

## یک روش کدینگ و فقی با استفاده از اطلاعات حالت کانال منبع-رله و کدهای همینگ، برای مصالحه بین توان و احتمال خطا در شبکه های حسگر بی سیم

سمیرا نادری<sup>۱</sup>، زهرا زارعی<sup>۲</sup>، جواد حقیقت<sup>۳</sup>، محسن اسلامی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>کارشناسی ارشد برق مخابرات، دانشگاه صنعتی شیراز

<sup>۲</sup>دانشجوی دکتری مهندسی برق مخابرات، دانشگاه صنعتی شیراز

<sup>۳</sup>استادیار دانشکده برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، haghghat@sutech.ac.ir

<sup>۴</sup>استادیار دانشکده برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز

### چکیده

شبکه های حسگر بی سیم، در نسل پنجم مخابرات سلولی مورد توجه ویژه ای قرار گرفته اند. یکی از عمده ترین چالش ها در این شبکه ها، محدودیت منابع انرژی است که به طور مستقیم طول عمر شبکه حسگر را تحت تأثیر قرار می دهد. در این مقاله یک روش کدینگ و فقی برای شبکه های حسگر ارایه میشود. بر خلاف کارهای گذشته، که در آنها کانال بی سیم بصورت محو شونده بلوکی در نظر گرفته شده است، یعنی ضریب محو شونده گی در طول ارسال یک بلوک داده تغییر نمیکند، ما تغییرات آرام زمانی را که کانال در طول ارسال یک بلوک تجربه میکند در نظر میگیریم و به طراحی کدینگ و فقی برای چنین سیستمی میپردازیم. الگوریتم ارایه شده بر اساس کدگشایی توأم است و هدف آن رسیدن به احتمال خطایی پایینتر از سطح آستانه مجاز، با انتخاب یک کدینگ و فقی است که کمترین انرژی مصرفی را دارد. نتایج شبیه سازی با استفاده از کدهای همینگ نشان میدهد که روش و فقی پیشنهادی در کاهش توان مصرفی نسبت به روش غیر و فقی موفق عمل میکند.

### کلیدواژه

شبکه حسگر بی سیم، کانالهای فیدینگ همبسته، کدگذاری و فقی، کدگشایی توأم

### مقدمه

نجات در نواحی آسیب دیده به کار برد. از طرف دیگر این بدان معناست که قوانین و الگوریتم های شبکه های حسگر باید دارای توانایی خود سازماندهی باشند [7]. شبکه های حسگر که قابلیت استفاده در محیط هایی با شرایط خاص همچون زیر زمین، زیر آب و وسایل نقلیه را دارند، در زمینه هایی مانند بهداشت و صنعت کاربرد گسترده ای پیدا کرده اند [6-9]. طراحی این شبکه ها تحت تأثیر عواملی نظیر محدودیت های سخت افزاری، توان مصرفی، قابلیت اطمینان و شرایط محیطی است.

پیاده سازی این شبکه ها در عمل نیازمند مدلسازی آنها، اتخاذ قوانین و استفاده از الگوریتم های سازگار با طبیعت این شبکه ها و ساختار گره های آن می باشد. مدل CEO یکی از رایج ترین روشهای مدلسازی شبکه های حسگر بی سیم است [10]. اساس این مدل استفاده از همبستگی میان مشاهدات حسگرها جهت تخمین دنباله ای از داده هاست که کنترل کننده مرکزی، CEO، قادر به مشاهده مستقیم آنها نیست. در حقیقت این حسگرها نسخه های مستقل نویزی اطلاعات یک منبع را مشاهده کرده و پس از انجام پردازشهای لازم، آنها را از

شبکه های حسگر بی سیم یکی از مهمترین فن آوری های قرن 21 محسوب می شوند. اهمیت این شبکه ها به دلیل توانایی آنها در نظارت و کنترل دقیق مناطق دور افتاده و غیر قابل دسترسی است. پیشرفت های اخیر در فناوری ساخت مدارات مجتمع در اندازه های کوچک از یک سو و توسعه فناوری ارتباطات بی سیم از سوی دیگر زمینه ساز کاربرد روز افزون شبکه های حسگر بی سیم شده است [1-5]. این حسگرها دارای ابعاد بسیار کوچک بوده و از واحدهای "حس کردن"، "پردازش داده" و "ارسال و دریافت رادیویی" تشکیل شده اند [6]. یک شبکه حسگر از تعداد زیادی گره های حسگر که به طور متراکم درون پدیده و یا بسیار نزدیک به آن قرار داده می شوند، تشکیل شده است. مکان قرار دادن گره های حسگر نیاز به تعیین شدن از قبل ندارند. به همین دلیل می توان آنها را در مناطق غیر قابل دسترس و یا در عملیات امداد و

<sup>۱</sup>Wireless Sensor Networks (WSNs)

در شبکه های بی سیم به دلیل تغییرات مداوم محیطی انتظار می رود وضعیت کانال به طور پیوسته تغییر کند. بنابراین تحویل اطلاعات جمع آوری شده توسط شبکه به مقصد، حتی با بیشترین توان ارسالی، بدون استفاده از شیوه های تصحیح خطا دشوار و یا غیرممکن خواهد بود. در این شرایط دستیابی به نرخ خطای بیت پایین با کمترین میزان بیت اضافه با بکارگیری کدهای قوی مانند توربوکدها میسر خواهد بود [8]. اما استفاده از کدهای قوی نیاز به صرف انرژی پردازش بالا دارد که با هدف اولیه، یعنی کاهش انرژی، تا حدی در تناقض است. راه حل منطقی تر، بکارگیری یک الگوریتم وقتی تصحیح خطا است [19]. کدگذاری وقتی شبکه حسگر بی سیم از دو نظر اهمیت بسیاری دارد. اولاً به دلیل تغییر شرایط کانال بی سیم در اثر عوامل محیطی همواره نیاز به استفاده از قوی ترین کد در شبکه نیست. ثانیاً کاربردهایی که طراحی شبکه بر اساس آن صورت می گیرد، تا حدی توانایی تحمل خطا را دارند و نیاز به داشتن احتمال خطای صفر نیست. بنابراین استفاده از کدی که احتمال خطایی پایین تر از حد مجاز تعیین شده بوسیله سیستم داشته باشد کافیست. در [20] نتایج شبیه سازی نشان می دهد الگوریتم کدینگ وقتی بهتر از کدینگ ایستان (غیر وقتی) عمل می کند. طرح وقتی توأم کدگذاری و مدولاسیون یک شبکه دوفازی موضوع مورد بررسی در [21] می باشد. نتایج نشان می دهد این روش سبب افزایش بازدهی طیفی و کاهش ارسال مجدد داده به گیرنده می شود. حفاظت غیر یکسان از اطلاعات در مقابل خطا با استفاده از مدولاسیون وقتی در یک شبکه مشارکتی موضوع مورد بررسی در [22] است. این مقاله اطلاعات منبع را به دو دسته با میزان حفاظت مختلف تقسیم می کند. پس از آن پروتکل ارسالی وقتی در رله بر اساس دو حد آستانه عمل می کند. پس از دریافت سیگنال در فاز اول (سیگنال دریافتی از منبع)، رله نسبت سیگنال به نویز لحظه ای دریافتی را با دو حد آستانه مقایسه می کند و بر مبنای آن، در مورد چگونگی ارسال اطلاعات تصمیم گیری می کند. تحقیقات بر روی کاربرد رله در شبکه های حسگر بی سیم و نیز استفاده از کدهای تصحیح خطا و بررسی و بهبود بهره وری انرژی در این شبکه ها در سالهای اخیر هم ادامه پیدا کرده و نتایج آنها در مراجعی مانند [29-36] آرایه شده است.

در کارهای گذشته، کانال بی سیم متغیر با زمان بصورت محو شدگی بلوکی در نظر گرفته شده است، یعنی ضریب محو شدگی در طول ارسال یک بلوک از داده ها تغییر نمیکنند. یک فرض نزدیکتر به واقعیت، بخصوص در مخابرات امواج میلیمتری که از فرکانسهای 28GHZ-60GHZ استفاده میکنند [27-28]

طریق کانال های مستقل به سوی مقصد ارسال می کنند. با تغییر تعداد حسگرها، پدیده اندازه گیری شده با احتمال خطای متوسط دلخواه توسط CEO آشکار می شود [12-10]. بدین گونه که پس از دریافت داده ها در مقصد، مرکز ترکیب کننده از همبستگی اطلاعات دریافتی از تمامی حسگرها استفاده کرده، پیام منبع را کدگذاری می کند. کدگذاری پهنه را میتوان به صورت کدگذاری تعریف کرد که احتمال خطا در بازبازی اطلاعات منبع را کمینه کند.

