

# الگوریتم پرتودهی جدید برای شبکه‌های همیار با رله دیکد و ارسال چندآنتنه

محمد محمدی امیری و علی الفت

در سیستم‌های همیار دو-پرشه<sup>۷</sup> در فاز اول رله به عنوان گیرنده عمل کرده و در فاز دوم سیگنال دریافتی از منبع را به مقصد ارسال می‌کند. احتمال خطای بیت یک لینک AF کلی در [۲] بیان شده است. رله چندآنتنه موجب بهبود عملکرد سیستم می‌شود. اگر اطلاعات کانال رله به مقصد در رله چندآنتنه موجود باشد، با استفاده از روش پرتودهی<sup>۸</sup> می‌توان مرتبه دایورسیتی را افزایش داد [۳] و [۴]. در [۵] یک مسأله پرتودهی کلی با قیود مختلف روی توان رله AF بررسی گردیده است و ضرایب پرتودهی تعیین شده‌اند. سیستم‌های MIMO<sup>۹</sup> با رله یک روش مؤثر جهت افزایش مرتبه دایورسیتی و مبارزه با اثر محوشدگی است [۶]. اگر رله از کانال مقابل خود اطلاعی نداشته باشد، استفاده از کدهای زمان-فضایی<sup>۱۰</sup> روش مؤثری برای بهبود عملکرد سیستم است [۷] و [۸].

انتشار خطا به دلیل آشکارسازی اشتباه سملها در رله، مهم‌ترین اشکال سیستم‌های همیار DF است [۹]. در [۱۰] یک شبکه همیار دو-پرشه با رله DF بررسی گردیده است و یک آشکارساز در مقصد جهت ترکیب سیگنال‌های ارسالی از منبع و رله پیشنهاد شده است. آشکارساز برای رله تک‌آنتنه و DF در [۱۱] و [۱۲] بررسی گردیده است. در سیستم‌های همیار با چندین رله، انتخاب رله یک روش مؤثر برای مبارزه با انتشار خطا<sup>۱۱</sup> است [۱۳].

در این مقاله به بررسی یک سیستم DF با یک رله چندآنتنه می‌پردازیم و برای بهبود عملکرد سیستم از روش پرتودهی در رله استفاده می‌کنیم. چون رله دارای چندین آنتن می‌باشد، به دلیل تنوع در دریافت سیگنال از چند مسیر توسط رله، احتمال تصمیم‌گیری اشتباه در رله در حد پایینی نگه داشته می‌شود و در اینجا انتشار خطا مسأله عمده‌ای نیست. بنابراین روی فاز دوم ارسال یعنی زمانی که رله سیگنال دریافتی خود را به سمت گیرنده ارسال می‌کند متمرکز می‌شویم. برای پرتودهی پیشنهادی، فرض می‌کنیم دو بیت اطلاعات فاز تمامی لینک‌های بین رله و مقصد در رله موجود است. نشان داده می‌شود که پرتودهی پیشنهادی باعث می‌گردد که سیستم به مرتبه کاملی از دایورسیتی دست یابد.

ادامه مقاله به صورت مقابل سازمان‌دهی می‌شود: در بخش ۲ مدل سیستم شبکه همیار مورد بررسی ارائه می‌گردد. در بخش ۳ روش‌های پرتودهی در رله بیان می‌گردند. در بخش ۴ به آنالیز عملکرد احتمال خطای بیت سیستم و مرتبه دایورسیتی بر اساس روش‌های پیشنهادی می‌پردازیم. نتایج عددی و شبیه‌سازی در بخش ۵ آورده می‌شود و نهایتاً در بخش ۶ نتیجه‌گیری بیان خواهد شد.

در این مقاله نمادهای مقابل به کار گرفته می‌شوند: (\*) نشان‌دهنده

چکیده: در این مقاله یک شبکه همیار که شامل یک منبع، یک رله و یک مقصد می‌باشد، بررسی می‌شود. منبع و مقصد سیستم‌های تک‌آنتنه هستند ولی رله مجهز به یک سیستم  $N$ -آنتنه می‌باشد و در حالت دیکد و ارسال (DF) عمل می‌کند. با فرض فاصله زیاد بین منبع و مقصد، از مسیر مسقیم بین آن دو صرف نظر می‌کنیم. رله با استفاده از روش‌های پرتودهی پیشنهاد شده سیگنال را به سمت مقصد ارسال می‌کند. این پرتودهی‌ها با فرض آگاهی رله از دو بیت اطلاعات کوانتیزه شده راجع به فاز تمامی لینک‌های بین رله و مقصد انجام می‌گیرد. یک حد بالا برای احتمال خطای بیت سیستم محاسبه خواهد شد و نشان داده می‌شود که الگوریتم پیشنهادی به مرتبه دایورسیتی کامل دست می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که احتمال خطای بیت الگوریتم پیشنهادی بهتر از چندین الگوریتم شناخته شده است و نیز عملکردی نزدیک به سیستم‌هایی با فرض‌های ایده‌آل دارد.

کلیدواژه: پرتودهی، دایورسیتی، رله دیکد و ارسال، شبکه همیار.

