثیری ندارد، می‌توان نتیجه گرفت که ضرایب شکل‌دهی پرتو زمانی که اختلال‌گر در نزدیکی مقصد قرار دارد در محاسبه آنها تأثیری ندارد. از این رو، این مقادیر از روی روابط (۲۲)-(۲۳) قابل محاسبه هستند.



شکل ۵. مدل شبکه واسطه‌ای بی‌سیم با وجود اختلال‌گر در نزدیکی گیرنده مقصد

۳- ۲. اختلال‌گر در نزدیکی واسطه‌ها

بر اساس شکل (۶)، سیگنال دریافتی در مقصد به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$x=\underbrace{\sqrt{P_0}\sum_{i=1}^{R}\frac{\alpha_i|f_i g_i|\sqrt{P_i}}{\sqrt{1+|f_i|^2P_0}}s}_{\text{Desired signal}}+\underbrace{\sum_{i=1}^{R}\frac{\alpha_i|g_i|\sqrt{P_i}}{\sqrt{1+|f_i|^2P_0}}J}_{\text{Jamming component}}+\underbrace{\sum_{i=1}^{R}\frac{\alpha_i|g_i|\sqrt{P_i}}{\sqrt{1+|f_i|^2P_0}}v_i+\omega}_{\text{Noise component}} \quad (۲۷)$$

همان‌طور که مشخص است، سیگنال اختلال‌گر J، همانند نویز با سیگنال دریافتی در واسطه‌ها جمع شده است. از این رو، SNJR به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{SNJR}=P_0\frac{\left(\sum_{i=1}^{R}\frac{\alpha_i|f_i g_i|\sqrt{P_i}}{\sqrt{1+|f_i|^2P_0}}\right)^2}{\left(1+\sum_{i=1}^{R}\frac{\alpha_i^2|g_i|^2P_i}{1+|f_i|^2P_0}(1+N_J)\right)} \quad (۲۸)$$

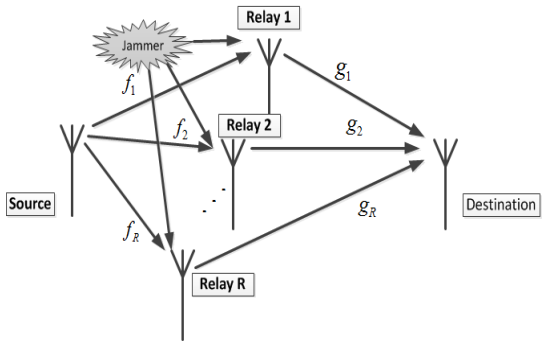
بر اساس روابط مرجع [۷]، ضرایب شکل‌دهی پرتو به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\tilde{x}_j^{(i)}=\begin{cases}1, & j=\tau_1,\ldots,\tau_i,\\ \tilde{\lambda}_i\tilde{\phi}_j & j=\tau_{i+1},\ldots,\tau_R.\end{cases} \quad (۲۹)$$

که $\tilde{\lambda}_i$ و $\tilde{\phi}_j$ بر طبق روابط (۲۳) و (۲۴) و با پارامترهای زیر به‌دست می‌آیند:

