

## آشکار سازی تطبیقی بهینه در مخابرات مولکولی با رویکرد مبتنی بر کاهش تداخل بین سمبلی

مهدی جهانگیری<sup>۱</sup>، محمد مصطفوی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه زنجان - Ma.jahangiri@znu.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه زنجان - mmostafavi@znu.ac.ir

### چکیده

در سال‌های اخیر با گسترش علوم در حوزه نانو شاهد به وجود آمدن شاخه جدیدی از مخابرات تحت عنوان مخابرات مولکولی بوده‌ایم. اگر بخواهیم مقایسه‌ای بین مخابرات مولکولی و مخابرات رایج مبتنی بر امواج رادیویی انجام دهیم، باید بگوییم هدف هر دو، ارسال و دریافت پیام است ولی در عمل این دو هیچ شباهتی به یکدیگر ندارند. همانطور که از اسم مخابرات مولکولی برمی‌آید، این نوع از مخابرات شباهت زیادی به فرآیندهای زیستی موجود در طبیعت دارد. مخابرات مولکولی شاخه‌ای بین رشته‌ای است که در آن از علوم مختلفی از جمله مهندسی مخابرات سیستم، مهندسی پزشکی و فناوری نانو استفاده می‌گردد. این نوع از مخابرات برای ارسال و دریافت پیام در مقیاس‌های نانو و میکرو استفاده می‌شود. در مخابرات مولکولی از مولکول‌ها برای ارسال و دریافت پیام استفاده می‌شود. در این پژوهش سناریوی استاتیک در مخابرات مولکولی بررسی شده است. جنبه‌های مهندسی در مخابرات مولکولی، یکی از اهداف اصلی در این پژوهش است که با معرفی انواع تکنیک‌های مدولاسیون، مدل‌های کانال انتشار و تداخل بین سمبلی به آن پرداخته شده است. اثر تداخل بین سمبلی و راه‌های مقابله با آن، با استفاده از یک روش تطبیقی، ارائه شده است. برای بررسی کارایی این روش نیز از معیار نرخ خطای بیت استفاده شده است.

### کلیدواژه

مخابرات مولکولی، نانوماشین، ذرات اطلاعات، تداخل بین سمبلی، انتشار مولکولی

### مقدمه

انجام داده‌اند اما می‌توان گفت حدود یک دهه است که مخابرات مولکولی از دیدگاه مهندسی [۱] به طور جدی مورد بحث واقع شده است.

در هر سیستم ارتباطی هدف انتقال پیام از فرستنده به گیرنده است. بنابراین هر سیستم ارتباطی را به طور کلی می‌توان به سه بخش فرستنده، کانال و گیرنده تقسیم بندی کرد. کانال محیطی است که سیگنال ارسالی یا همان پیام از طریق آن، از فرستنده به گیرنده انتقال می‌یابد. در سیستم‌های مخابراتی مرسوم که مبتنی بر امواج رادیویی هستند، فضای آزاد یا یک سیم می‌تواند نقش یک کانال را ایفا کند که امواج الکترومغناطیسی و جریان به ترتیب سیگنال‌های انتقالی برای عبور از این کانال‌ها هستند. در مخابرات مولکولی ذرات اطلاعات به عنوان سیگنال‌های شیمیایی برای انتقال اطلاعات استفاده می‌شوند. اندازه این ذرات اطلاعات معمولاً در حد نانو یا میکرو است. این ذرات اطلاعات می‌توانند مولکول، پروتئین، باکتری یا

با پیشرفت‌های شگرفی که در سال‌های اخیر در زمینه نانو و زیست‌فناوری به وجود آمده است، شاهد این مسئله بوده‌ایم که طراحی و ساخت دستگاه‌هایی در مقیاس‌های نانو و میکرو در حال تبدیل شدن به واقعیت هستند. با این حال ایجاد ارتباط بین دستگاه‌های مقیاس نانو و میکرو هنوز هم به عنوان یک مشکل در سیستم‌های مهندسی مخابرات وجود دارد. همچنین با وجود پیشرفت‌های قابل توجهی که در سیستم‌های مخابراتی مدرن مبتنی بر امواج رادیویی شاهد آن بوده‌ایم، هنوز هم کاربردهایی وجود دارند که این امواج رادیویی نمی‌توانند پاسخگوی آن‌ها باشند و استفاده از آن‌ها پرهزینه یا دشوار است. با الهام از طبیعت، مخابرات مولکولی می‌تواند یک راه‌حل مناسبی برای پاسخگویی به این مشکلات باشد که در آن از سیگنال‌های شیمیایی برای انتقال اطلاعات استفاده می‌شود. با اینکه سال‌هاست دانشمندان مطالعاتی را بر روی مخابرات مولکولی

ذخیره سازی ذرات اطلاعات لازم است. ممکن است یک مکانیزم وجود داشته باشد که کنترل انتشار ذرات اطلاعات را بر عهده داشته باشد. در نهایت، یک واحد پردازش باید وجود داشته باشد که فرآیندهای مختلف را در فرستنده کنترل کند. واحد پردازش می تواند از لحاظ شیمیایی (به عنوان مثال مسیرهای شیمیایی)، الکتریکی (مانند میکروکنترلر) یا از طریق سایر ابزارها عمل کند. برای راه اندازی، فرستنده ممکن است به یک منبع توان نیاز داشته باشد. به عنوان مثال، فرستنده می تواند یک سلول مصنوعی باشد که توان خودش را از محیط یا از یک منبع الکتریکی می گیرد.

پس از آن که ذرات اطلاعات<sup>۱</sup> انتقالی در کانال آزاد شوند، یک مکانیزم انتشار برای انتقال آن ها به گیرنده ضروری است. این مکانیزم می تواند بر مبنای پخش، جریان یا یک سیستم انتقال مهندسی با استفاده از موتورهای مولکولی باشد. در گیرنده باید یک سنسور، گیرنده بیولوژیکی یا یک آشکارساز باشد که بتواند خصوصیات ورودی ذرات اطلاعات دریافت شده را اندازه گیری کند. این ویژگی می تواند به سادگی وجود یا عدم وجود ذرات اطلاعات، غلظت آن ها، زمان ورود و یا هر پارامتر قابل اندازه گیری دیگر باشد. اگر تکنیک های کدینگ مورد استفاده قرار گیرد، ممکن است نیاز به یک واحد پردازنده مرکزی برای رمزگشایی سیگنال دریافت شده نیز وجود داشته باشد. در نهایت یک منبع توان ممکن است برای عملکرد گیرنده مورد نیاز باشد [۱].