## ۱- مقدمه

در مخابرات بی‌سیم، محوشدگی<sup>۱</sup> چندمسیره مؤثرترین عامل در افت عملکرد سیستم است. تکنیک‌های دایورسیتی<sup>۲</sup> روش‌های مؤثری جهت مبارزه با محوشدگی هستند. دایورسیتی زمانی و فرکانسی دو نوع دایورسیتی هستند که عملکرد سیستم را به ترتیب با هزینه نرخ و پهنای باند بهبود می‌بخشند. دایورسیتی فضایی نوع بسیار جذابی از دایورسیتی است که بدون هزینه نرخ و پهنای باند با استفاده از آنتن‌های چندگانه در منبع یا مقصد و با هزینه افزایش پیچیدگی سیستم، عملکرد را بهبود می‌بخشد.

دایورسیتی همیار<sup>۳</sup> تکنیک جدیدی است که رله در ارسال سیگنال به مقصد، منبع را یاری می‌کند. رله‌ها در حالات تقویت و ارسال<sup>۴</sup> (AF) و دیکد و ارسال<sup>۵</sup> (DF) می‌توانند عمل کنند. در حالت AF، رله، سیگنال دریافتی از منبع را تقویت و سپس به مقصد ارسال می‌کند. در این حالت نویز<sup>۶</sup> نیز به همراه سیگنال تقویت می‌شود. در حالی که در حالت DF، رله، سیگنال دریافتی از منبع را دیکد کرده و به مقصد ارسال می‌کند [۱].

این مقاله در تاریخ ۲۴ فروردین ماه ۱۳۹۳ دریافت و در تاریخ ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ بازنگری شد.

محمد محمدی امیری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، (email: m.mohammadiamiri@ece.ut.ac.ir).  
علی الفت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، (email: aolfat@ut.ac.ir).

1. Fading
2. Diversity
3. Cooperative
4. Amplify and Forward
5. Decode and Forward
6. Noise

7. Half-Duplex
8. Beamforming
9. Multi-Input Multi-Output
10. Space-Time
11. Error Propagation

$$\tilde{h}_{rd} \triangleq \sum_{i=1}^N \alpha_i e^{j\beta_i} h_{r_i d} \quad (4)$$

که در آن  $\hat{x}$  سمبل آشکارشده در رله و  $P_r$  توان رله است. فرض می‌کنیم  $h_{r_i d}$  برای  $1 \leq i \leq N$  متغیرهای تصادفی مستقل با توزیع مشابه  $CN(0, \sigma_{rd}^2)$  هستند.

نسبت سیگنال به نویز  $(SNR)^r$  لحظه‌ای برای لینک‌های S-R و R-D به ترتیب برابر است با

$$\tilde{\gamma}_{sr} = \gamma_s \sum_{i=1}^N |h_{sr_i}|^2 \quad (5)$$

$$\tilde{\gamma}_{rd} = \gamma_r |\tilde{h}_{rd}|^2 \quad (6)$$

که  $\gamma_r \triangleq P_r/N$  و  $\gamma_s \triangleq P_s/N$  است. همچنین تعریف می‌کنیم

$$\bar{\gamma}_{sr} \triangleq \gamma_s \sigma_{sr}^2 \quad (7)$$

$$\bar{\gamma}_{rd} \triangleq \gamma_r \sigma_{rd}^2 \quad (8)$$

$$K_r \triangleq \frac{\gamma_r}{\gamma_s} \quad (9)$$

گیرنده نیز از آشکارساز ML استفاده می‌کند.

### ۳- الگوریتم‌های پرتودهی پیشنهادی

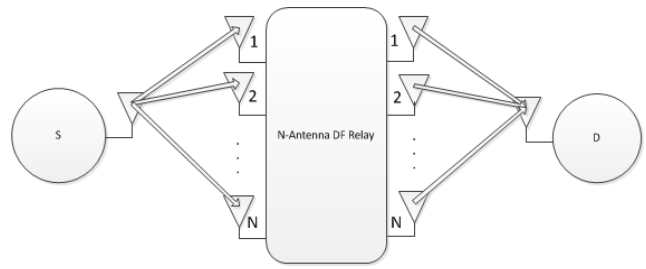
در این قسمت، دو روش پرتودهی برای ارسال سمبل آشکارشده توسط رله به مقصد ارائه خواهد شد. فرض می‌شود که دو بیت اطلاعات کوانتیزه شده<sup>۵</sup> راجع به فاز تمامی لینک‌ها از رله به مقصد در رله موجود است. فرض می‌کنیم  $i$  امین آنتن رله سمبل آشکارشده را در  $\alpha_i e^{j\beta_i}$  ضرب می‌کند و برای هر دو روش پرتودهی پیشنهادی،  $\beta_i$  به صورت زیر تعیین می‌گردد

$$\beta_i = -\frac{\pi}{2} \left\lfloor \frac{\angle h_{r_i d}}{\pi/2} \right\rfloor \quad (10)$$

که  $\angle h_{r_i d}$  بیانگر فاز کانال بین  $i$  امین آنتن رله و مقصد است و  $\lfloor z \rfloor$  برابر با کوچک‌ترین عدد صحیح نزدیک به  $z$  است. این روش پرتودهی، تمامی لینک‌های بین رله و مقصد را طوری می‌چرخاند که همه آنها در مقصد در ربع مشابهی از دستگاه مختصات کارترین قرار گیرند. این روش اثر مؤثری روی حاصل جمع برداری لینک‌های دریافتی در گیرنده دارد و کانال معادل مسیر رله به گیرنده، دارای دامنه‌ای بیش از دامنه هر یک از لینک‌های بین رله و گیرنده خواهد بود که این امر موجب بهبود عملکرد سیستم از نظر احتمال خطای بیت می‌گردد.