یکی از مهم ترین چالش ها در شبکه های حسگر، استفاده پهنه از منابع انرژی موجود در شبکه است. معمولاً در چنین شبکه هایی با تمام شدن منابع انرژی یک گره، آن گره از چرخه کار شبکه حذف می شود و تعویض کردن منبع انرژی و استفاده مجدد از یک گره که منبع انرژی آن به پایان رسیده است، مقرون به صرفه یا در مواردی مقدور نیست. لذا با صرفه جویی در مصرف انرژی در هر گره می توان به طور قابل ملاحظه ای طول عمر آن را افزایش داد. شیوه های همکاری میان گره های حسگر که سبب ایجاد چند مسیرگی<sup>۲</sup> می گردد، از عمده ترین روش های کاهش توان ارسالی در شبکه حسگر می باشد [13-14]. ایده اصلی این روشها ارتباط و همکاری حسگرهای شبکه با یکدیگر و تشکیل یک سیستم چند آنتنه مجازی و بهره بردن از چندمسیرگی فضایی است. میزان توان مصرفی یک شبکه مشارکتی در مقایسه با شبکه غیر مشارکتی به ازای تراکم های متفاوتی از گره ها در [15-16] بررسی و نشان داده شده است که شبکه مشارکتی توان کمتری را مصرف می کند.

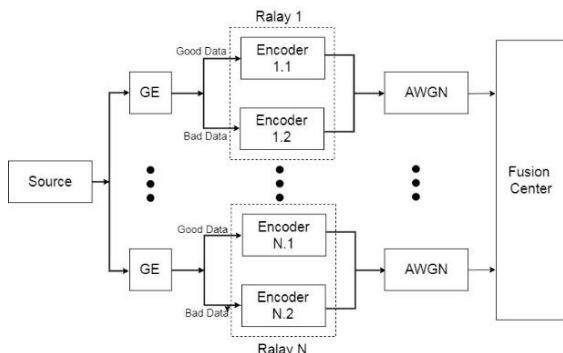
دستیابی به آستانه احتمال خطای قابل قبول با حداقل توان مصرفی ممکن، از عمده ترین چالشهای تحقیق و پژوهش در شبکه های حسگر است. استفاده از کدهای تصحیح خطا پاسخی مناسب به این چالش بوده است. در واقع کدگذاری کانال در شبکه سبب بهبود عملکرد سیستم به لحاظ میزان خطا، میزان تأخیر و مصرف توان گردیده است. در هر شبکه دو روش کلی برای بازبازی خطاها وجود دارد. روش درخواست تکرار خودکار<sup>۳</sup> و روش تصحیح خطا<sup>۴</sup>. در [17] عملکرد ترکیبی از هر دو روش نشان داده شده است. از آنجا که در شبکه های بی سیم با محدودیت توان مواجه ایم و به دلیل ارسال و دریافت های متوالی، در روش تکرار خودکار میزان زیادی توان مصرف می شود، روش استفاده از کدهای تصحیح خطا گزینه بهتری به نظر میرسد [18].

Adaptive Forward Error Correction (AFEC)<sup>5</sup>  
Signal-to-Noise Ratio (SNR)<sup>6</sup>

Diversity<sup>2</sup>  
Automatic Repeat Request (ARQ)<sup>3</sup>  
Forward Error Correction (FEC)<sup>4</sup>

## مدل سیستم

شکل 1 مدل شبکه حسگر مورد مطالعه را نشان می دهد. این مدل که به مدل CEO معروف است، در سطح وسیعی برای مدل کردن شبکه های حسگر بکار میرود. یک گره حسگر اطلاعات منبع را حس کرده و سپس یک دنباله اطلاعات باینری مستقل با توزیع یکسان  $q$  (i.i.d) را به تعداد  $N$  حسگر که حسگرهای رله کننده نامیده می شوند ارسال می کند. منبع، اطلاعاتی شامل  $M$  سمبل از داده ها بشکل  $x^M = (x(1), \dots, x(M))$  را ارسال می کند. برای سادگی بیان، در ادامه گاه با حذف اندیس زمانی، هر بیت ارسالی را با  $x$  نشان میدهم. حسگر شماره  $i$  یک نسخه نویزی از اطلاعات منبع  $(Y_i(t))$  که یک بلوک از داده های مستقل از هم و به طول  $n$  می باشند را مشاهده کرده و پس از کد کردن مجزا با استفاده از یک کد  $C_i$  و با نرخ  $R_i = \frac{1}{n} \log |C_i|$  آنها را از طریق کانال های نویزی مستقل به سوی مرکز ترکیب کننده که وظیفه اش بازیابی پیام منبع می باشد ارسال می کند. توجه کنید که متغیر  $N$  نمایانگر تعداد رله ها است اما متغیر  $n$  طول بلوک کدینگ را نشان میدهد.



شکل 1. بلوک دیاگرام شبکه حسگر با  $N$  رله شده توسط مدل CEO

فرض میشود رله ها دور از حسگر مبدا و نزدیک به مقصد باشند. بنابراین در این مدل کانال منبع-رله تحت تأثیر اثر محوشوندگی قرار میگیرد. کانال های محوشونده معمولاً با خطاهایی که به صورت متوالی رخ می دهند - معروف به خطاهای خوشه ای<sup>1</sup> روبرو می شوند و در صورت استفاده از یک سطح آستانه در گیرنده، به یک کانال باینری با خطای خوشه ای تبدیل میشوند که به خوبی با مدل گیلبرت-لیوت قابل توصیف میباشد. مدل کانال گیلبرت-لیوت که بر اساس همبستگی میان خطاهای متوالی معرفی شده، یک زنجیره مارکوف زمان گسسته دو حالت با احتمال خطای جداگانه در

و در نسل پنجم مخابرات سلولی مورد توجه ویژه قرار دارند، آن است که اجازه تغییرات آرام زمانی ضریب محوشوندگی در طول ارسال یک بلوک داده شود و سیستم برای چنین مدل کانالی طراحی شود. در واقع، وقتی زمان ارسال بلوک داده ها از زمان همبستگی کانال<sup>2</sup> بیشتر باشد، دامنه کانال در طول ارسال بلوک دچار تغییرات خواهد شد. لذا فرض متغیر بودن دامنه کانال در طول ارسال بلوک، واقع بینانه تر از فرض ثابت بودن آن است و بررسی چنین وضعیتی به طراحی بهینه سیستم کمک خواهد کرد. کانالهای محوشوندگی متغیر با زمان را میتوان با سطح بندی مناسب، بشکل یک فرآیند مارکوف مدل کرد [16]. در حالت باینری، مدل مارکوف بصورت مدلی معروف به مدل گیلبرت-لیوت در می آید. در این حالت، اطلاعات وضعیت کانال<sup>3</sup> در طول بلوک تغییر میکند و لذا برای ارسال اطلاعات وضعیت کانال به مرجع تصمیم گیرنده کد گذاری وفقی (همان CEO) باید از یک روش فشرده سازی استفاده شود تا مصرف توان را کمینه کند.

با توجه به مطالب گفته شده، در این مقاله اهداف زیر دنبال شده است:

- بررسی عملکرد شبکه های حسگر در حضور محوشوندگی متغیر با زمان (مدل گیلبرت-لیوت)
- ارائه یک الگوریتم کدگذاری وفقی جهت کاهش توان مصرفی شبکه برای این کانالها
- محاسبه میزان خطا و توان مصرفی الگوریتم پیشنهادی و انتخاب طرح وفقی بهینه از میان طرح های موجود
- نحوه فشرده سازی و ارسال اطلاعات وضعیت کانال به گیرنده
- بررسی اثر افزایش تعداد رله ها بر میزان خطا و توان مصرفی شبکه

در بخش دوم مدل سیستم معرفی خواهد شد. بخش سوم به تشریح روش پیشنهادی برای ارسال و دریافت داده ها اختصاص دارد. بخش چهارم به تحلیل ریاضی روش پیشنهادی و ارائه الگوریتم انتخاب کدینگ وفقی بهینه میپردازد. نتایج شبیه سازی الگوریتم پیشنهادی به همراه تحلیل آنها در بخش پنجم آمده است. بخش ششم نیز شامل جمع بندی و پیشنهاد کارهای آینده است.