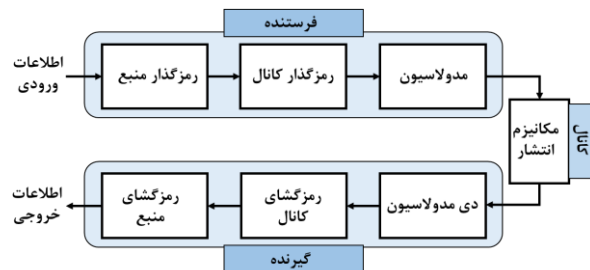
ادامه مقاله به صورت زیر بخش بندی شده است. در بخش دوم جنبه های مهندسی مخابرات مولکولی بررسی می شود. در بخش سوم مدل مخابرات مولکولی مدنظر را بررسی و ارائه می کنیم. بخش چهارم اطلاعاتی در مورد تداخل بین سمبلی در مخابرات مولکولی و نحوه اتفاق افتادن آن را شرح می دهد. در بخش پنجم طرح آشکارسازی تطبیقی بهینه (OAD<sup>۲</sup>) را ارائه خواهیم کرد. در بخش ششم آزمایش ها و نتایج حاصل از آن ها آورده شده است و در بخش هفتم نتیجه گیری ارائه شده است.

### بررسی جنبه های مهندسی مخابرات مولکولی

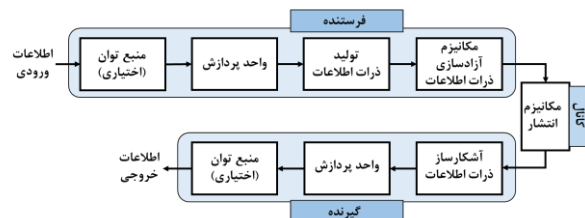
با وجود اینکه مخابرات مولکولی از ابتدای خلقت در طبیعت وجود داشته است، اخیراً سیستم های مخابرات مولکولی مهندسی

حتی ذرات اطلاعات مصنوعی از جمله ذرات نانوپلا باشند. همچنین در مخابرات مولکولی، کانال یک محیط آبی یا گازی است که ذرات اطلاعات می توانند به راحتی در آن پخش شده و انتشار یابند [۱].

در شکل ۱ اجزای یک سیستم مخابراتی مرسوم مبتنی بر امواج رادیویی نشان داده شده است. در بخش فرستنده، ابتدا سیگنال ارسالی از یک رمزگذار منبع عبور کرده و سپس یک رمزگذار کانال سمبل های ارسالی را رمزگذاری می کند. با مدوله کردن پیام، سمبل های ارسالی وارد کانال شده و بعد از عبور از کانال مخابراتی به گیرنده می رسند. هنگامی که سیگنال انتقالی به گیرنده می رسد، گیرنده در ابتدا باید سمبل های کانال را دی مدوله و شناسایی کند. سپس سمبل های کانال تخمین زده شده، با استفاده از یک رمزگشای کانال رمزگشایی می شوند، جایی که برخی از خطاهای ایجاد شده توسط فرستنده، کانال و گیرنده ممکن است اصلاح شوند. خروجی رمزگشای کانال به یک رمزگشای منبع می رود، که در آن گیرنده برآورد می کند که چه اطلاعاتی از فرستنده ارسال شده است. اگر این تخمین درست باشد، ارتباط موفق بوده است.



شکل ۱. بلوک دیاگرام یک سیستم ارتباطی

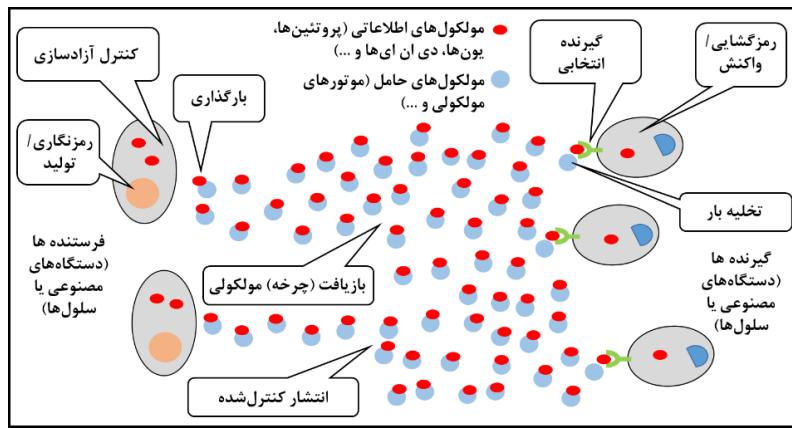


شکل ۲. اجزای فیزیکی مورد نیاز برای مخابرات مولکولی

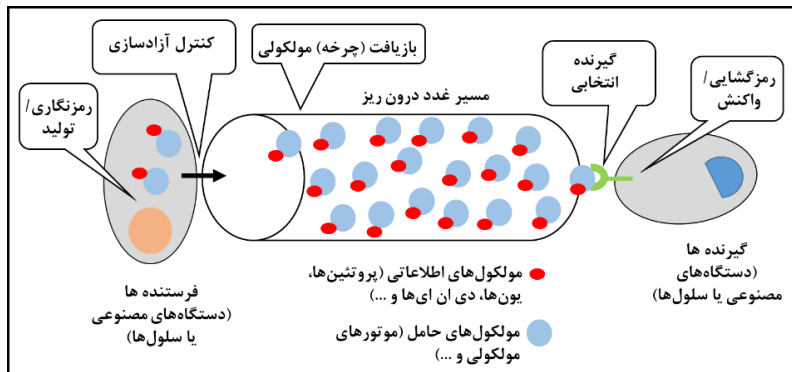
برخی از اجزای فیزیکی که ممکن است برای اجرای سیستم های مخابرات مولکولی مورد نیاز باشد، در شکل ۲ نشان داده شده است. در فرستنده یک فرآیند فیزیکی برای تولید یا

<sup>۲</sup> Optimized Adaptive Detection

<sup>۱</sup> Information Particles



(الف)



(ب)

شکل ۳. مثال‌هایی از سیستم‌های مخابرات مولکولی

طریق محیط، دریافت مولکول‌های حامل یا اطلاعات و همچنین رمزگشایی اطلاعات نمایش داده شده توسط مولکول‌های اطلاعات دریافت شده، علاوه بر این، باز یافت مولکول‌های حامل یا اطلاعات ممکن است برای جلوگیری از انباشت آن‌ها در گیرنده لازم باشد.