#### ۳-۱ پرتودهی یکنواخت (UB)

در روش پرتودهی یکنواخت (UB)<sup>۶</sup> رله بدون در نظر گرفتن کیفیت کانال بین هر آنتن و گیرنده، توان را به صورت یکنواخت به آنتن‌های خود اختصاص می‌دهد و در نتیجه، دامنه ضرایب پرتودهی برابر هستند با  $\alpha_i = 1/\sqrt{N}$ . در این روش، رله نیازی به اطلاع از دامنه لینک‌های مقابل خود ندارد.



شکل ۱: یک شبکه همیار با یک منبع تک‌آنتنه و یک رله DF  $N$ -آنتنه و یک مقصد تک‌آنتنه.

مزدوج<sup>۱</sup> می‌باشد.  $CN(0, \sigma^2)$  جهت نشان‌دادن توزیع مختلط نرمال متقارن حلقوی با میانگین صفر و واریانس  $\sigma^2$  است. کانال‌های بین منبع به رله و رله به مقصد را به ترتیب با نمادهای S-R و R-D نشان می‌دهیم.  $s$  بیانگر منبع،  $r_i$  بیانگر  $i$  امین آنتن رله و  $d$  نشان‌دهنده مقصد می‌باشند.

### ۲- مدل سیستم

سیستمی که بررسی می‌کنیم شامل یک فرستنده تک‌آنتنه در منبع، یک رله چندآنتنه و یک گیرنده تک‌آنتنه در مقصد است که در شکل ۱ نشان داده شده است. رله در حالت DF عمل می‌کند و اطلاعات کانال S-R در رله موجود است. همچنین مقصد از اطلاعات کانال R-D آگاه است. به دلیل فاصله زیاد بین منبع و مقصد، فرض می‌شود مسیر مستقیم بین منبع و مقصد وجود ندارد. ضریب کانال بین گره‌های  $i \in \{s, r_k\}$  و  $j \in \{r_k, d\}$  با  $h_{ij}$  نمایش داده می‌شود که یک متغیر تصادفی مختلط گاوسی با میانگین صفر و واریانس  $\sigma_{ij}^2$  در نظر گرفته می‌شود. نویز گاوسی سفید جمع‌شونده در گره  $m \in \{r_k, d\}$  که با  $n_m$  نمایش داده می‌شود نیز دارای میانگین صفر و واریانس  $N$  است. در فاز اول ارسال، منبع داده خود را برای رله ارسال می‌کند. سیگنال دریافتی در  $i$  امین آنتن رله برابر است با

$$y_{sr_i} = \sqrt{P_s} h_{sr_i} x + n_{r_i}, \quad 1 \leq i \leq N \quad (1)$$

که  $P_s$  توان منبع و  $x \in \{+1, -1\}$  سمبل ارسالی برای مدولاسیون BPSK<sup>۲</sup> است. فرض می‌شود  $h_{sr_i}$  برای  $1 \leq i \leq N$  متغیرهای تصادفی مستقل با توزیع مشابه  $CN(0, \sigma_{sr}^2)$  هستند. آشکارساز ML<sup>۳</sup> در رله جهت آشکارکردن سمبل ارسالی استفاده می‌شود

$$\hat{x} = \arg \max_{x \in X} \operatorname{Re} \left\{ \sum_{i=1}^N y_{sr_i} h_{sr_i}^* x \right\} \quad (2)$$

که برای مدولاسیون BPSK داریم  $X = \{+1, -1\}$ . در فاز دوم، رله با استفاده از روش پرتودهی، سمبل آشکارشده را به سمت مقصد ارسال می‌کند. برای پرتودهی،  $i$  امین آنتن رله سمبل آشکارشده را در  $\alpha_i e^{j\beta_i}$  ضرب می‌کند. بنابراین سیگنال دریافتی به منبع با استفاده از پرتودهی برابر است با

$$y_{rd} = \sqrt{P_r} \tilde{h}_{rd} \hat{x} + n_{rd} \quad (3)$$

که

4. Signal-to-Noise Ratio  
5. Quantized  
6. Uniform Beamforming

1. Conjugate  
2. Binary Phase Shift Kaying  
3. Maximum Likelihood

### ۲-۳ پرتودهی وقتی (AB)

در روش پرتودهی وقتی (AB) فرض می‌کنیم رله دامنه تمامی لینک‌ها از رله به مقصد را می‌داند و توان اختصاص یافته به هر آنتن متناسب با کیفیت کانال آن می‌باشد. بنابراین، دامنه ضرایب پرتودهی برابر هستند با

$$\alpha_i = \frac{|h_{rd}|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |h_{rd}|^2}} \quad (11)$$

طبق (۴) و (۶) می‌دانیم که مقدار  $\tilde{\gamma}_{rd}$  بستگی به نوع پرتودهی دارد. پس مقدار  $P_r(e)$  را برای هر یک از الگوریتم‌های پرتودهی تعیین می‌کنیم.