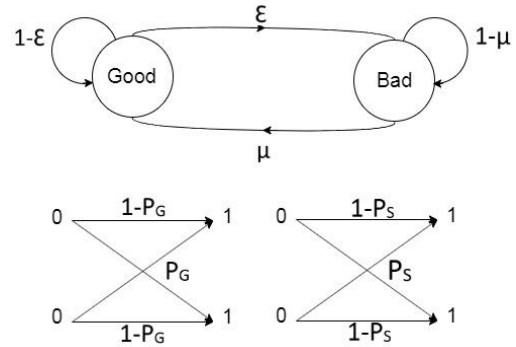
شکل 3 نشان دهنده چگونگی منتج شدن مدل گیلبرت-یوت (مارکوف) از مدل محوشونده رایلی است. با فرض مدولاسیون BPSK میتوان ضریب کانال را با یک عدد حقیقی مثبت (فاز صفر) یا منفی (فاز  $\pi$ ) نشان داد که در نمودار بالایی شکل 3، یک رخداد<sup>13</sup> از این ضریب نمایش داده شده است. قدر مطلق این ضریب، نشانگر دامنه ضریب کانال<sup>14</sup> است که در نمودار میانی شکل 3 نشان داده شده است. سیگنال به نویز دریافتی در گیرنده، در واقع تابعی از توان دوم این دامنه است. لذا قرار دادن یک سطح آستانه بر روی این دامنه، معادل قرار دادن یک سطح آستانه بر روی سیگنال به نویز خواهد بود. اگر دامنه کانال را با  $\alpha$  و سطح آستانه تعیین شده را با  $\alpha_{thr}$  نشان دهیم، در صورتی که  $\alpha > \alpha_{thr}$  وضعیت کانال را خوب و در غیر این صورت آن را بد می گوئیم. با فرض  $\alpha_{thr} = 1.2$ ، نمودار پایینی شکل 3 بدست می آید که نشانگر یک فرآیند مارکوف است. لازم به ذکر است، سرعت تغییرات ضریب کانال محوشوندگی، تابعی از نرخ نرمالیزه محوشوندگی<sup>15</sup> کانال است که با  $f_d T_s$  مشخص میشود ( $f_d$  ماکزیمم شیفت داپلر و  $T_s$  زمان ارسال سمبل است). شکل 3 با استفاده از مدل جیکس<sup>16</sup> رسم شده است.

برای مدل کردن کانال رله-مقصد، از آنجا که در رله، کدهای همینگ با طول بلوک کوچک بکار میروند، میتوان مانند کارهای گذشته، از مدل محوشوندگی بلوکی استفاده کرد. کدگشایی در CEO با استفاده از الگوریتم SP<sup>17</sup> انجام میشود [25].

### روش پیشنهادی

شکلهای 4 و 5 بترتیب بلوک دیاگرام لینکهای منبع-رله و رله-مقصد را نشان میدهند. مطابق شکل 4، ابتدا بیتهای ارسالی از منبع به هم ریخته (اینترلیو) میشوند و سپس با استفاده از مدولاتور تفاضلی مدوله میشوند. دلیل استفاده از مدولاتور تفاضلی، حذف اثر شیفت فاز در کانال است. در مقصد، سیگنال به نویز (که متناظر با مجذور دامنه محوشوندگی است) تخمین زده میشود و بیتهای دریافتی با اعمال یک سطح آستانه بر سیگنال به نویز تخمینی، به دو دسته خوب و بد دسته بندی میشوند. همانگونه که در شکل 1 نشان داده شده، برای ارسال بیتهای خوب و بد از دو کد جداگانه استفاده میشود که این امر در شکل 5 تحت بلوک کدینگ تطبیقی آمده است. بیتهای ارسالی از رله، پس از کدینگ تطبیقی، در بسته های

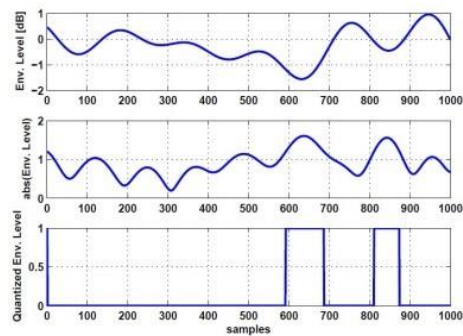
هر حالت می باشد [23]. این دو حالت به عنوان حالت خوب و بد شناخته می شوند. در هر یک از دو حالت، کانال بصورت یک کانال باینری متقارن مدل میشود و حالت خوب احتمال خطای کمتری نسبت به حالت بد خواهد داشت. مدل این کانال در شکل 2 رسم شده است.  $\epsilon, \mu, P_G, P_B$  چهار پارامتر کانال گیلبرت-یوت بوده و به صورت زیر تعریف می شوند:



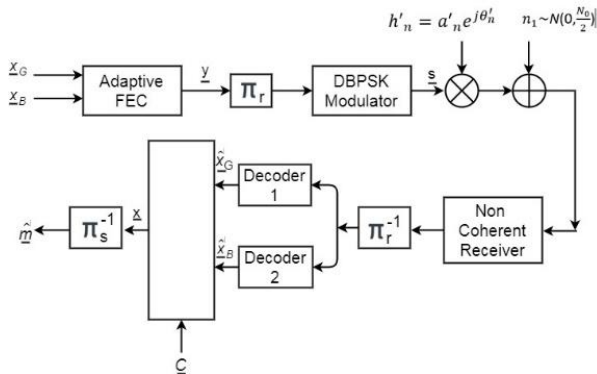
شکل 2. مدل کانال گیلبرت-یوت

$\epsilon$  و  $\mu$  به ترتیب احتمالات گذر حالت از خوب به بد و بد به خوب بوده و  $P_G$  و  $P_B$  نیز به ترتیب احتمال خطای کانال در حالت خوب و بد می باشد. در هر حالت فرض می شود خطای بیت مستقل از دیگری اتفاق می افتد. هر حالت توسط یک کانال باینری متقارن<sup>11</sup> مدل می شود.

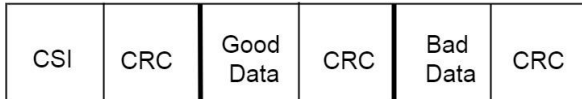
در روش پیشنهادی که در بخش بعد خواهد آمد، کانال محوشوندگی با قرار دادن یک سطح آستانه بر روی سیگنال به نویز، به دو حالت خوب و بد سطح بندی میشود. این کانال محوشونده رایلی<sup>12</sup> همبسته کوانتایز شده را میتوان بصورت کانال گیلبرت-یوت مدل کرد [24]. تعیین پارامترهای کانال به طور کلی وابسته به نرخ تغییرات کانال از یک حالت به حالت دیگر، نرخ ارسال سمبل و شرایط محیطی نظیر تعداد موانع میان فرستنده و گیرنده است.



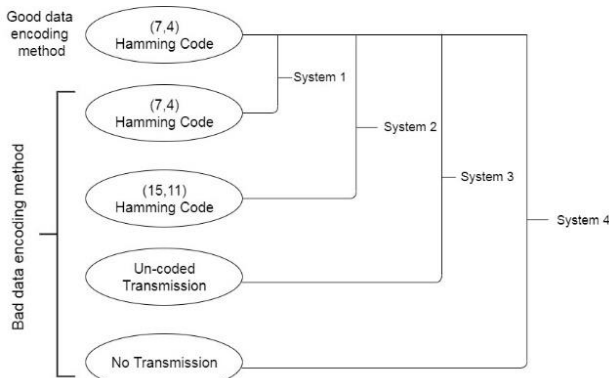
شکل 3. سطح بندی و تبدیل کانال محوشوندگی به کانال گیلبرت-یوت.



شکل 5. مدل سیستم برای لینک رله-مقصد



شکل 6. بسته ارسالی رله حاوی اطلاعات منبع و اطلاعات وضعیت کانال



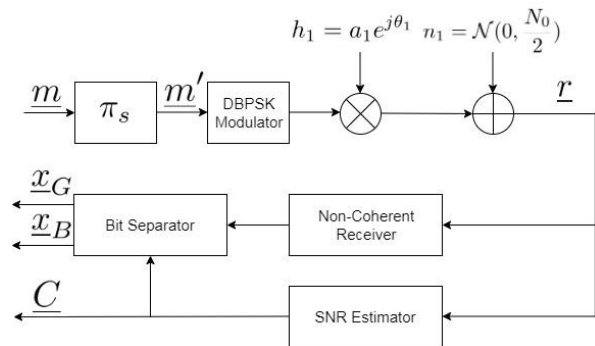
شکل 7. نمایش طرح کدینگ وقتی پیشنهادی - کدشدن اطلاعات خوب توسط کد همینگ (7و4) در تمامی سیستم‌ها و کدشدن اطلاعات بد توسط کد همینگ (7و4) در سیستم 1- کد همینگ (15و11) در سیستم 2- ارسال بدون کد اطلاعات بد در سیستم 3 و عدم ارسال اطلاعات بد در سیستم 4