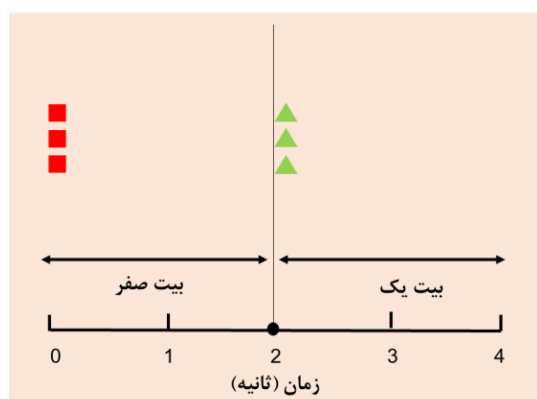
در ادامه می‌خواهیم جنبه‌های مهندسی مخابرات مولکولی را به صورت جزئی‌تر بررسی کنیم. از دیدگاه مهندسی می‌توانیم مخابرات مولکولی را به بخش‌هایی چون تکنیک‌های مدولاسیون، مدل‌های کانال مخابراتی، معماری‌ها و پروتکل‌های شبکه و ابزارهای شبیه‌سازی تقسیم‌بندی کنیم. در زیربخش‌های بعدی هر دسته را بررسی می‌کنیم و مفاهیم اصلی در هر دسته‌بندی را ارائه خواهیم داد.

### تکنیک‌های مدولاسیون

مدولاسیون فرآیند تغییر یک یا چند ویژگی سیگنال حامل براساس سمبل‌های ارسالی است. در اصل، سمبل‌های ارسالی، در تغییرات خواص سیگنال حامل کدگذاری شده و برای ارسال

پیشنهاد شده است [۲]. بنابراین، در مقایسه با سیستم‌های ارتباطی مدرن مبتنی بر ارتباطات رادیویی، مخابرات مولکولی هنوز در دوران کودکی خود به سر می‌برد. برای درک بهتر موضوع، شکل ۳ دو نوع سیستم مخابرات مولکولی را نشان می‌دهد که معمولاً در مرحله اولیه تحقیق‌ها در نظر گرفته می‌شوند. اولین نوع سیستم مخابرات مولکولی یک سیستم بسته و مستقل است که در یک محیط مصنوعی ایجاد شده و بدون کنترل خارجی عمل می‌کند که در شکل ۳ (الف) نشان داده شده است. این نوع سیستم مخابرات مولکولی برای برنامه‌های کاربردی مانند ارتباطات نانوماشین‌ها و محاسبات مولکولی قابل اجرا است. نوع دوم از یک سیستم مخابرات مولکولی یک سیستمی است که در آن از مولکول‌های سیگنال و مسیرهای انتقال سیگنال (مانند هورمون‌ها و انتقال دهنده‌های عصبی) که در یک موجود زنده بیولوژیکی وجود دارد (مانند بدن انسان) استفاده می‌کند. شکل ۳ (ب) معرف این نوع از مخابرات مولکولی است. در هر دو نوع سیستم مخابرات مولکولی، فرآیند ارتباطات شامل: رمزگذاری اطلاعات بر روی مولکول‌های اطلاعات، ارسال مولکول‌های حامل یا اطلاعات به محیط، انتشار مولکول‌های حامل یا اطلاعات از

رمزگذاری یک بیت اطلاعات استفاده کرد، یا ساختار  $DNA^3$  می‌تواند برای رمزگذاری میزان زیادی از داده‌ها استفاده شود. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که برای ارسال بیت صفر از یک نوع مولکول استفاده شده است و برای ارسال بیت یک نوع دیگری از مولکول‌ها استفاده شده‌اند [۵]. این تکنیک مدولاسیون قابل گسترش برای داده‌های M سطحی نیز می‌باشد.



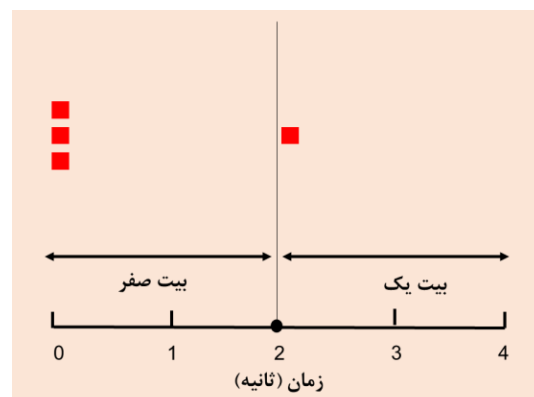
شکل ۵. تکنیک مدولاسیون با استفاده از نوع ذرات

• زمان انتشار: اطلاعات را می‌توان در زمان انتشار ذرات اطلاعات رمزگذاری کرد. رویکرد دیگر مبتنی بر زمان، مدولاسیون موقعیت پالس است که مشابه با  $PPM^4$  در مخابرات نوری است. برای تولید یک پالس، تعداد زیادی از ذرات اطلاعات تقریباً بلافاصله توسط فرستنده در یک زمان خاص آزاد می‌شوند [۶]. شکل ۶ نحوه انجام مدولاسیون با استفاده از زمان انتشار را برای یک داده باینری نشان می‌دهد. در این شکل برای ارسال بیت صفر در زمان صفر اقدام به آزادسازی ذرات اطلاعات می‌نماییم. در صورتی که برای ارسال بیت یک با اعمال یک تاخیر زمانی اندک، اقدام به آزادسازی ذرات می‌کنیم. این تکنیک مدولاسیون هم قابل گسترش برای داده‌های M سطحی نیز می‌باشد، به صورتی که تعداد تاخیرها با افزایش تعداد سطوح مورد نظر افزایش می‌یابد که البته پیچیدگی فرآیند مدولاسیون را نیز افزایش خواهد داد.

یکی از اولین کارهایی که مدولاسیون را در مخابرات مولکولی در نظر گرفت، [۷] بود. در این مقاله نویسندگان دو طرح مختلف مدولاسیون برای کانال‌های انتشار را در نظر گرفتند. در اولین طرح مدولاسیون، یک بیت صفر باینری با غلظت صفر و بیت یک با غلظت M در نظر گرفته شده است. این طرح مدولاسیون شبیه

آماده می‌شوند. در سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم مبتنی بر امواج رادیویی، امواج الکترومغناطیسی حامل اطلاعات هستند. امواج رادیویی سیگنال‌های سینوسی هستند که می‌توانند با دامنه، فرکانس و فاز آن مشخص شوند. دامنه آن از حداکثر ارتفاع سینوسی تأثیر می‌پذیرد؛ فرکانس از تعداد دوره تناوب در هر ثانیه تأثیر می‌پذیرد و فاز از میزان تغییرات از مبدا تأثیر می‌پذیرد. اطلاعات را می‌توان در دامنه، فاز، فرکانس و یا هر ترکیبی از این پارامترها مدوله کرد.