### ۴-۱ آنالیز احتمال خطای بیت برای پرتودهی یکنواخت

مقدار  $\tilde{\gamma}_{rd}$  برای این روش برابر می‌گردد با

$$\tilde{\gamma}_{rd} = \frac{\gamma_r}{N} \left| \sum_{i=1}^N e^{j\beta_i} h_{rd} \right|^2 \quad (17)$$

با توجه به این که  $e^{j\beta_i} h_{rd}$  برای  $1 \leq i \leq N$  در یک ربع مختصاتی هستند، نامساوی زیر طبق رابطه کسینوس‌ها برقرار است

$$\left| \sum_{i=1}^N e^{j\beta_i} h_{rd} \right|^2 \geq \sum_{i=1}^N |h_{rd}|^2 \quad (18)$$

بنابراین نامساوی زیر نتیجه می‌شود

$$\tilde{\gamma}_{rd} \geq \frac{\gamma_r}{N} \sum_{i=1}^N |h_{rd}|^2 \triangleq \hat{\gamma}_{rd} \quad (19)$$

با توجه به تعریف انجام شده در (۱۹)، تابع چگالی احتمال  $\tilde{\gamma}_{rd}$  برابر است با

$$f_{\tilde{\gamma}_{rd}}(y) = \frac{N^N}{(N-1)! (\tilde{\gamma}_{rd})^N} y^{N-1} e^{-\frac{Ny}{\tilde{\gamma}_{rd}}} U(y) \quad (20)$$

با استفاده از (۱۴) و (۲۰)، نامساوی زیر برای  $P_r(e)$  برقرار می‌شود

$$\begin{aligned} P_r(e) &\leq \frac{1}{2} E \{ e^{-\tilde{\gamma}_{rd}} \} \leq \frac{1}{2} E \{ e^{-\hat{\gamma}_{rd}} \} = \\ &\frac{1}{2} \int_0^\infty \frac{N^N y^{N-1} e^{-\frac{Ny}{\tilde{\gamma}_{rd}}}}{(N-1)! (\tilde{\gamma}_{rd})^N} e^{-y} dy = \\ &\frac{N^N}{2(N-1)! (\tilde{\gamma}_{rd})^N} \int_0^\infty y^{N-1} e^{-(1+\frac{N}{\tilde{\gamma}_{rd}})y} dy = \\ &\frac{N^N}{2(N-1)! (\tilde{\gamma}_{rd})^N} \times \frac{(N-1)!}{(1+\frac{N}{\tilde{\gamma}_{rd}})^N} = \frac{0.5}{(\frac{\tilde{\gamma}_{rd}}{N} + 1)^N} \end{aligned} \quad (21)$$

### ۴-۲ آنالیز احتمال خطای بیت برای پرتودهی وقتی

با توجه به مقدار  $\alpha_i$  در این روش (معادله (۱۱))،  $\tilde{\gamma}_{rd}$  برابر می‌گردد با

$$\tilde{\gamma}_{rd} = \frac{\gamma_r}{\sum_{i=1}^N |h_{rd}|^2} \left| \sum_{i=1}^N |h_{rd}| e^{j\beta_i} h_{rd} \right|^2 \quad (22)$$

مانند روش قبل، از این که  $e^{j\beta_i} h_{rd}$  برای  $1 \leq i \leq N$  در یک ربع مختصاتی قرار دارند، نامساوی زیر منتج می‌شود

$$\tilde{\gamma}_{rd} \geq \frac{\gamma_r}{\sum_{i=1}^N |h_{rd}|^2} \sum_{i=1}^N |h_{rd}|^2 \quad (23)$$

نامساوی زیر برای  $a_n \in \mathbb{R}$  برقرار است

$$\left( \sum_{n=1}^N a_n \right)^2 \leq N \sum_{n=1}^N a_n^2 \quad (24)$$

با جایگزینی  $|h_{rd}|^2$  به جای  $a_n$  در (۲۴) و استفاده از (۲۳)، می‌توان به نامساوی زیر دست یافت

### ۴- آنالیز احتمال خطای بیت و دایورسیتی

در این بخش یک حد بالا برای عملکرد احتمال خطای بیت سیستم با مدولاسیون BPSK به دست می‌آوریم و مرتبه دایورسیتی را برای الگوریتم‌های پرتودهی پیشنهادی محاسبه می‌کنیم. متوسط احتمال خطای بیت در فاز اول و دوم ارسال را به ترتیب با  $P_1(e)$  و  $P_2(e)$  نمایش می‌دهیم.

متوسط احتمال خطای بیت کل سیستم برابر است با

$$\begin{aligned} P(e) &= (1 - P_1(e))P_2(e) + P_1(e)(1 - P_2(e)) = \\ &P_1(e) + P_2(e) - 2P_1(e)P_2(e) \leq P_1(e) + P_2(e) \end{aligned} \quad (12)$$

در ادامه به آنالیز عملکرد احتمال خطا برای دو روش پرتودهی پیشنهادی می‌پردازیم. متوسط احتمال خطای بیت در فاز اول برای مدولاسیون BPSK برابر است با

$$P_1(e) = E \{ Q(\sqrt{2\tilde{\gamma}_{sr}}) \} \leq \frac{1}{2} E \{ e^{-\tilde{\gamma}_{sr}} \} \quad (13)$$

که  $Q(y) \triangleq \int_y^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} du$  و نامساوی موجود در (۱۳) به این دلیل است که برای  $y \geq 0$  نامساوی مقابل را داریم  $Q(y) \leq \frac{1}{2} e^{-y^2/2}$ . به طریق مشابه، متوسط احتمال خطای بیت در فاز دوم ارسال برای مدولاسیون BPSK نیز برابر است با