اطلاعات کد شده از طریق کانال های مستقل عبور کرده و به مقصد (مرکز ترکیب کننده) می رسد. در مقصد ابتدا برای هر رله، اطلاعات کانال منبع-رله CRC چک شده و در صورتی که به طور صحیح دریافت شده باشند، آن رله در فرایند کد گشایی شرکت می کند. در غیر این صورت اطلاعات آن رله کنار گذاشته خواهد شد. در این مدل، مرکز ترکیب کننده با استفاده از روش کد گشایی توأم و اعمال الگوریتم SP، پیام ارسالی منبع را کد گشایی می کند. فرایند کد گشایی بصورت زیر انجام می شود:

1. قابلیت اعتبار (مقادیر نرم) تمامی بیت‌های اطلاعات در تمامی رله‌ها بطور جداگانه ذخیره می‌شود.
2. اطلاعات وضعیت کانال در هر رله CRC چک می‌شود.
3. در صورتی که CSI بطور صحیح CRC چک شود، اطلاعات مربوط به آن رله ذخیره و در فرایند کد گشایی شرکت داده

ارسالی مطابق شکل 6 قرار میگیرند. اطلاعات وضعیت کانال (CSI)، که دنباله ای باینری شبیه به دنباله نشان داده شده در نمودار پایینی شکل 3 است، با یک کد Run-Length مطابق روش پیشنهاد شده در [26] فشرده سازی میشود. اطلاعات وضعیت فشرده سازی شده، بیت‌های خوب کد شده و بیت‌های بد کد شده هر یک با کدهای تشخیص خطا (CRC) بشکل جداگانه کد شده اند. این فرآیند تشخیص خطا به مقصد کمک میکند تشخیص دهد آیا اطلاعات وضعیت کانال بدرستی دریافت شده یا خیر. در صورت عدم دریافت صحیح اطلاعات وضعیت کانال، مکان بیت‌های خوب و بد قابل تشخیص نیست و مقصد باید درخواست ارسال مجدد بسته را نماید یا این بسته را کد گشایی نکند. اما اگر بخش CSI بدرستی دریافت شده باشد، کد گشایی انجام میشود و سپس هر یک از رشته های بیت‌های خوب و بد که پس از کد گشایی، شرط CRC را نیز برآورده کرد، به گیرنده تحویل میشود.

شکل 7 طرح کدینگ وقتی پیشنهادی را نشان میدهد. چهار سیستم در این مقاله پیشنهاد و بررسی شده است. در همه سیستمها، بیت‌های خوب با کد همینگ (7،4) کد میشود. ولی بیت‌های بد در سیستمهای 1 و 2، بترتیب با کد همینگ (7،4) و کد همینگ (15،11) کد میشوند. در سیستم 3، بیت‌های بد بشکل کد نشده ارسال میشوند و در سیستم 4 این بیتها اصلا ارسال نمیشوند. سیستم 1 سیستم غیر وقتی است که در آن برای تمام بیتها از یک نوع کدینگ استفاده میشود. در سیستمهای 2 تا 4 از کدینگ ضعیف تر (با تعداد بیت‌های ارسالی کمتر) برای ارسال بیت‌های بد استفاده میشود. استدلال این امر آن است که بیت‌های بد، ارزش اطلاعاتی کمتری دارند و انرژی زیاد برای مبادله این اطلاعات کم، مقرون به صرفه نیست.



شکل 4. مدل سیستم برای لینک منبع-رله

کمترین انرژی متوسط، احتمال خطا را از سطح آستانه مجاز پایین تر نگاه دارد.

در تحلیل سیستم، هدف محاسبه احتمال خطای کدگشایی توام در CEO است. برای این امر، ابتدا احتمال خطای در دریافت هر بیت را بشکل جداگانه در نظر میگیریم و سپس احتمال خطا در کدگشایی توام را از روی این احتمال محاسبه میکنیم.

برای شروع تحلیل، به این نکته توجه میکنیم که مدولاسیون تفاضلی با آشکارساز ناهمدوس<sup>۱۸</sup> حدودا 3dB بدتر از مدولاسیون همدوس عمل میکند، احتمال خطای دریافت روی کانالهای منبع-رله (S-R) و رله-مقصد (R-D) را میتوان برای رله  $i$  ام بشکل زیر بیان کرد که در آن  $P_{rd,i}$  و  $P_{sr,i}$  احتمال خطای لحظه ای کانال به ترتیب در لینک منبع-رله و رله-مقصد و  $\gamma_{rd,i}$  و  $\gamma_{sr,i}$  بترتیب سیگنال به نویز لحظه ای کانال منبع-رله و رله-مقصد می باشد.

حال اگر سیگنال دریافتی در رلهها قبل از کدگذاری و ارسال به CEO را با  $y$  و اطلاعات کدگشایی شده کد همینگ در مقصد را با  $\hat{y}$  نشان دهیم در این صورت احتمال خطای بیت کد همینگ در لینک رله-مقصد بصورت زیر خواهد بود:

$$\hat{P}_{rd,i} = P_{b,(n,k)} = P(y_i \neq \hat{y}_i); \quad i=1:N \quad (3)$$

که  $\hat{P}_{rd,i}$  احتمال خطای بیت پس از کدگشایی روی کانال رله-مقصد و  $P_{b,(n,k)}$  احتمال خطای بیت برای کد همینگ  $(n,k)$  است. برای بدست آوردن یک کران روی  $\hat{P}_{rd,i}$  به این صورت عمل می کنیم. ابتدا احتمال خطای بلوک برای کد همینگ  $(n,k)$  را بدست می آوریم. این احتمال برابر است با:

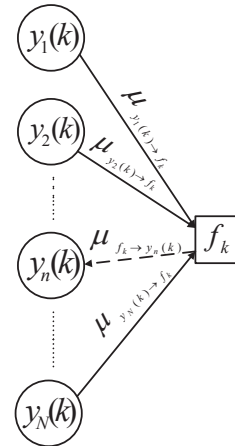
$$P_{e,(n,k)} = 1 - P_{c,(n,k)} \quad (4)$$

که در آن  $P_{c,(n,k)}$  احتمال رخداد یک خطا یا کمتر می باشد و از آنجا که کد همینگ قادر به تصحیح یک خطا در هر بلوک می باشد، بصورت زیر بدست می آید:

می شود. در غیر این صورت اطلاعات آن رله کنار گذاشته خواهد شد.

4. پس از کدگشایی اطلاعات رلهها، CRC مربوط به این اطلاعات چک شده و در صورتی که بدون خطا کدگشایی شده باشند قابلیت اعتبار آن ها به  $\pm \infty$  تغییر داده می شود.

5. با داشتن مجموعه ای از مقادیر نرم اطلاعات رله های شرکت داده شده در فرایند کدگشایی، کدگشایی توأم SP مطابق شکل 8 بر روی بیت های دریافتی انجام می گیرد.



شکل 8. مدل گرافی برای پیاده سازی الگوریتم SP در مقصد

همانگونه که ملاحظه می شود گره تابع  $f_k$  پس از دریافت پیام از تمامی گره های متغیر، یک پیام به روز شده را برای ارسال به سایر گره های متغیر مطابق معادله 1 محاسبه می کند. در این رابطه  $\mu_{f_k \rightarrow y_n(k)}(y_n(k))$  مقدار نرم به روز شده توسط

گره تابع  $f_k$  برای بیت  $k$ ام از رله  $n$ ام می باشد. تابع  $f_k$  بصورت معادله 2 توصیف می شود که در آن  $P_{x(k)}(0) = P_{x(k)}(1) = \frac{1}{2}$  و  $w_k = \sum_{n=1}^N (x(k) \oplus y_n(k))$  می باشد.

$$\mu_{f_k \rightarrow y_n(k)}(y_n(k)) = \frac{\sum_{\{y_n(k)\}} f_k(x(k), y_1(k), \dots, y_n(k), \dots, y_N(k)) \times \mu_{x(k) \rightarrow f_k}(x(k)) \times \prod_{i=1, i \neq n}^N \mu_{y_i(k) \rightarrow f_k}(y_i(k))}{\sum_{\{y_n(k)\}} f_k(x(k), y_1(k), y_2(k), \dots, y_N(k))} \quad (1)$$

$$f_k(x(k), y_1(k), y_2(k), \dots, y_N(k)) = \alpha \cdot p_{x(k)}(x(k)) \cdot p^{w(k)} \cdot (1-p)^{N-w(k)} \quad (2)$$

### تحلیل سیستم پیشنهادی

در این بخش، هدف ما تحلیل روش پیشنهادی و سپس ارائه الگوریتمی برای انتخاب کدینگ وقتی بهینه است که آنرا بشکل زیر تعریف میکنیم. کدینگ بهینه، کدینگی است که با صرف

SP در اینجا کارآمد باشد. در ML، هدف، بیشینه کردن احتمال  $r_N$  تا  $r_1$  می باشد که  $x=0,1$  به ازای  $\Pr(r_1 \wedge r_N | x)$  سیگنال های دریافتی از طریق رله های 1 تا N هستند و x بیت ارسالی منبع است. در صورتی که  $\hat{x}=0$   $\Pr(r_1 \wedge r_N | x=0) < \Pr(r_1 \wedge r_N | x=1)$  و در غیر این صورت  $\hat{x}=1$  خواهد بود ( $\hat{x}$  تخمین بیت ارسالی در مقصد است).