در مخابرات مولکولی، حامل‌های اطلاعات، ذرات اطلاعات بسیار کوچکی (مثلاً مولکول‌ها یا باکتری‌ها) هستند. در طرح‌های مختلف مخابرات مولکولی، اطلاعات را می‌توان در خواص ذرات اطلاعات به صورت ذیل مدوله کرد.



شکل ۴. تکنیک مدولاسیون با استفاده از تعداد ذرات

• تعداد ذرات: اطلاعات را می‌توان در تعداد ذرات اطلاعات منتشر شده رمزگذاری کرد. اگر تعداد ذره‌های اطلاعاتی که آزاد شده‌اند خیلی بزرگ باشد (به عنوان مثال در مقیاس‌های ماکرو)، غلظت (به عنوان مثال تعداد ذرات در واحد حجم) می‌تواند به جای تعداد ذرات استفاده شود [۳]، [۴]. شکل ۴ مدولاسیون داده‌های باینری را با استفاده از تعداد مولکول‌ها نشان می‌دهد. در این طرح مدولاسیون باینری برای مثال برای ارسال بیت صفر از N تعداد مولکول و برای ارسال بیت یک از M تعداد مولکول استفاده می‌کنیم.

• نوع یا ساختار ذرات: این امکان وجود دارد که اطلاعات را در نوع (یا ساختار) ذرات اطلاعات منتشر شده کدگذاری کرد [۳]، [۴]. برای مثال، دو نوع مختلف مولکول را می‌توان برای

<sup>4</sup> Pulse Position Modulation

<sup>3</sup> Deoxy Ribonucleic Acid

یا دوم نشان داده شده است. یکی دیگر از کارهایی که مدولاسیون را بر روی پاسخ انتشار پیوسته سیستم در نظر گرفت، [۸] بود، که در آن اطلاعات در ویژگی‌های پاسخ سیستم کدگذاری شده بودند. نویسندگان عباراتی را برای حداکثر پیک، عرض پیک در نیمه حداکثر و تاخیر حداکثر پیک و همچنین عباراتی برای انرژی پاسخ ضربه ارائه دادند. پس از آن اطلاعات می‌توانند بر روی این ویژگی‌های پالس کدگذاری و آشکارسازی شوند.

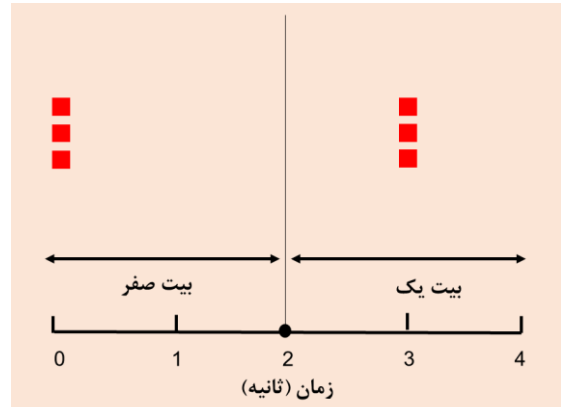
کانال‌های مخابرات مولکولی عموماً دارای حافظه هستند زیرا برخی از ذرات اطلاعاتی که منتشر می‌شوند ممکن است در کانال باقی بمانند و به اسلات‌های زمانی بعدی وارد شوند. بنابراین یکی دیگر از مهمترین مسائل در مخابرات مولکولی، ISI<sup>۱۰</sup> ناشی از ورود با تاخیر مولکول‌ها است. از این رو، تکنیک‌های مدولاسیون نیز باید کاهش آسیب پذیری ISI را در نظر بگیرند. یکی از راه‌های به حداقل رساندن ISI این است که تکنیک‌های مدولاسیون CSK و MoSK را با هم ترکیب کنیم، که در [۹] و به نام MTSK<sup>۱۱</sup> پیشنهاد شده است. نسخه باینری این تکنیک مدولاسیون، دو نوع از ذرات اطلاعات A و B را استفاده می‌کند. با استفاده از این طرح، می‌توان ISI را کاهش داد.

### مدل‌های انتشار کانال

یکی از اساسی‌ترین مدل‌های نظری سیستم ارتباطی، مدل کانال است. به لحاظ فیزیکی، کانال محیطی است که سیگنال ارسالی در سراسر آن پخش می‌شود. از آنجا که مدل‌های کانال نقش مهمی را در طراحی سیستم‌های ارتباطی ایفا می‌کنند، یکی از اولین مشکلاتی که مهندسی مخابرات با آن مواجه بودند، مدل‌سازی و طراحی کانال مخابرات مولکولی بود [۱۰]، [۱۱]. طرح‌های مختلف انتشار برای کانال‌های مخابرات مولکولی امکان پذیر است. بنابراین، برای هر طرح انتشار و تکنیک مدولاسیون، یک مدل کانال متفاوت می‌تواند استخراج شود. در ادامه چند نوع از روش‌های انتشار در مخابرات مولکولی را بررسی می‌کنیم.

- انتشار آزاد: در این روش فرستنده سیلی از مولکول‌ها را وارد محیط می‌کند و آن‌ها را به سمت گیرنده انتشار می‌دهد. حرکت

به طرح OOK<sup>۵</sup> مخابرات مرسوم مبتنی بر امواج رادیویی است که در اینجا هم به همین نام شناخته می‌شود. طرح مدولاسیون OOK یک نمونه ساده‌ای از مدولاسیون با استفاده از تعداد ذرات یا همان غلظت می‌باشد. در طرح دوم، غلظت ذرات اطلاعات براساس یک سیگنال سینوسی با یک فرکانس مشخص متغیر است و فرض می‌شود اطلاعات را می‌توان در دامنه و فرکانس این سیگنال سینوسی رمزگذاری کرد. در [۳] و [۴]، دو طرح جدید مدولاسیون پیشنهاد شده است. یکی بر اساس تعداد مولکول‌ها است، به طوری که سمبل‌های انتقال در تعداد ذره‌های اطلاعاتی که توسط فرستنده منتشر می‌شود، رمزگذاری می‌شوند. این طرح مدولاسیون به نام CSK<sup>۶</sup> نامگذاری شده است. طرح مدولاسیون دوم، مدولاسیون مبتنی بر نوع مولکول است که در آن سمبل‌های انتقال در نوع ذرات اطلاعات منتشر شده رمزگذاری می‌شوند. نویسندگان این طرح مدولاسیون را MoSK<sup>۷</sup> نامیدند و آنها ذرات اطلاعاتی مبتنی بر هیدروفلوئوروکربن<sup>۸</sup> را به عنوان یک مثال برای این نوع مدولاسیون پیشنهاد دادند. اثرات تداخل کانال هم در یک سیستم دو فرستنده و دو گیرنده نیز در کار آن‌ها مورد توجه قرار گرفت.