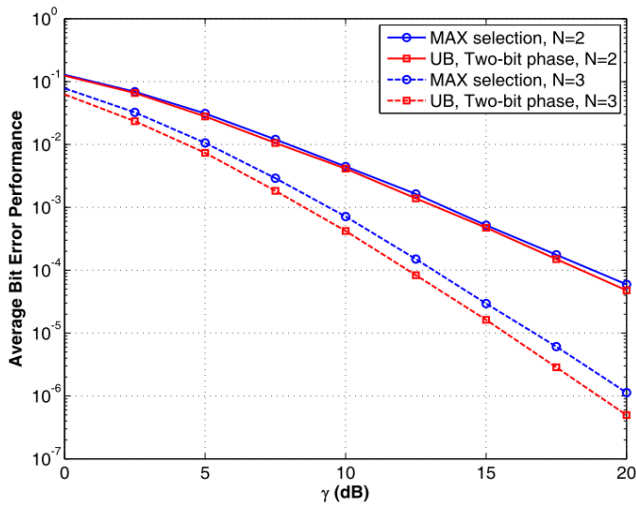
$$P_2(e) = E \{ Q(\sqrt{2\tilde{\gamma}_{rd}}) \} \leq \frac{1}{2} E \{ e^{-\tilde{\gamma}_{rd}} \} \quad (14)$$

و مقدار  $\tilde{\gamma}_{sr}$  مستقل از نوع پرتودهی می‌باشد و بنابراین بدون در نظر گرفتن نوع پرتودهی، می‌توان یک حد بالا برای  $P_1(e)$  بر اساس (۱۳) تعیین نمود. با توجه (۵)، تابع چگالی احتمال  $\tilde{\gamma}_{sr}$  به صورت زیر تعیین می‌گردد [۱۴]

$$f_{\tilde{\gamma}_{sr}}(y) = \frac{1}{(N-1)! (\tilde{\gamma}_{sr})^N} y^{N-1} e^{-\frac{y}{\tilde{\gamma}_{sr}}} U(y) \quad (15)$$

با استفاده از (۱۳) و (۱۵)، حد بالای زیر برای  $P_1(e)$  به دست می‌آید

$$\begin{aligned} P_1(e) &\leq \frac{1}{2} E \{ e^{-\tilde{\gamma}_{sr}} \} = \frac{1}{2} \int_0^\infty \frac{y^{N-1} e^{-\frac{y}{\tilde{\gamma}_{sr}}}}{(N-1)! (\tilde{\gamma}_{sr})^N} e^{-y} dy = \\ &\frac{1}{2(N-1)! (\tilde{\gamma}_{sr})^N} \int_0^\infty y^{N-1} e^{-(1+\frac{1}{\tilde{\gamma}_{sr}})y} dy = \\ &\frac{1}{2(N-1)! (\tilde{\gamma}_{sr})^N} \times \frac{(N-1)!}{(1+\frac{1}{\tilde{\gamma}_{sr}})^N} = \frac{0.5}{(\frac{\tilde{\gamma}_{sr}}{N} + 1)^N} \end{aligned} \quad (16)$$



شکل ۴: مقایسه متوسط احتمال خطای بیت برای روش پرتودهی UB پیشنهادی با دو بیت اطلاعات از فاز لینک‌های بین رله و مقصد در رله و روش انتخاب ماکسیمم برای مدولاسیون BPSK.

روابط (۲۷) و (۲۸) نشان می‌دهند که  $P_r(e)$  و  $P_r(e)$  حداقل دارای مرتبه دایورسیتی  $N$  هستند. با توجه به (۱۲) نتیجه می‌شود  $P(e)$  نیز حداقل دایورسیتی از مرتبه  $N$  را داراست. از آنجایی که حداکثر دایورسیتی این سیستم از مرتبه  $N$  است، بنابراین  $P(e)$  دارای دایورسیتی از مرتبه  $N$  می‌باشد.

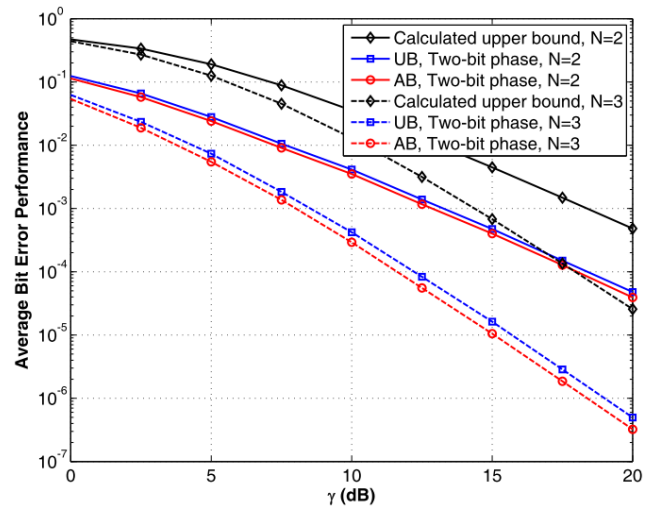
## ۵- نتایج عددی و شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج تئوری را با نتایج شبیه‌سازی شده مقایسه می‌کنیم و همچنین روش‌های پیشنهادی با سناریوهای شناخته‌شده قیاس می‌شوند. شبیه‌سازی‌ها برای  $P_s = P_r$  انجام می‌شوند و بنابراین  $\gamma_s = \gamma_r \triangleq \gamma$  را در نظر می‌گیریم و همچنین فرض می‌شود  $\sigma_{sr}^2 = \sigma_{rd}^2 = 1$  باشد. در شبیه‌سازی‌ها، مقدار متوسط احتمال خطای بیت بر حسب  $\gamma$  برای مدولاسیون BPSK رسم شده‌اند و باید متذکر شویم وقتی رله فاز دقیق لینک‌های مقابل خود را داشته باشد،  $i$  امین آنتن رله سمبل ارسالی خود را در  $\alpha_i e^{-j\angle h_{rd}}$  ضرب می‌کند.