حال به محاسبه احتمال خطای کدگشای ML می پردازیم. این احتمال خطا را می توان بصورت زیر نوشت:

$$P_{e,ML} = \frac{1}{2} P_{e|0} + \frac{1}{2} P_{e|1} \quad (10)$$

که در آن  $P_{e|0}$  احتمال خطا به شرط ارسال  $x=0$  و  $P_{e|1}$  احتمال خطا به شرط ارسال  $x=1$  می باشد. با توجه به متقارن بودن سیستم،  $P_{e|0} = P_{e|1}$  خواهد بود و در نتیجه:

$$P_{e,ML} = P_{e|0} \quad (11)$$

در این صورت:

$$P_{e,ML} = \sum_{r_1^N} I(r_1^N | r_N) P(r_1^N | x=0) \quad (12)$$

که تابع  $I(r_1 \wedge r_N)$  به شکل زیر تعریف شده است:

$$I(r_1^N | r_N) = \begin{cases} 1 & P(r_1 \wedge r_N | x=1) > P(r_1 \wedge r_N | x=0) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

### الگوریتم تعیین کدینگ وقتی بهینه

حال فرض می کنیم هدف سیستم، دستیابی به یک احتمال خطای آستانه  $BER_{thr}$  با صرف کمترین انرژی ارسالی باشد. برای رسیدن به این هدف می توان تمامی مجموعه کدهای وقتی ممکن شکل 7 را در مقصد بررسی کرد و احتمال خطای کدگشای ML را برای آنها بدست آورد. به ازای هر مجموعه کد در صورتی که  $P_{e,ML} < BER_{thr}$  باشد، آن مجموعه کد جزء مجموعه های انتخاب شده خواهد بود. سپس انرژی مصرفی برای این مجموعه کد باید محاسبه شود. این انرژی، از رابطه 15 بدست می آید. سپس روش کدینگ وقتی انتخاب شده طبق رابطه زیر بدست می آید:

$$\Omega = \underset{P_{e,ML} < BER_{thr}}{\text{ArgMin}} \{E_t\} \quad (14)$$

$$P_{e,(n,k)} = (1 - P_{rd,i})^n + n(1 - P_{rd,i})^{n-1} P_{rd,i} \quad (5)$$

حال می توان برای احتمال خطای بیت کد همینگ  $\hat{P}_{rd,i}$  یک کران بالا و پایین بصورت زیر پیشنهاد داد. در صورتی که یک بلوک n بیتی دچار خطا شود، حداقل 3 بیت (با توجه به آنکه حداقل فاصله کد همینگ برابر با 3 می باشد) و حداکثر n بیت آن خطا خواهد بود. بنابراین داریم:

$$\frac{3}{n} P_{e,(n,k)} \leq \hat{P}_{rd,i} \leq \frac{n}{n} P_{e,(n,k)} \quad (6)$$

در سیگنال به نویزهای زیاد، کران پایین به اندازه کافی محکم خواهد بود. زیرا در این حالت، کلمه کد شده و کدگشایی شده به احتمال زیاد، در 3 بیت اختلاف دارند. با استفاده از این کران پایین می توان گفت:

$$\hat{P}_{rd,i} \approx \frac{3}{n} P_{e,(n,k)} \quad (7)$$

حال هدف محاسبه احتمال خطای پایانه-به-پایانه به ازای هر بیت می باشد. اگر احتمال خطای کانال منبع-مقصد از طریق رله i ام را با  $P_{sd,i}$  نشان دهیم در این صورت با مدل کردن هر لینک بصورت یک کانال BSC داریم:

$$\Pr(r_1 \wedge r_N | x) \equiv \prod_{i=1}^N P(r_i | x) \quad (8)$$

که در آن:

$$P(r_i | x) = \begin{cases} P_{sd,i} & r_i \neq x \\ 1 - P_{sd,i} & r_i = x \end{cases} \quad (9)$$

با جاگذاری رابطه 7 در رابطه 8، احتمال خطای پایانه-به-پایانه برای هر مسیر منبع-رله-مقصد بدست می آید.

آنچه در رابطه 8 بدست آمده است، احتمال خطای بیت خام (قبل از کدگشایی) است. این بیت های خام، با استفاده از یک کدگشای SP بشکل توأم کدگشایی میشوند. ما فرض میکنیم کدگشایی توأم اطلاعات دریافتی در گیرنده با استفاده از روش بهینه ML<sup>19</sup> صورت می گیرد. از آنجا که الگوریتم SP نیز روی گراف هایی که شکل درختی دارند بهینه میباشد [25] انتظار میرود عملکرد آن شبیه ML باشد و تحلیل ML برای الگوریتم

$$M_B = \frac{\mu}{\mu + \varepsilon} \times M \quad (16)$$

$$M_G = \frac{\mu}{\mu + \varepsilon} \times M \quad (17)$$

که روابط 16 و 17 با توجه به احتمالات حالت ایستای (Steady-state) کانال گیلبرت-الیوت بدست آمده اند [16] رابطه 15 برای تعیین سیستم با کمترین انرژی مصرفی استفاده میشود.

همچنین، در هر شبکه حسگر مسأله یافتن تعداد حسگرهای بهینه یک موضوع جالب توجه است. یک شرط منطقی برای محاسبه این عدد، توجه به این نکته است که بیت های ارسالی از منبع باید حداقل توسط یکی از رله های میانی بدون خطا دریافت شود. در صورتی که شرایط کانال منبع-رله به گونه ای باشد که برخی از اطلاعات ارسالی توسط هیچ یک از رله ها صحیح دریافت نشوند، این اطلاعات از دست خواهد رفت. با توجه به شرایط کانال منبع-رله که در اینجا توسط مدل GE مدلسازی شده است و با در نظر گرفتن احتمال حالت ایستای خوب و بد کانال، می توان گفت احتمال آنکه هر بیت از اطلاعات حداقل توسط یکی از رله های میانی در شرایط خوب کانال دریافت شود، به صورت زیر است:

$$P = 1 - P' \quad (18)$$

$$P' = \left( \frac{\varepsilon}{\mu + \varepsilon} \right)^N \quad (19)$$

که در آن  $P'$  احتمال عدم دریافت صحیح بیت توسط تمامی رله ها و  $N$  تعداد کل رله هاست. در صورتی که  $P$  از یک مقدار دلخواه  $\delta$  کمتر باشد، با انتخاب تعداد رله های شبکه به صورت زیر، تمامی بیت های ارسالی منبع، با احتمال  $1 - \delta$ ، حداقل توسط یک رله در شرایط خوب کانال دریافت می شوند.

$$P' < \delta \Rightarrow \left( \frac{\varepsilon}{\mu + \varepsilon} \right)^N < \delta \Rightarrow N > \frac{\log(\delta)}{\log\left(\frac{\varepsilon}{\mu + \varepsilon}\right)} \quad (20)$$

حال با توجه به آنکه احتمال نویزی شدن بیت در وضعیت خوب کانال برابر با  $p_G$  می باشد، احتمال آنکه هر بیت

یعنی از میان تمام سیستمهای وفقی موجود، سیستم  $\Omega$  که شرط احتمال خطا را بر آورده میکند و همچنین دارای کمترین انرژی مصرفی ممکن است، انتخاب خواهد شد.

با توجه به تحلیلهای صورت گرفته در این بخش، الگوریتمی بشکل زیر برای تعیین روش کدینگ وفقی بهینه ارائه میدهم:

#### الگوریتم پیشنهادی:

**مرحله 1-** فرض کنیم تمام  $\gamma_{rd,i}$  و  $\gamma_{sr,i}$  ها در گیرنده موجود باشد. محاسبه این مقادیر با روشهای تخمین کانال امکان پذیر است که موضوع بحث ما نمی باشد.

**مرحله 2-** برای هر مجموعه کد مورد استفاده در رله های 1 تا  $N$ :

- $P_{e,ML}$  را از رابطه 12 محاسبه می کنیم.
- در صورتی که  $P_{e,ML} < BER_{thr}$  باشد، انرژی متوسط مصرفی را از رابطه 15 محاسبه می کنیم و این مجموعه یکی از مجموعه های انتخاب شده می باشد.
- بین تمامی مجموعه های انتخاب شده، مجموعه با توان کمتر را طبق رابطه 14 انتخاب می کنیم.
- اگر مجموعه انتخاب شده تهی باشد (به ازای هیچ مجموعه کدی  $P_{e,ML}$  کمتر از  $BER_{thr}$  نباشد)، قوی ترین مجموعه (مجموعه با کمترین احتمال خطا) را انتخاب می کنیم.