$$\tilde{a}_{\tau_m}=\sqrt{1+N_J}\,a_{\tau_m} \quad (۳۰)$$

$$\tilde{\phi}_j=\frac{\phi_j}{(1+N_J)} \quad (۳۱)$$



شکل ۶. مدل شبکه واسطه‌ای بی‌سیم با وجود اختلال‌گر در نزدیکی واسطه‌ها

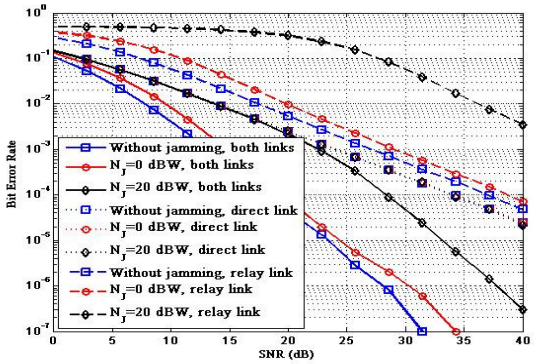
۴. نتایج شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی، ضرایب کانال‌های ارتباطی بین همه گره‌ها به‌صورت رایلی با واریانس واحد در نظر گرفته شده‌اند. همچنین نویز موجود در شبکه به‌صورت گوسی مختلط متقارن، با میانگین صفر و واریانس واحد فرض شده است. در شبیه‌سازی‌ها از مدولاسیون BPSK استفاده شده و توان ارسال از منبع فرستنده پیام و هر واسط برابر واحد است. در ادامه به‌صورت جداگانه برای هر کدام از شبکه‌ها، نتایج شبیه‌سازی تفسیر شده است.

۴- ۱. شبکه یک

در شکل (۷) احتمال خطای بیت مربوط به شبکه مطرح شده در قسمت (۲-۱) نشان داده شده است. خطوط توپر برای حالتی است که در گیرنده از هر دو لینک مستقیم و واسط برای تصمیم‌گیری استفاده شده است. خطوط نقطه- نقطه نیز برای حالتی است که گیرنده تنها از لینک مستقیم سیگنال را دریافت می‌کند و خطوط بریده- بریده زمانی است که گیرنده تنها سیگنال ارسالی واسط را دریافت می‌کند.

احتمال خطای بیت در برابر SNR، به ازای مقادیر مختلفی از توان اختلال‌گر و نیز برای حالت بدون اختلال رسم شده است. همان‌طور که از این شکل برمی‌آید برای دسته خطوط توپر و خطوط بریده- بریده، با افزایش N_J میزان BER در برابر SNR مشخصی افزایش یافته است. این به‌همان علتی است که اختلال‌گر نزدیک به واسط است و باعث خراب کردن سیگنال ارسالی از طریق واسط می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که به‌علت عدم تأثیر گذاری اختلال‌گر بر سیگنال ارسالی از طریق لینک مستقیم کیفیت یکسانی در گیرنده دارند.



شکل ۷. احتمال خطای بیت در برابر SNR برای حالتی که اختلال‌گر در نزدیکی واسط باشد، برای شبکه اول، قسمت ۲-۱

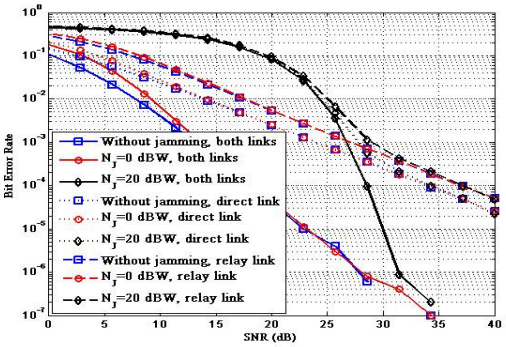
به‌طور واضح مشخص است که آشکارسازی و تصمیم‌گیری در مورد سیگنال دریافتی زمانی که از هر دو مسیر باشد کیفیت بهتری نسبت به دو حالت دیگر دارد. آشکارسازی از لینک مستقیم که در این قسمت تحت تأثیر اختلال‌گر نیست کیفیت بهتری نسبت به تصمیم‌گیری بر اساس سیگنال دریافتی از واسط دارد. همچنین مشاهده می‌شود که تصمیم‌گیری بر اساس سیگنال دریافتی از واسط در حالتی که تحت تأثیر اختلال‌گر نباشد به تصمیم‌گیری بر اساس سیگنال دریافتی از لینک مستقیم بسیار نزدیک است.

از این رو می‌توان نتیجه گرفت که در این سناریو، به‌کارگیری واسط حتی در شرایطی که تحت تأثیر اختلال‌گر باشد به‌خاطر چندگانگی که در سیگنال دریافتی ایجاد می‌کند کیفیت

سرویس‌دهی را بهبود می‌بخشد.

برای ارزیابی شبکه در قسمت ۲-۲، شکل (۸) رسم شده است. لازم به ذکر است که توصیف خطوط همانند شکل (۷) است.