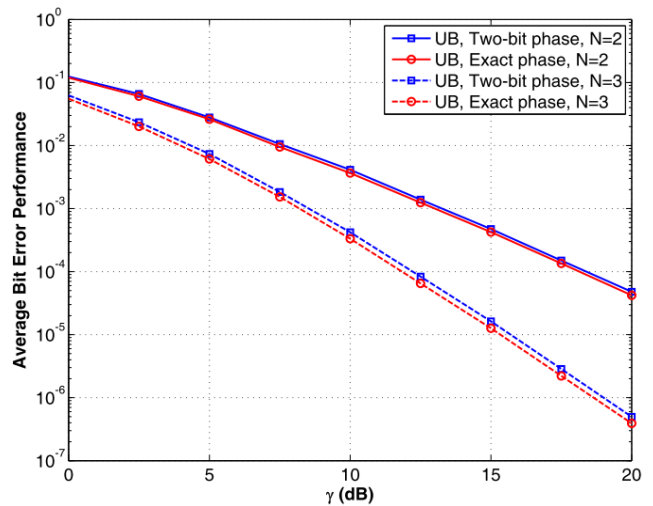
در شکل ۲ حدود بالای محاسبه‌شده در (۱۶) و (۲۱) بر اساس رابطه تساوی در (۱۲) برای  $N = 2, 3$  رسم شده‌اند. همچنین الگوریتم‌های پرتودهی پیشنهادی برای روش پرتودهی یکنواخت (UB) و روش پرتودهی وقتی (AB) با وجود دو بیت اطلاعات کوانتیزه‌شده راجع به فاز لینک‌های بین رله و مقصد در رله برای  $N = 2, 3$  رسم و مقایسه شده‌اند. همان طور که انتظار داشتیم، روش AB عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد و هرچه تعداد آنتن‌های رله بیشتر گردد، این بهبود عملکرد نیز افزایش می‌یابد.

در شکل ۳ الگوریتم پرتودهی پیشنهادی برای روش پرتودهی یکنواخت (UB) با وجود دو بیت اطلاعات کوانتیزه‌شده راجع به فاز لینک‌های بین رله و مقصد در رله و نیز وجود فاز دقیق لینک‌های ذکر شده در رله برای  $N = 2, 3$  رسم و مقایسه شده‌اند. همان طور که دیده می‌شود عملکرد سیستم برای وجود دو بیت اطلاع از فاز با حالت اطلاع دقیق از فاز چندان تفاوتی ندارد که نشان می‌دهد به جای اطلاع دقیق از فاز، در این سناریو کافی است رله دو بیت اطلاعات از فاز لینک‌های مقابل خود داشته باشد.

در شکل ۴ روش پرتودهی UB با دو بیت اطلاعات از فاز لینک‌های R-D در رله برای  $N = 2, 3$  را با روش انتخاب ماکسیمم مقایسه



شکل ۵: مقایسه متوسط احتمال خطای بیت برای روش‌های پرتودهی UB و AB پیشنهادی با وجود دو بیت اطلاعات از فاز لینک‌های بین رله و مقصد در رله و حد بالای تئوری محاسبه‌شده برای مدولاسیون BPSK.



شکل ۶: مقایسه متوسط احتمال خطای بیت برای روش پرتودهی UB پیشنهادی با اطلاعات دوبیتی و دقیق از فاز لینک‌های رله به مقصد در رله با مدولاسیون BPSK.

$$\tilde{\gamma}_{rd} \geq \frac{\gamma_r}{N} \sum_{i=1}^N |h_{rd}|^2 = \hat{\gamma}_{rd} \quad (25)$$

رابطه بالا شبیه به نامساوی تعیین‌شده در (۱۹) می‌باشد. ادامه روند اثبات، شبیه به روش پرتودهی یکنواخت است و بنابراین برای روش پرتودهی وقتی نیز حد بالای  $P_r(e)$  دقیقاً مانند حد بالای محاسبه‌شده در (۲۱) به دست می‌آید.