#### محاسبات انرژی و تعیین تعداد حسگرهای بهینه

فرض کنیم رله مجموعه ای از  $K$  کد FEC با نرخ  $R_1$  تا  $R_K$  جهت کدگذاری اطلاعات دریافتی در اختیار دارد (به عنوان مثال در سیستم پیشنهادی شکل 7،  $K=4$  و

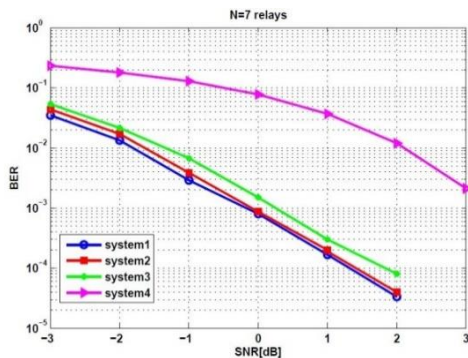
$$R_1 = \frac{4}{7}, R_2 = \frac{11}{15}, R_3 = 1$$

ارسال است، برای آن نرخ در واقع بینهایت است که نوشته نشده است). حال اگر تعداد بیت های خوب را با  $M_G$  و تعداد بیت های بد را  $M_B$  و تعداد بیت های ارسالی منبع را با  $M$  نمایش دهیم و رله کدهای شماره  $i$ ،  $Z$  را به ترتیب به اطلاعات خوب و بد اعمال کند و به هر بیت ارسالی میزان انرژی  $E_S$  را اختصاص دهد، مجموع انرژی مصرف شده برای ارسال اطلاعات توسط رله به صورت زیر خواهد بود:

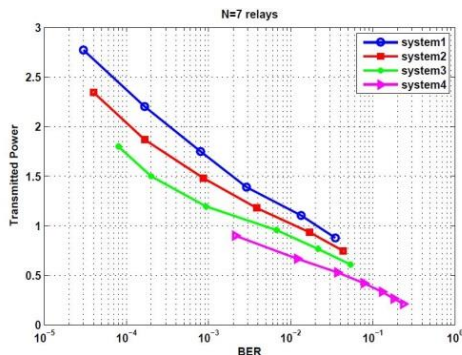
$$E_t = \left( \frac{M_G}{R_i} + \frac{M_B}{R_j} \right) \times E_S \quad (15)$$

سیستم های مختلف بیشتر می شود و این به دلیل رابطه نمایی توان ارسالی با نسبت توان سیگنال به نویز است.

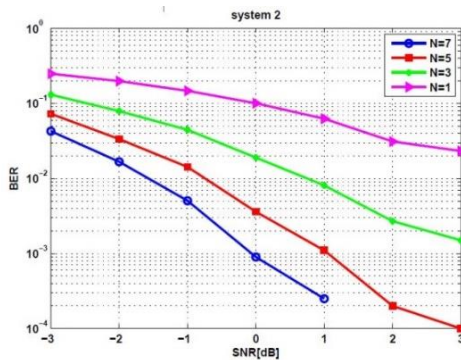
شکلهای 11 و 12 اثر افزایش تعداد رله ها بر کاهش احتمال خطا و توان مصرفی را نشان میدهند. همانگونه که در شکل 11 نشان داده شده، به ازای استفاده از یک سیستم وقتی معین (سیستم 2)، با افزایش تعداد رله ها، احتمال خطا کاهش می یابد. این امر به آن دلیل است که کدگشایی توام با افزایش تعداد رله ها، قابلیت تصحیح خطای بیشتری پیدا میکند. همچنین، مطابق شکل 12، برای دستیابی به یک حد خطای ثابت، با افزایش تعداد رله ها، توان مورد نیاز کاهش می یابد.



شکل 9. نرخ خطای بیت به ازای N=7 رله



شکل 10. میزان توان مصرفی به ازای N=7 رله



شکل 11. مقایسه میزان خطای بیت سیستم 2 به ازای افزایش تعداد رله ها

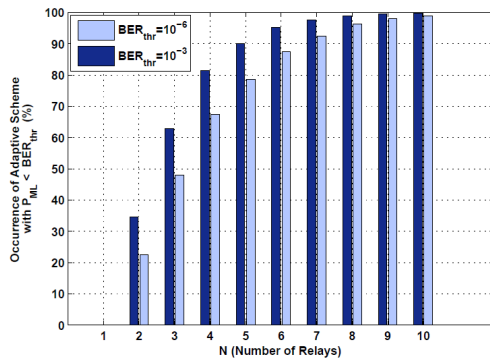
حداقل توسط یکی از رله ها به طور صحیح دریافت شود برابر با  $(1 - \delta)(1 - P_G)$  خواهد بود.

## نتایج شبیه سازی

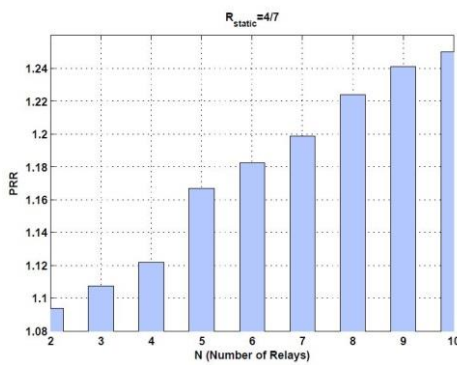
تمامی شبیه سازیها به ازای طول بلوک منبع  $M=1000$  بیت و با انتخاب پارامترهای کانال گیلبرت الیوت به صورت  $\mu = 0.0045, \varepsilon = 0.0142, P_G = 5.0096 \times 10^{-5}, P_B = 0.0349$  انجام شده اند. شکل 9 و 10 نتایج حاصل از عملکرد روش پیشنهادی به ازای  $N=7$  رله را نشان می دهد. همانگونه که در شکل 7 نشان داده شده، سیستم 1 یک سیستم غیر وقتی است و تمامی اطلاعات دریافتی رله ها در آن با استفاده از کد همینگ (7 و 4) کد شده اند. در سایر سیستم ها نیز اطلاعات خوب با استفاده از کد همینگ (7 و 4) کد شده اند، در حالی که اطلاعات بد با استفاده از کد همینگ (11 و 15) (در سیستم 2) و بدون کد گذاری (در سیستم 3)، ارسال شده اند. سیستم 4 نیز با عدم ارسال اطلاعات بد شکل گرفته است (مطابق شکل 7).

شکل 9 منحنی مقایسه میزان خطای چهار سیستم فوق را نشان می دهد. همانگونه که انتظار می رود سیستم اول کمترین میزان خطا را دارد و پس از آن میزان خطای سه سیستم دیگر به ترتیب افزایش می یابد. شکل 10 توان مصرفی چهار سیستم مذکور را مقایسه می کند. توان (انرژی) مصرفی حاصل ضرب تعداد متوسط بیت های ارسالی از رله ها در توان ارسالی هر بیت می باشد. این شکل نشان می دهد اعمال قوی ترین کد همیشه به صرفه نیست. در صورتی که هدف، رسیدن به مقدار خطای دلخواه باشد، می توان از سیستمی که به ازای ایجاد این میزان خطا، توان مصرفی کمتری را سبب می شود، استفاده کرد. سیستم چهارم اگرچه کمترین میزان توان مصرفی را دارد، اما برای کاربردهایی با خطای کمتر از  $2 \times 10^{-3}$  مناسب نیست، زیرا قادر نیست به خطایی کمتر از این مقدار دست یابد. اما در صورتی که هدف دستیابی به خطایی حدود  $6 \times 10^{-2}$  و بیشتر باشد، این سیستم ترجیح داده می شود زیرا کمترین میزان توان مصرفی را به ازای این حدود خطا نسبت به سایر سیستم ها دارد. در کاربردهایی با حساسیت بیشتر که خطایی کمتر از  $2 \times 10^{-3}$  نیاز است، سیستم سوم مناسب به نظر می رسد، زیرا با مصرف توان کمتر، خطایی در حدود دو سیستم اول و دوم ایجاد می کند. سیستم غیر وقتی (سیستم اول) اگرچه کمترین میزان خطا را دارد اما مصرف توان آن بیشتر است. همچنین منحنی توان مصرفی نشان می دهد در سیگنال به نویزهای بالاتر، اختلاف میان توان مصرفی