شکل ۶. تکنیک مدولاسیون با استفاده از زمان انتشار

دو روش مختلف مبتنی بر پالس نیز در [۶] ارائه شده است. مدولاسیون دامنه پالس و مدولاسیون موقعیت پالس. در PAM<sup>۹</sup>، انتقال بیت یک توسط یک پالس در ابتدای بازه بیتی نمایش داده شده و انتقال بیت صفر بدون پالس نمایش داده شده است. در PPM یک فاصله بیت به دو قسمت مساوی تقسیم شده است و انتقال بیت‌های یک و صفر به ترتیب توسط پالس در نیمه اول

<sup>۹</sup> Pulse Amplitude Modulation

<sup>۱۰</sup> Inter Symbol Interference

<sup>۱۱</sup> Molecular Transition Shift Keying

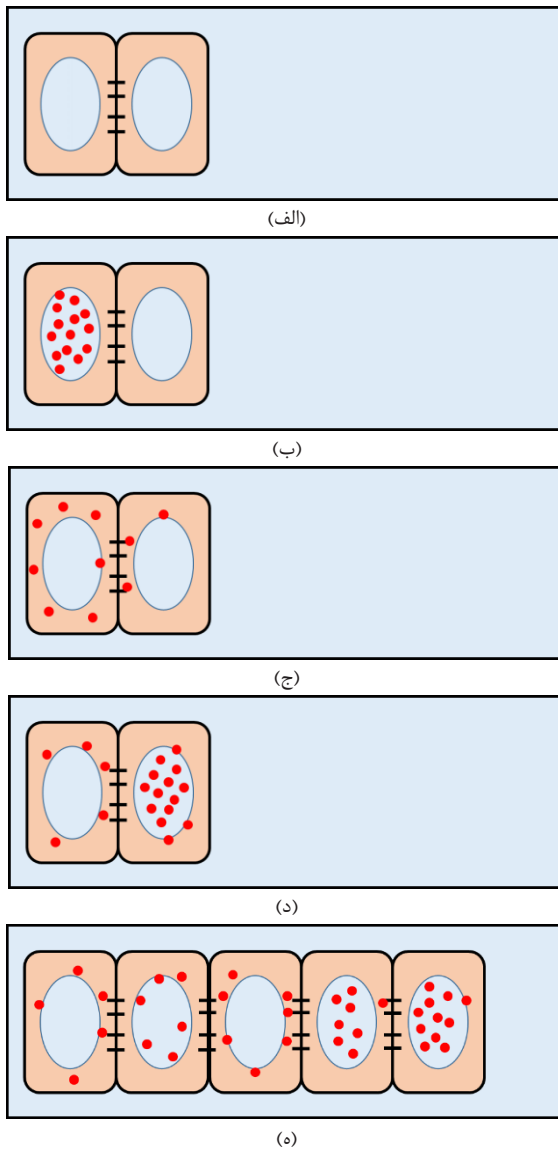
<sup>۵</sup> On-Off-Keying

<sup>۶</sup> Concentration Shift Keying

<sup>۷</sup> Molecular Shift Keying

<sup>۸</sup> Hydrofluorocarbon

در شکل ۸ جزئیات کاملی از مدل انتشاری با استفاده از اتصالات شکافی را برای کانال‌های مخابراتی مشاهده می‌کنید. در این روش سلول‌ها برای انتقال پیام استفاده می‌شوند. همانطور که گفته شد، سلول‌ها با تقویت سیگنال می‌توانند به افزایش کیفیت انتقال کمک کنند.

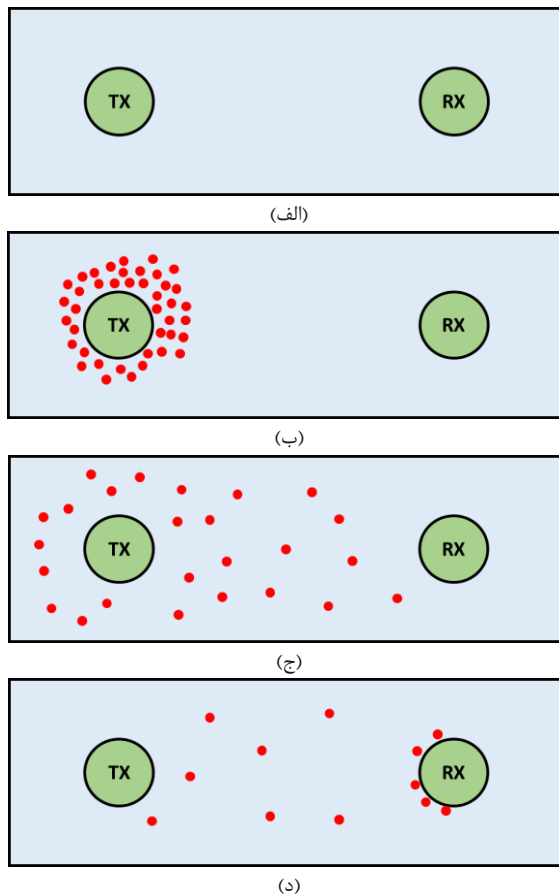


شکل ۸. مراحل مدل انتشار با استفاده از اتصالات شکافی برای کانال مخابرات مولکولی

انتشار با استفاده از موتورهای مولکولی: همانطور که در شکل ۹ دیده می‌شود مولکول اطلاعات در یک ظرف موتور قرار داده می‌شود و این موتور مولکولی در امتداد یک ریل حرکت می‌کند. در طرف گیرنده این ظرف باز شده و مولکول‌های پیام را به گیرنده منتقل می‌کند.

مولکول‌ها کاملاً تصادفی است و ممکن است بعضی از مولکول‌ها به گیرنده نرسند.