احتمال خطای بیت در برابر SNR، به ازای مقادیر مختلفی از توان اختلال‌گر و نیز برای حالت بدون اختلال رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای SNR مشخصی در هر سه دسته خطوط با افزایش N_J میزان BER افزایش یافته است. همانند شکل (۷)، استفاده از سیگنال دریافتی از هر دو لینک باعث بهبود کیفیت سیگنال شده است.



شکل ۸. احتمال خطای بیت در برابر SNR برای حالتی که اختلال‌گر در نزدیکی واسط باشد، برای شبکه اول، قسمت ۲-۲

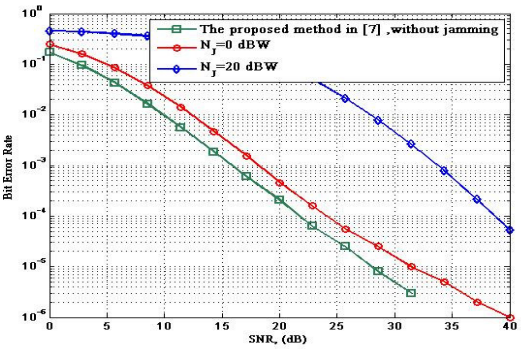
در تحلیل خطوط توپر در شکل می‌توان گفت که اگر اندازه توان اختلال‌گر حدود توان فرستنده باشد، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر آشکارسازی سیگنال ندارد. اما در توان‌های بالای ارسالی از سوی اختلال‌گر، باعث خرابی سیگنال به‌میزان زیادی می‌شود. البته لازم به ذکر است همان‌طور که از این شکل پیدا است SNRهای شکل بالا به حالت بدون اختلال‌گر میل می‌کنند که امری بدیهی است.

در تحلیل دسته خطوط نقطه- نقطه‌ای و بریده- بریده می‌توان گفت که به علت تأثیری که اختلال‌گر به ترتیب بر لینک مستقیم و لینک از طریق واسط دارد در سطوح SNR پایین باعث تخریب سیگنال می‌شود و البته با افزایش میزان SNR، دو خط قرمز و مشکی به حالت آبی میل می‌کنند.

به‌طور واضح مشخص است که همانند نتیجه حاصل از شکل (۷)، آشکارسازی و تصمیم‌گیری در مورد سیگنال دریافتی زمانی که از هر دو مسیر باشد کیفیت بهتری نسبت به دو حالت دیگر دارد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که به کارگیری واسط حتی در شرایطی که فرستنده تحت تأثیر اختلال‌گر باشد به‌خاطر چندگانگی که در سیگنال دریافتی ایجاد می‌کند کیفیت سرویس‌دهی بهتری خواهد داشت.

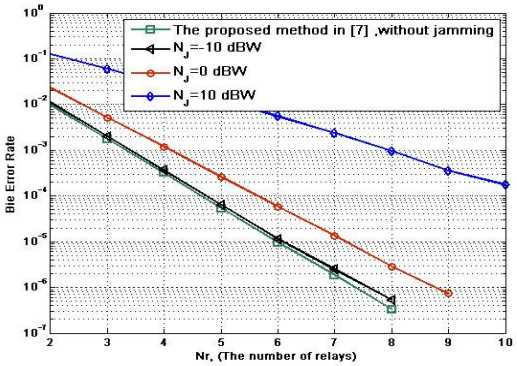
۴-۲. شبکه دو

در شکل (۹) احتمال خطای بیت مربوط به شبکه دوم مطرح شده در قسمت ۳-۱ نشان داده شده است. در شبیه‌سازی این شبکه فرض بر آن است که دو واسط در آن موجود هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنها در حالتی که اختلال‌گر دارای N_J بزرگ باشد دارای اثر مخرب است. به‌عبارت دیگر می‌توان گفت که وجود چند واسط در شبکه و به‌کارگیری آنها برای ارسال پیام و در نتیجه داشتن چندگانگی، اثر اختلال‌گر حتی در نزدیکی مقصد، نمی‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر سیگنال دریافتی مقصد بگذارد مگر این که اختلال‌گر از توان‌های بسیار بالااستفاده کند.