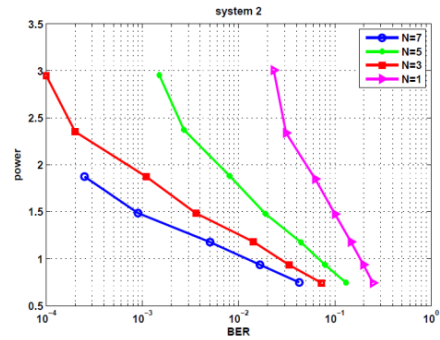
شکل 14 میزان کاهش توان با استفاده از الگوریتم پیشنهادی را نشان میدهد. انرژی کل با استفاده از رابطه 15 محاسبه شده و این انرژی برای کدینگ انتخاب شده توسط الگوریتم و کدینگ غیر وقتی، مقایسه شده است. به منظور مقایسه، الگوریتم 1000 بار انجام شده و سپس متوسط انرژی در شکل 14 لحاظ شده است. با تعریف پارامتر نسبت کاهش توان، PRR، بصورت نسبت انرژی ارسالی برای کدینگ غیر تطبیقی و تطبیقی، مقدار این پارامتر برای تعداد متفاوت رله ها به ازای  $BER_{thr} = 10^{-3}$  در شکل 14 نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود مقدار این پارامتر بزرگتر از یک و نشان دهنده عملکرد موفق طرح وقتی در کاهش توان ارسالی است. همچنین از این شکل می توان نتیجه گرفت افزایش تعداد رله ها سبب افزایش PRR<sup>20</sup> (صرفه جویی بیشتر در توان ارسالی) می شود.



شکل 13. مقایسه احتمال انتخاب یک مجموعه وقتی با میزان خطای کمتر از سطح آستانه



شکل 14. نسبت کاهش توان الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با مجموعه ایستان (7 و 4)



شکل 12. مقایسه میزان توان مصرفی سیستم 2 به ازای افزایش تعداد رله ها. توجه این مشاهده به این شکل است که با افزایش تعداد رله ها، کد گشایی توام احتمال خطای پایین تری خواهد داشت (چون در شکل 8، تعداد بیشتری شاخه به گره تابع متصل است و این به معنای در دست داشتن اطلاعات بیشتر است که احتمال خطا در کدگشایی را کاهش میدهد). لذا هر رله میتواند با استفاده از کد ضعیف تر (توان پایین تر) بیت های خود را به CEO ارسال کند و این کدینگ مجزای ضعیفتر، با بهره گیری از کدگشایی توأم قویتر، کماکان میتواند به احتمال خطای مطلوب دست یابد.

شکل های 13 و 14 احتمال ترجیح کدینگ وقتی بر غیر وقتی، و میزان صرفه جویی در توان ارسالی با استفاده از کدینگ وقتی را نشان میدهند. شبیه سازی های انجام شده در این بخش به

ازای ارسال 1000 بلوک و با انتخاب  $\bar{\gamma}_{sr} = 0dB$  و  $\bar{\gamma}_{sr} = 10dB$  می باشد. در آزمایش اول با تغییر تعداد رله ها

احتمال آنکه خطای کد گشای ML از مقدار خطای آستانه  $BER_{thr}$  کمتر باشد و این میزان خطا مربوط به یک سیستم وقتی ( غیر ایستان) باشد، محاسبه شده است. این آزمایش به

ازای دو مقدار متفاوت  $BER_{thr} = 10^{-3}$  و

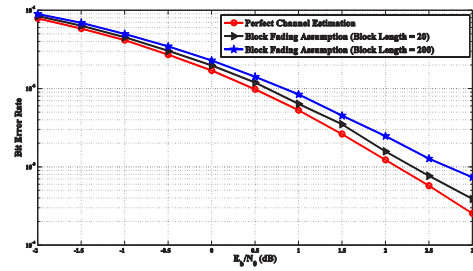
$BER_{thr} = 10^{-6}$  انجام شده است. همانگونه که در شکل 13 مشاهده میشود، کاهش حد آستانه احتمال خطا، سبب کاهش احتمال انتخاب کدینگ وقتی میشود. زیرا در صورتی که احتمال خطای آستانه کاهش یابد، به مجموعه کد قوی تری نیاز است تا بتوان به این مقدار آستانه خطا دست پیدا کرد. بنابراین احتمال انتخاب حالت ایستان متشکل از کد همینگ (4 و 7) افزایش و احتمال انتخاب طرح های وقتی کاهش می یابد. از این شکل همچنین می توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد رله ها احتمال انتخاب یک طرح وقتی افزایش می یابد. ملاحظه میشود که اگر تعداد رله ها از 7 بیشتر باشد، احتمال ترجیح کدینگ وقتی بر غیر وقتی، بیش از 90 درصد میباشد.

سازی شده)، تخمین بهره کانال و دنبال کردن تغییرات آن، احتمال خطا را نسبت به سیستمی که فرض کانال فیدینگ بلوکی عمل میکند، کاهش میدهد. سیستمی که کانال را فیدینگ بلوکی فرض میکند، در ابتدای بلوک، ضریب فیدینگ را تخمین زده و در تمام مدت ارسال بلوک، از همان تخمین برای آشکارسازی استفاده مینماید. همانگونه که در شکل 16 نشان داده شده، بهره کانال در طول زمان ارسال بلوک تغییر میکند و لذا فرض فیدینگ بلوکی در این حالت به افت عملکرد منجر خواهد شد. در شکل 15 از مدولاسیون BPSK و سیستم کد نشده استفاده شده و 3 رله بکار رفته و همچنین گیرنده بهینه (MRC) برای آشکارسازی اعمال گشته است. توجه کنیم که در طول بلوک 20 افت عملکرد از حالت طول بلوک 200 کمتر میباشد، چرا که گیرنده ای که با فرض کانال فیدینگ بلوکی پیش میرود، در این حالت پس از 20 سمبل، تخمین خود را به روز رسانی کرده و لذا اطلاعات به روز تری از تغییرات زمانی کانال در اختیار دارد. همچنین توجه شود که سیستم کد شده هم عملکرد مشابهی خواهد داشت. در نهایت، نرخ بهره نرمالیزه شده و حد آستانه پیشنهادی، پارامترهای کانال گیلبرت البوت را بطور کامل توصیف میکنند که جهت مطالعه جزئیات رابطه بین این شاخصها، خواننده را به [24] ارجاع میدهیم.

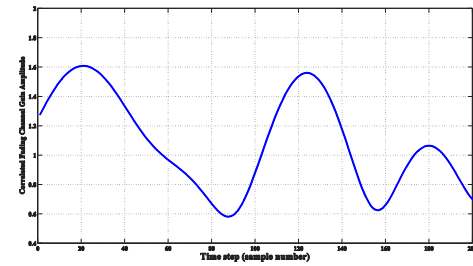
جهت تکمیل مقایسات، در شکل 17 مقایسات شکل 15 برای حالت فیدینگ سریع (نرخ فیدینگ 0.1) تکرار شده اند. همانگونه که انتظار میرود، افت عملکرد سیستمی که با فرض کانال فیدینگ بلوکی کار میکند، در شکل 17 مشهودتر از شکل 15 میباشد. این امر به آن علت است که هنگامی که تغییرات کانال سریعتر است، فرض کانال فیدینگ بلوکی از واقعیت دورتر و وابستگی بهره تخمینی کانال با بهره واقعی و متغیر با زمان کانال کمتر میباشد. در نهایت شکل 18 اثر افزایش رله ها را نشان میدهد. ملاحظه میشود که با افزایش رله ها، هم روش پیشنهادی و هم روشی که از فرض کانال بلوکی استفاده میکنند، مطابق انتظار بهبود عملکرد داشته اند. اما افت عملکرد روش با فرض فیدینگ بلوکی در این حالت کمتر محسوس میباشد، که احتمالاً به علت اثر قوی تر بهره چند مسیریگی<sup>۲۱</sup> و جبران اثر تخمین غیر دقیق کانال با کمک دایورسیتی بیشتر میباشد.

## نتیجه گیری

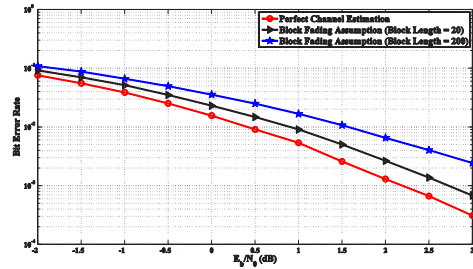
در این مقاله، با در نظر گرفتن کانال با تغییرات آرام زمانی در طول ارسال یک بلوک، یک الگوریتم کدینگ و فکینگ برای شبکه



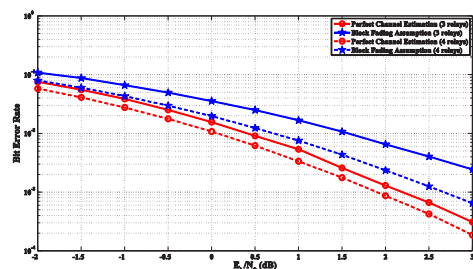
شکل 15. مقایسه روش پیشنهادی و روشهای پیشین بر مبنای فرض کانال فیدینگ بلوکی، در حالت تغییرات زمانی آرام کانال  $fdTs=0.01$



شکل 16. تغییرات دامنه کانال برای طول بلوک 200 و نرخ فیدینگ نرمالیزه شده  $fdTs=0.01$ . ملاحظه میشود که چنانچه کانال فیدینگ بلوکی فرض شده و از تغییرات آن در طول زمان صرفنظر شود، تخمین مناسبی برای بهره کانال نخواهیم داشت.