در این روش مولکول‌های ارسالی می‌توانند به گیرنده وارد شوند و یا به سطح بیرونی گیرنده بچسبند. طرح کلی این روش در شکل ۷ آورده شده است. در قسمت (الف) یک فرستنده و یک گیرنده در نظر گرفته شده است. در قسمت (ب) مولکول‌های ارسالی توسط فرستنده انتخاب شده و در قسمت (ج) می‌بینیم که این مولکول‌ها در کانال رها شده و به سمت گیرنده حرکت می‌کنند. در شکل ۷ (د) برخی از مولکول‌ها به گیرنده چسبیده و برخی در محیط کانال باقی مانده‌اند که همین مسئله زمینه‌ساز ISI خواهد بود. در بخش‌های بعدی مسائل مربوط به تداخل بین سمبلی را به صورت جزئی‌تر بررسی خواهیم کرد.



شکل ۷. مراحل مدل انتشار آزاد برای کانال مخابرات مولکولی

انتشار با استفاده از اتصالات شکافی: فرستنده در ابتدا مولکول‌های سیگنالی را ایجاد می‌کند. برخی از مولکول‌ها به سلول‌های مجاور انتشار پیدا می‌کنند. در این روش سیگنال می‌تواند در فواصل طولانی انتقال یابد. سلول‌های واسطه به عنوان ایستگاه تقویتی عمل می‌کنند.

خواهد بود. دنباله سمبلی  $\{a_j\}$  که توسط فرستنده مدوله شده است، از طریق فرستنده و به صورت پالس‌های غلظت مولکولی  $S(t)$  به سمت کانال انتشار با پاسخ ضربه  $h(t)$  آزادسازی و منتشر می‌شود. سپس مولکول‌های اطلاعاتی از طریق انتشار در یک محیط آبی پخش و منتشر می‌شوند. بخشی از مولکول‌های اطلاعاتی به گیرنده می‌رسند که غلظت آن‌ها  $x(t)$  است. در گیرنده، یک نویز افزودنی (جمع شونده)  $n(t)$  وجود دارد. نانوماشین گیرنده غلظت مولکول‌های نویزی را که به صورت  $y(t) = x(t) + n(t)$  می‌باشد، برای اندازه‌گیری و آشکارسازی دنباله اطلاعات انتقالی  $\{\hat{a}_j\}$  حس کرده و مورد سنج قرار می‌دهد.

یک فرمول عمومی، به نام معادلات انتشار می‌تواند به طور موثر برای مدل‌سازی انتشار مواد شیمیایی مورد استفاده قرار گیرد. معادله انتشار به ما اجازه می‌دهد تا در مورد حرکات آماری ذرات محرک تصادفی صحبت کنیم. معادله انتشار توسط معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی [۱۲] به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c \quad (1)$$

به طوری که  $\nabla^2$  و  $D$  به ترتیب عملگر لاپلاسین و ضریب انتشار هستند. همچنین  $c$  میزان غلظت در یک زمان خاص است. با حل (۱) با شرایط اولیه مناسب، پاسخ ضربه مورد انتظار کانال انتشار برای مخابرات مولکولی با فاصله ثابت  $d$  به صورت زیر [۱۳] که همان قانون دوم انتشار فیک [۱] می‌باشد، بیان می‌شود:

$$h(t) = \frac{1}{(4\pi Dt)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{d^2}{4Dt}\right) \quad (2)$$

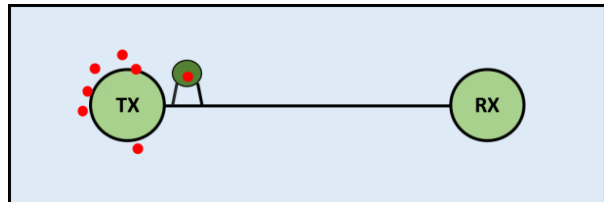
با توجه به رابطه (۲) و برای درک بهتر این رابطه در ادامه شکل ۱۲ را رسم کرده‌ایم. در این شکل یک دنباله ای از سمبل "۱" برای یک فاصله ثابت نشان داده شده است. طول این دنباله برابر ۱۰ می‌باشد و چون فاصله بین فرستنده و گیرنده ثابت می‌باشد میزان غلظت برای تمامی بیت‌ها یکسان خواهد بود.

در این مدل مخابرات مولکولی، از روش مدولاسیون OOK استفاده شده است. ارسال یک بیت "۱" با ارسال پالسی از  $N$  مولکول نمایش داده می‌شود و فرستادن بیت "۰" با ارسال نکردن چیزی نشان داده می‌شود، که رابطه  $S(t)$  به صورت زیر خواهد شد [۷]:

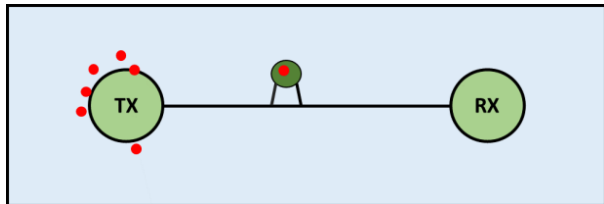
انتشار با استفاده از موتورهای باکتری: سلول‌های باکتری دارای تاژک‌هایی هستند که نیروی محرکه را فعال می‌کنند. در این روش ابتدا فرستنده اطلاعات را به باکتری می‌دهد. باکتری مسیر را می‌پیماید و به سمت گیرنده حرکت می‌کند. این اطلاعات پس از تماس به گیرنده منتقل می‌شود. شکل ۱۰ به خوبی این فرآیند را به نمایش می‌گذارد.



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۹. مراحل مدل انتشار با استفاده از موتورهای مولکولی برای کانال مخابرات مولکولی

در بخش بعدی به طور دقیق‌تر در مورد کانال‌های انتشار و روابط ریاضی مربوط به آن بحث خواهیم کرد و مدلی که برای شبیه‌سازی در این مقاله به کار گرفته شده است را شرح خواهیم داد.