در ادامه به تعیین مرتبه دایورسیتی می‌پردازیم. مرتبه دایورسیتی به صورت زیر تعریف می‌گردد

$$d \triangleq \lim_{\gamma_s \rightarrow \infty} - \frac{\log P(e)}{\log \gamma_s} \quad (26)$$

برای اثبات دستیابی به دایورسیتی کامل، کافی است نشان دهیم  $P_r(e)$  و  $P_r(e)$  به دایورسیتی کامل می‌رسند. با انجام برخی محاسبات ریاضی و استفاده از تعریف (۹) می‌توان به نامساوی‌های زیر دست یافت

$$\lim_{\gamma_s \rightarrow \infty} P_r(e) \leq \frac{0.5}{\sigma_{sr}^2 \gamma_s^N} \quad (27)$$

$$\lim_{\gamma_s \rightarrow \infty} P_r(e) \leq 0.5 \left( \frac{N}{K_r \sigma_{rd}^2} \right)^N \frac{1}{\gamma_s^N} \quad (28)$$

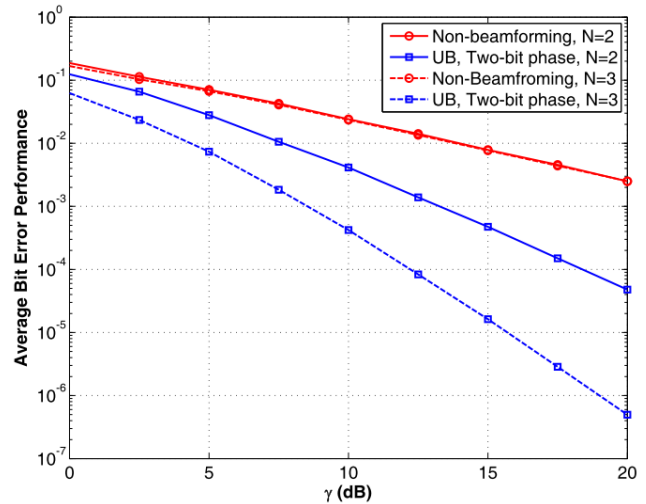
در شکل ۶ متوسط احتمال خطای بیت برای حالتی رسم شده است که فرض می‌کنیم رله سمبل‌های دریافتی در فاز اول را به درستی دیکد می‌کند که فرضی ایده‌آل است. سپس در فاز دوم مانند روش UB با داشتن دو بیت اطلاعات کوانتیزه‌شده از فاز لینک‌های مقابل خود، از پرتودهی پیشنهادی استفاده می‌کند. همان طور که می‌دانیم این سناریو برای سیستم ما یک سناریوی ایده‌آل می‌باشد و ما نمی‌توانیم عملکردی بهتر از آن داشته باشیم. در این شکل، عملکرد این سیستم با الگوریتم پیشنهادی UB که رله دو بیت اطلاعات از فاز لینک‌های مقابل خود را دارد مقایسه شده است. در شکل دیده می‌شود که الگوریتم پیشنهادی ما نزدیک به سناریوی ایده‌آل ذکر شده است و اختلاف کمتر از ۰٫۵ dB می‌باشد که این میزان اختلاف با افزایش تعداد آنتن‌ها کمتر نیز می‌گردد.

### ۶- نتیجه‌گیری

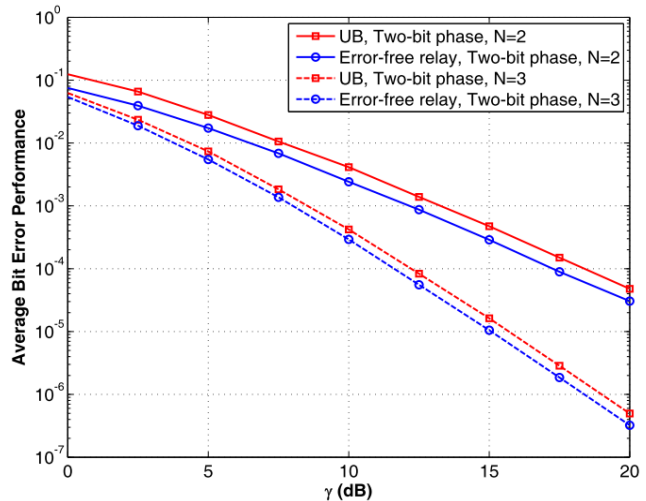
در این مقاله به بررسی یک شبکه همیار با یک منبع و یک رله DF دو-پرشه و یک مقصد بدون در نظر گرفتن مسیر مستقیم بین منبع و مقصد پرداختیم که منبع و مقصد سیستم‌هایی تک‌آنتنه و رله مجهز به چندین آنتن بود. با این فرض که رله دو بیت اطلاعات از فاز تمامی لینک‌های بین رله و مقصد دارد، دو روش را برای پرتودهی در رله پیشنهاد دادیم. سپس با محاسبه یک حد بالا برای عملکرد احتمال خطای بیت سیستم برای مدولاسیون BPSK نشان دادیم که سناریوهای پیشنهادی به مرتبه کاملی از دایورسیتی (مرتبه  $N$ ) دست می‌یابند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که دو بیت اطلاعات در رله راجع به فاز لینک‌های R-D برای این سناریو کافی است و عملکرد سیستم بهتر از چندین سناریوی شناخته‌شده و نزدیک به سناریوهای با فرضیات ایده‌آل می‌باشد.