شکل ۹. احتمال خطای بیت در برابر SNR برای حالتی که اختلال‌گر در نزدیکی مقصد باشد، برای شبکه دوم، قسمت ۳- ۱

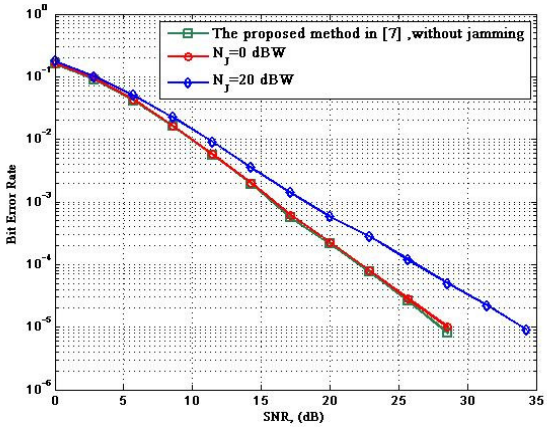
شکل (۱۰) برای نشان دادن تأثیر تعداد واسطه‌ها در شبکه قسمت ۳-۱ رسم شده است. برای این شبکه SNR=۱۰ dB در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد واسطه‌ها و در نتیجه افزایش چندگانگی در شبکه، کیفیت سیگنال دریافت‌شده در مقصد بهبود پیدا می‌کند.



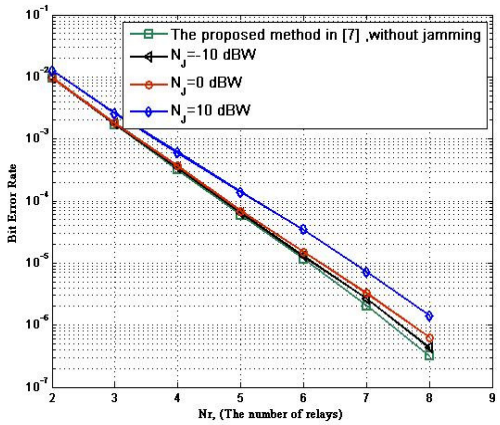
شکل ۱۰. احتمال خطای بیت در برابر تعداد واسط (N_r) برای حالتی‌که اختلال‌گر در نزدیکی مقصد باشد، برای شبکه دوم، قسمت ۳-۱

در شکل (۱۱) احتمال خطای بیت مربوط به شبکه دوم مطرح شده در قسمت ۳-۲ نشان داده شده است. تعداد دو واسط برای این شبکه در نظر گرفته شده است. همان‌طور که از شکل (۱۲) بر می‌آید، برخلاف نتیجه به‌دست آمده از شکل (۹)، حتی در حالتی که اختلال‌گر دارای N_J بزرگ باشد اثر مخرب کمی بر سیگنال دریافتی

دارد زیرا واسطه‌ها می‌توانند با تعیین ضریب شکل‌دهی پرتو مناسب باعث کاهش اثر توان سیگنال مخرب دریافتی خود باشند و در نتیجه کیفیت سیگنال دریافتی در مقصد را بسیار بهبود ببخشند. به‌عبارت دیگر می‌توان گفت که وجود اختلال‌گر در نزدیکی واسطه‌ها، موقعیت مناسبی برای ایجاد اختلال بر سیگنال دریافتی نیست و تأثیر واسطه‌ها بیشتر است.



شکل ۱۱. احتمال خطای بیت در برابر SNR برای حالتی که اختلال‌گر در نزدیکی واسطه‌ها باشد، برای شبکه دوم، قسمت ۳-۲



شکل ۱۲. احتمال خطای بیت در برابر تعداد واسط(N_r) برای حالتی که اختلال‌گر در نزدیکی واسطه‌ها باشد. برای شبکه دوم، قسمت ۳-۲

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر موقعیت‌های مختلف اختلال‌گر پهن‌باند بر دو شبکه مخابرات واسطه‌ای مبتنی بر پرتکل AF بررسی شد. در شبکه نخست که یک واسط داشت، نشان داده شد که آشکارسازی و تصمیم‌گیری در گیرنده مقصد زمانی که از هر دو مسیر مستقیم و واسطه‌ای باشد کیفیت بهتری نسبت به دو حالت‌های تصمیم‌گیری بر اساس یک مسیر خواهد داشت. به عبارت دیگر در این نوع شبکه، به‌کارگیری واسط حتی در شرایطی که تحت تأثیر اختلال‌گر باشد به‌خاطر چندگانگی که در سیگنال دریافتی ایجاد می‌کند کیفیت سرویس‌دهی را بهبود می‌بخشد.