## مدل مخابرات مولکولی

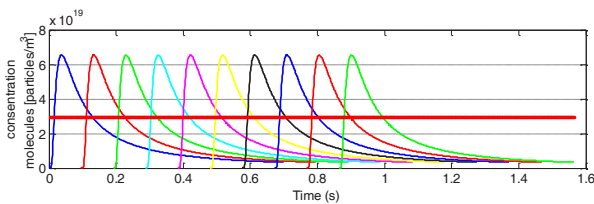
مدل مخابرات مولکولی از طریق انتشار آزاد در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این مدل شامل یک نانوماشین فرستنده، کانال انتشار مولکولی، نویز جمع شونده و گیرنده نانوماشین

به طوری که  $\sigma_c^2(t)$  واریانس نویز خواهد بود و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_c^2(t) = \frac{x(t)}{V_R} \quad (6)$$

بدین صورت که  $V_R = \left(\frac{4}{3}\right)\pi a^3$  حجم فضای دریافت کروی گیرنده است. با اضافه شدن نویز  $n(t)$ ، کل مقدار غلظت دریافتی نویزآلود  $y(t)$  که توسط گیرنده دریافت می‌شود، به صورت زیر خواهد بود:

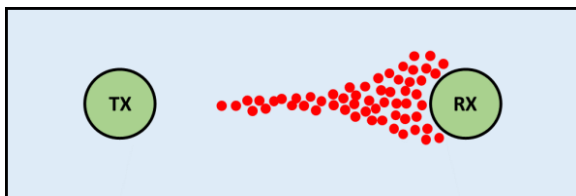
$$y(t) = \sum_{j=0}^{\infty} a_j N h(t - jT_b) + n(t) \quad (7)$$



شکل ۱۲. پاسخ ضربه کانال مخابرات مولکولی با فاصله ثابت ۱۶ میکرومتر برای دنباله ای از ۱۰ بیت "۱"

### بررسی تداخل بین سمبلی در مخابرات مولکولی

مشکل تداخل بین سمبلی در مخابرات همواره از دغدغه‌های مهندسان بوده است. در مخابرات مولکولی ISI ناشی از باقی ماندن مولکول‌های سمبل قبلی در کانال و تداخل با مولکول‌های سمبل فعلی است. همانطور که در شکل ۱۳ دیده می‌شود، یک دم بلندی در انتهای یک سمبل مولکولی که حامل بیت "۱" است، تشکیل شده است. این دم بلند باعث ایجاد تداخل بین سمبلی شده و از آنجا که گیرنده نمی‌تواند مولکول‌های سمبل فعلی را از مولکول‌های باقی مانده از سمبل‌های قبلی تشخیص دهد، تشخیص و آشکارسازی سیگنال تحت تاثیر قرار می‌گیرد و باعث ایجاد خطا در آشکارسازی می‌شود.



شکل ۱۳. دم بلند تشکیل شده از مولکول‌ها در انتقال یک بیت "۱" که منجر به وقوع ISI در مخابرات مولکولی می‌شود

فرض کنیم که نرخ نمونه برداری  $R = \frac{N_s}{T_b}$  باشد، به طوری که  $N_s \in \mathbb{Z}^+$  خواهد بود که این مسئله به این معنی است که

$$s(t) \approx \sum_{j=0}^{\infty} a_j N \delta(t - jT_b) \quad (3)$$

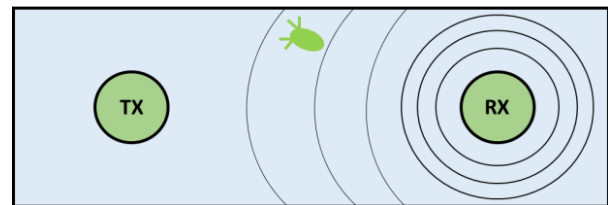
پس از انتشار از طریق کانال انتشار، پاسخ کانال به سیگنال ورودی  $S(t)$  به صورت زیر خواهد بود:

$$x(t) = s(t) * h(t) = \sum_{j=0}^{\infty} a_j N h(t - jT_b) \quad (4)$$

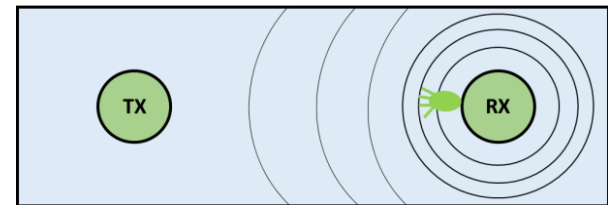
که عملگر کانولوشن است.  $x(t)$  سیگنال غلظت مولکولی بدون نویز در گیرنده است که با اضافه شدن نویز به آن، کل مقدار غلظت دریافتی در گیرنده به دست می‌آید.



(الف)

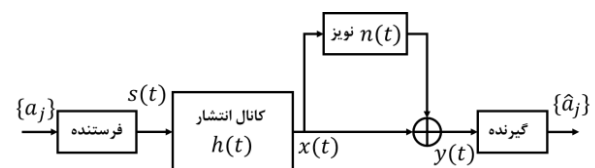


(ب)



(ج)

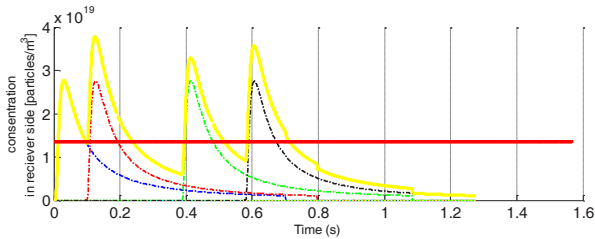
شکل ۱۰. مراحل مدل انتشار با استفاده از موتورهای باکتری برای کانال مخابرات مولکولی



شکل ۱۱. طرح کلی مدل مخابرات مولکولی

نویز شمارش را می‌توان برای اضافه شدن به سیگنال در نظر گرفت. نویز شمارش، خطای شمارش در گیرنده است. این نویز به علت تصادفی بودن مولکول‌ها، در حرکت است [۱۴]. نویز شمارش  $n(t)$  را می‌توان به عنوان یک نویز وابسته به سیگنال و جمع پذیر با میانگین صفر در نظر گرفت [۱۵]، [۱۶]:

$$n(t) \sim \mathcal{N}[0, \sigma_c^2(t)] \quad (5)$$



شکل ۱۴. اثر ISI در مخابرات مولکولی. دنباله سمبل‌های ارسالی [۱۱۰۰۱۰۱] است و فاصله بین فرستنده و گیرنده ثابت و برابر با ۲۰ میکرومتر است. منحنی‌های آبی، قرمز، سبز و سیاه پاسخ ضربه‌های تکی برای هر سمبل "۱" هستند. خط قرمز رنگ حد آستانه برای آشکارسازی است که برابر با نصف ماکزیمم پاسخ ضربه اولین بیت "۱" ارسالی است. سمبل آشکارشده بدون فرآیند کاهش ISI به صورت [۱۱۱۰۱۱۱] خواهد بود که در اینجا ۲ بیت به صورت اشتباه آشکارسازی شده‌اند.

### طرح آشکارسازی تطبیقی بهینه (OAD)

در این بخش یک طرح آشکارسازی تطبیقی بهینه را ارائه خواهیم داد. هدف از طرح پیشنهادی، غلبه بر مشکل ناشی از ISI در مخابرات مولکولی است تا یک راه حل برای آشکارسازی درست ارائه شود.