### مراجع

- [1] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornel, "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [2] A. Ribeiro, X. Cai, and G. B. Giannakis, "Symbol error probabilities for general cooperative links," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, no. 3, pp. 1264-1273, May 2005.
- [3] Y. Jing and H. Jafarkhani, "Network beamforming using relays with perfect channel information," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 55, no. 6, pp. 2499-2517, Jun. 2009.
- [4] V. Havary-Nassab, S. Shahbazpanahi, A. Grami, and Z. Q. Luo, "Distributed beamforming for relay networks based on second-order statistics of the channel state information," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 56, no. 9, pp. 4306-4316, Sep. 2008.
- [5] Y. W. Liang and R. Schober, "Cooperative amplify-and-forward beamforming with multiple multi-antenna relays," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 9, pp. 2605-2615, Sep. 2011.
- [6] A. Bansal, M. R. Bhatnagar, A. Hjørungnes, and Z. Han, "Low-complexity decoding in DF MIMO relaying system," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 62, no. 3, pp. 1123-1137, Mar. 2013.
- [7] T. Q. Duong, H. A. Suraweera, T. A. Tsiftsis, H. Zepernick, and A. Nallanathan, "Keyhole effect in dual-hop MIMO AF relay transmission with space-time block codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 6, no. 12, pp. 3683-3693, Dec. 2012.
- [8] X. Jin, J. S. No, and D. J. Shin, "Relay selection for decode-and-forward cooperative network with multiple antennas," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 12, pp. 4068-4079, Dec. 2011.
- [9] T. Wang, A. Cano, and G. B. Giannakis, "Smart regenerative relays for link-adaptive cooperative communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 56, no. 11, pp. 1950-1960, Nov. 2008.
- [10] T. Wang, A. Cano, G. B. Giannakis, and J. N. Laneman, "High-performance cooperative demodulation with decode-and-forward relays," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 7, pp. 1427-1438, Jul. 2007.
- [11] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity, part I: system description," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 11, pp. 1927-1938, Nov. 2003.



شکل ۵: مقایسه متوسط احتمال خطای بیت برای روش پرتودهی UB پیشنهادی و وجود دو بیت اطلاعات از لینک‌های بین رله و مقصد در رله و سناریوی بدون استفاده از پرتودهی برای مدولاسیون BPSK.



شکل ۶: مقایسه متوسط احتمال خطای بیت برای روش پرتودهی UB پیشنهادی و روش رله بدون خطا با وجود دو بیت اطلاعات از لینک‌های بین رله و مقصد در رله برای مدولاسیون BPSK.

نموده‌ایم که در این روش، رله از SNR تمامی لینک‌های بین رله و مقصد اطلاع دارد و تمامی توان خود را به آنتنی که بیشترین SNR را تا مقصد دارد اختصاص می‌دهد. در واقع، رله فقط از مسیر با بیشترین SNR جهت ارسال سیگنال استفاده می‌کند. باید دقت نمود این روش برای مواردی که آنتن‌ها محدودیت توان حداکثر دارند مفید نمی‌باشد و ممکن است نتوان تمامی توان را به یک آنتن اختصاص داد. همچنین مشاهده می‌شود روش پیشنهادی UB که رله نیازی به دانستن SNR لینک‌های مقابل خود را ندارد و توان را به صورت مساوی بین آنتن‌ها تقسیم می‌کند، از روش انتخاب ماکسیمم عملکرد بهتری دارد و این بهبود عملکرد با افزایش آنتن‌ها، بیشتر نیز می‌شود.

در شکل ۵ روش پیشنهادی UB در حالتی که رله دو بیت اطلاعات کوانتیزه‌شده از فاز لینک‌های مقابل خود را دارد با حالتی که از پرتودهی در رله استفاده نشود و رله توان را به صورت یکنواخت بین آنتن‌ها تقسیم کند مقایسه شده است. همان طور که دیده می‌شود، اگر از پرتودهی استفاده نکنیم، افزایش تعداد آنتن‌های رله بهره‌ای ندارد و عملکرد سیستم را بهبود نمی‌بخشد و باعث افزایش دایورسیتی نمی‌گردد. بنابراین استفاده از پرتودهی تأثیر به‌سزایی در بهبود عملکرد سیستم دارد.

**محمد محمدی امیری** مدرک کارشناسی مهندسی برق را از دانشگاه علم و صنعت ایران و کاشناسی ارشد را در رشته مهندسی برق - مخابرات از دانشگاه تهران به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۳ دریافت نموده است. وی هم‌اکنون مشغول سپری نمودن دوره دکتری در دانشگاه امپریال کالج در انگلستان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: مخابرات همیار بی‌سیم و پردازش آماری سیگنال .

**علی الفت** در سال ۱۳۸۲ مدرک دکتری خود را در مهندسی برق از دانشگاه تهران دریافت کرد و از سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۴ به عنوان پژوهشگر ارشد در دانشگاه کینگز کالج لندن در انگلستان مشغول پژوهش گردید. دکتر الفت از سال ۱۳۸۴ در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران مشغول به فعالیت گردید و اینک دانشیار گروه مخابرات این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان مخابرات همیار، تئوری تخمین و آشکارسازی، پردازش آرایه ای و آماری و تئوری اطلاعات می‌باشد ..

- [12] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity, part II: implementation aspects and performance analysis," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 11, pp. 1939-1948, Nov. 2003.
- [13] F. A. Onat, Y. Fan, H. Yanikomeroglu, and H. V. Poor, "Threshold-based relay selection for detect-and-forward relaying in cooperative wireless networks," *EURASIP J. Wireless Commun Netw.*, vol. 2010, 9 pp., Apr. 2010.
- [14] A. Papoulis and S. U. Pillai, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, New York: McGraw-Hill, 4th Edition, 2001.