در شبکه دوم که R واسط داشت، نشان داده شد که اثر اختلال‌گر حتی در نزدیکی مقصد، نمی‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر سیگنال دریافتی مقصد بگذارد مگر این که اختلال‌گر از توان‌های بسیار بالا استفاده کند. همچنین در حالتی که اختلال‌گر دارای N_r بزرگ باشد اثر مخرب کمی بر سیگنال دریافتی دارد، زیرا واسطه‌ها می‌توانند با تعیین ضریب شکل‌دهی پرتو مناسب باعث کاهش اثر توان سیگنال مخرب دریافتی خود باشند و در نتیجه کیفیت سیگنال دریافتی در مقصد را بسیار بهبود ببخشند. به‌عبارت دیگر می‌توان گفت که وجود اختلال‌گر در نزدیکی واسطه‌ها، موقعیت مناسبی برای ایجاد اختلال بر سیگنال دریافتی نیست و تأثیر واسطه‌ها بیشتر است.

به طور کلی می‌توان گفت استفاده از واسط همچنان که باعث بهبود کیفیت سیگنال می‌شود، در شبکه‌هایی که تحت تأثیر جمینگ قرار دارند، به خاطر چندگانگی ایجاد شده کیفیت سیگنال در سطح مطلوبی باقی می‌ماند.

۶. مراجع

[1] Liu, K. J. R.; Sadek, A. K.; Su, A. K. W. “Cooperative Communications and Networking”; Cambridge Univ. Press، 2009.

[2] Graham, A. “Communications, Radar and Electronic Warfare”; John Wiley & Sons, 2011.

[3] Poisel, R. “Modern Communications Jamming Principles and Techniques”; Artech House, 2011.

[4] Murlidhar, J. “Relay Network under Broad Band Jamming”; Wichta State Univ., American, 2010.

[5] Ibdah, Y.; Kwon, H. M.; Lee, K.; Wang, Z.; Bi, Y.; Jo, M. “Broadband Jamming and Channel Uncertainty for Noncooperative Wireless Relay Networks under Received Power Constraint”; In IEEE AMS 2011, Manila, Philippines, 2011.

[6] Chen, J.; Zhang, R.; Song, L.; Han, Z.; Jiao, B. “Joint Relay and Jammer Selection for Secure Two-Way Relay Networks”; In ICC Communications, Kyoto, 2011.

[7] Jing, Y.; Jafarkhani, H. “Network Beamforming Using Relays with Perfect Channel Information”; IEEE Trans. Inf. Theory 2009, 55, 2499–2517.

[8] Havary-Nassab, V.; Shahbazpanahi, S.; Grami, A.; Luo, Z. Q. “Distributed Beamforming for Relay Networks Based on Second-Order Statistics of the Channel State Information”; IEEE Trans. Signal Proc. 2008, 56, 4306–4316.

[9] Cheraghi, M.; Akhlaghi, S. “Quality of Service Assurance in Multi-Antenna Relay Assisted Networks”; IET Communications 2012, 6, 565 - 575.

[10] Fazeli-Dehkordy, S.; Shahbazpanahi, S.; Gazor, S. “Multiple Peer-to-Peer Communications Using a Network of Relays”; IEEE Trans. Signal Proc. 2009, 57, 3053–3062.

[11] Goldsmith, A. “Wireless Communications”; Cambridge Univ. Press., 2005.

[12] Sibille, A.; Oestges, C.; Zanella, A. “MIMO: From Theory to Implementation”; Elsevier Inc, 2010.

[13] Shahbazpanahi, S.; Gershman, A. B.; Luo, Z.; Wong, K. “Robust Adaptive Beamforming for General-Rank Signal Models”; IEEE Trans. on Signal Proc. 2003,51.