شکل 17. مقایسه روش پیشنهادی و روشهای پیشین بر مبنای فرض کانال فیدینگ بلوکی، در حالت تغییرات زمانی سریع کانال  $fdTs=0.1$



شکل 18. مقایسه عملکرد گیرنده در روش پیشنهادی و روش فرض فیدینگ بلوکی برای طول بلوک 200 و تعداد رله های 3 و 4

در پایان به مقایسه روش پیشنهادی و روشهای معمول در مراجع گذشته، که کانال را فیدینگ بلوکی فرض کرده و از تغییرات زمانی آن صرفنظر میکنند میپردازیم. در شکل 15 ملاحظه میشود که در حالت تغییرات زمانی آرام کانال (که مطابق مرجع [24] با نرخ فیدینگ نرمالیزه شده 0/01 شبیه

میتواند به کاهش توان مصرفی و لذا به افزایش طول عمر شبکه های حسگر کمک کند.

های حسگر بیسیم، معرفی و تحلیل شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که الگوریتم پیشنهادی بر اساس کدگشایی توأم، ضمن بر آورده کردن سطح آستانه احتمال خطای مطلوب،

## مراجع

- [14] J. N. Laneman, D. N. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, 2004.
- [15] S. Wang and J. Nie, "Energy efficiency optimization of cooperative communication in wireless sensor networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2010, p. 3, 2010.
- [16] A. K. Sadek, W. Yu, and K. Liu, "On the energy efficiency of cooperative communications in wireless sensor networks," *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, vol. 6, no. 1, p. 5, 2009.
- [17] P. Lettieri, C. Fragouli, and M. B. Srivastava, "Low power error control for wireless links," *Proceedings of the 3rd annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking. ACM*, 1997, pp. 139-150.
- [18] O. Eriksson, E. Björnemo, A. Ahlén, and M. Gidlund, "On hybrid arq adaptive forward error correction in wireless sensor networks," *IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. IEEE*, 2011, pp. 3004-3010.
- [19] K. Yu, F. Barac, M. Gidlund, and J. Akerberg, "Adaptive forward error correction for best effort wireless sensor networks," *Communications (ICC), 2012 IEEE International Conference on. IEEE*, 2012, pp. 7104-7109.
- [20] R. Ahmad and M. O. Hasna, "Joint Hierarchical Modulation and Network Coding for Two Way Relay Networks," *2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Yokohama, 2012, pp. 1-6.
- [21] J. S. Ahn, S. W. Hong, J. Heidemann, "An adaptive FEC code control algorithm for mobile wireless sensor networks," *Journal of communications and networks*, vol. 7, no. 4, pp.489-498, 2005.
- [22] H. X. Nguyen, H. H. Nguyen, T. Le-Ngoc, "Signal transmission with unequal error protection in wireless relay networks," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 59, no. 5, pp. 2166-2178, 2010.
- [23] E.O. Elliott, "Estimates of error rates for codes on burst-noise channels," *Bell Syst. Tech. Journal*, vol. 42, no. 5, pp. 1977-1997, Sept. 1963.
- [24] P. Sadeghi, R. A. Kennedy, P. B. Rapajic, and R. Shams, "Finite-State Markov Modeling of Fading Channels," *IEEE Signal Processing Magazine*, Sep. 2008, pp. 57-80.
- [25] F. R. Kschischang, B. J. Frey and H. A. Loeliger, "Factor graphs and the sum-product algorithm," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 47, no. 2, pp. 498-519, Feb 2001.
- [26] J. Haghghat, H. Behroozi, and D. V. Plant, "Extended-serial decoding for turbocoded data gathering sensor
- [1] A. Aoudia, M. Gautier and O. Berder, "Distributed Computation of Fair Packet Rates in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 5, pp. 626-629, Oct. 2017.
- [2] C. F. Cheng, L. H. Li and C. C. Wang, "Data Gathering With Minimum Number of Relay Packets in Wireless Sensor Networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 21, pp. 7196-7208, Nov.1, 1 2017.
- [3] S. Ezdiani, I. S. Acharyya, S. Sivakumar and A. Al-Anbuky, "Wireless Sensor Network Softwarization: Towards WSN Adaptive QoS," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, no. 5, pp. 1517-1527, Oct. 2017.
- [4] A. Chelli, M. Bagaa, D. Djenouri, I. Balasingham and T. Taleb, "One-Step Approach for Two-Tiered Constrained Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 448-451, Aug. 2016.
- [5] X. Hu, L. Yang and W. Xiong, "A Novel Wireless Sensor Network Frame for Urban Transportation," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 2, no. 6, pp. 586-595, Dec. 2015.
- [6] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, 2002.
- [7] C. Y. Chong and S. P. Kumar, "Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges," *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 8, pp. 1247-1256, 2003.
- [8] A. J. Goldsmith and S. B. Wicker, "Design challenges for energy-constrained ad hoc wireless networks," *Wireless Commun. Mag.*, vol. 9, no. 4, pp. 8-27, 2002.
- [9] M. Srivastava, D. Culler, and D. Estrin, "Guest editors' introduction: Overview of sensor networks," *Computer*, vol. 37, no. 8, pp. 0041-49, 2004.
- [10] T. Berger, Z. Zhang, and H. Viswanathan, "The CEO problem," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 42, no. 3, pp. 887-902, 1996.
- [11] Y. Oohama, "Multiterminal source coding for correlated memoryless gaussian sources with several side information at the decoder," *Information Theory and Communications Workshop, 1999. Proceedings of the 1999, IEEE, 1999*, p. 100.
- [12] H. Viswanathan and T. Berger, "The quadratic gaussian ceo problem," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 43, no. 5, pp. 1549-1559, 1997.
- [13] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity. part i. system description," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 11, pp. 1927-1938, 2003.

- Consumption Based on Joint Network-Channel Coding in WSNs," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 18, pp. 6119-6128, 15 Sept. 15, 2017.
- [33] N. I. Sulieman and R. D. Gitlin, "Ultra-reliable and energy efficient wireless sensor networks," *2018 IEEE 19th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, Sand Key, FL, 2018, pp. 1-4.
- [34] A. Sachan, S. Nigam and A. Bajpai, "An Energy Efficient Virtual-MIMO Communication for Cluster Based Cooperative Wireless Sensor Network," *2018 9th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, Bangalore, 2018, pp. 1-6.
- [35] A. Kaur and G. Kaur, "Enhanced ECC algorithm for energy efficient code dissemination in wireless sensor network," *2017 4th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, Noida, 2017, pp. 459-462.
- [36] Ayinde, B.O. & Hashim, H.A., "Energy-efficient Deployment of Relay Nodes in Wireless Sensor Networks using Evolutionary Techniques," *Int J Wireless Inf Networks* (2018) 25: 157.
- networks," *Vehicular Technology Conference, 2009.VTC Spring 2009. IEEE 69th. IEEE, 2009*, pp. 1-5.
- [27] T. S. Rappaport, J. N. Murdock and F. Gutierrez, "State of the Art in 60-GHz Integrated Circuits and Systems for Wireless Communications," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 8, pp. 1390-1436, Aug. 2011.
- [28] S. Rappaport *et al.*, "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!," in *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, 2013.
- [29] D. Sui, F. Hu, W. Zhou, M. Shao and M. Chen, "Relay Selection for Radio Frequency Energy-Harvesting Wireless Body Area Network With Buffer," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 1100-1107, April 2018.
- [30] S. Laurindo *et al.* " An Optimized Relay Selection Technique to Improve the Communication Reliability in Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 18, Oct. 2018.
- [31] D. Tran *et al.*, "Performance Analysis of DF/AF Cooperative MISO Wireless Sensor Networks With NOMA and SWIPT Over Nakagami- $m$  Fading," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 56142-56161, 2018.
- [32] X. Liu, W. Li, F. Han and Y. Xie, "An Optimization Scheme of Enhanced Adaptive Dynamic Energy