طرح پیشنهادی شامل یک روش کاهش تطبیقی ISI است که در شکل ۱۵ نشان داده شده است. ابتدا نمونه‌ها توسط گیرنده دریافت می‌شوند. سپس، گیرنده بررسی می‌کند که آیا سمبل "۱" در دنباله سمبل آشکار شده‌ی پیشین منتشر شده است یا خیر. اگر سمبل "۱" آشکارسازی نشده باشد، به صورت مستقیم از نمونه‌ها برای آشکارسازی استفاده می‌کنیم. به محض اینکه اولین بیت "۱" به گیرنده می‌رسد، دیگر نمی‌توانیم از داده‌ها به صورت مستقیم برای آشکارسازی استفاده کنیم و باید ISI موجود در سیگنال را حذف نماییم. این مسئله در نهایت بر تشخیص و آشکارسازی سیگنال تأثیر می‌گذارد و باعث نرخ خطای بیت بالا یا حتی شکست در تشخیص و آشکارسازی می‌شود. بنابراین، برای آشکارسازی دقیق، کاهش ISI قبل از فرآیندهای دیگر اجرا خواهد شد. در ادامه روش OAD را برای کاهش ISI و آشکارسازی دقیق‌تر سیگنال دریافتی ارائه خواهیم کرد.

ما  $N_s$  نمونه در هر فاصله سمبلی  $T_b$ ، با فاصله نمونه برداری  $T_s = \frac{T_b}{N_s}$  می‌گیریم. سیگنال نمونه برداری شده به صورت زیر خواهد بود:

$$y_k = N \sum_{j=0}^{\infty} a_j h_{k-jN_s} + n_k \quad (8)$$

که  $h_{k-jN_s} = h(kT_s - jN_sT_s)$ ،  $y_k = y(kT_s)$  و  $n_k = n(kT_s)$  با شاخص نمونه‌برداری  $k = 0, 1, \dots, \infty$  است. برای  $k - jN_s < 0$ ، داریم  $h_{k-jN_s} = 0$ . پس رابطه (۸) می‌تواند مجدداً ساده شود:

$$y_k = N \sum_{j=0}^{\lfloor k/N_s \rfloor} a_j h_{k-jN_s} + n_k \quad (9)$$

که  $\lfloor \alpha \rfloor$  معرف کوچکترین عدد صحیح بلافاصله قبل از  $\alpha$  است. اگر غلظت مولکول سمبل فعلی را از سیگنال‌های ISI سمبل‌های پیشین جدا کنیم، رابطه (۹) می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$y_k = N a_{\lfloor k/N_s \rfloor} h_{k-\lfloor k/N_s \rfloor N_s} + n_k + N \sum_{j=0}^{\lfloor k/N_s \rfloor - 1} a_j h_{k-jN_s} \quad (10)$$

به طوری که جمله اول غلظت مولکول سمبل فعلی است و جمله دوم سیگنال ISI ناشی از سمبل‌های پیشین خواهد بود. برای وضوح بیشتر رابطه (۱۰) را به صورت زیر بیان می‌کنیم:

$$y_{current,k} = N a_{\lfloor k/N_s \rfloor} h_{k-\lfloor k/N_s \rfloor N_s} \quad (11)$$

$$y_{ISI,k} = N \sum_{j=0}^{\lfloor k/N_s \rfloor - 1} a_j h_{k-jN_s} \quad (12)$$

گیرنده نمی‌تواند  $y_{current,k}$  را از  $y_k$  تشخیص دهد، که باعث تشخیص سیگنال نادرست می‌شود. این پدیده با یک فاصله ثابت در شکل ۱۴ نشان داده شده است. دنباله سمبل ارسالی [۱۱۰۰۱۰۱] است. منحنی‌های خط نقطه‌چین آبی، قرمز، سبز و سیاه پاسخ ضربه‌های تکی برای هر سمبل هستند. منحنی زرد، مجموع غلظت دریافت شده با در نظر گرفتن اثر ISI است. نویز در اینجا گنجانده نشده است، زیرا ما می‌خواهیم صرفاً اثر ISI را برجسته کنیم. سمبل‌های سوم و ششم به علت اثر ISI اشتباهاً به صورت "۱" شناسایی و آشکارسازی می‌شوند، لذا باید با ارائه یک طرح آشکارسازی مناسب ISI را کاهش داده و نرخ خطای بیت را کاهش داد تا آشکارسازی به صورت مطلوب انجام پذیرد.

$$z_k \approx y_{current,k} \quad (16)$$

بنابراین از  $Z_k$  می‌توان برای آشکارسازی استفاده نمود. همچنین اگر نسبت سیگنال به نویز به اندازه کافی بزرگ نباشد، در صورت استفاده از سیستم‌های  $MIMO^{12}$  [۱۸] نیز رابطه (۱۶) می‌تواند به دست آید.

روش آشکارسازی تطبیقی بهینه (OAD) در این مقاله برای آشکارسازی سیگنال دریافتی اجرا شده است. این الگوریتم به صورت مونت کارلو و با تعداد تکرار ۵ بار شبیه‌سازی شده تا نتایج به دست آمده قابل اعتمادتر باشند. در این روش قاعده تصمیم‌گیری به صورت زیر است:

$$\hat{a}_j = \begin{cases} 1, & \max(z_k) \geq \gamma_{th} \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (17)$$

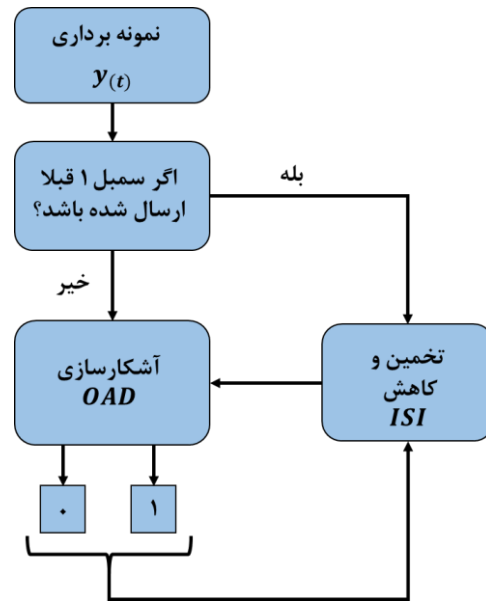
که  $k \in \mathbb{Z}^+$  و  $jN_s \leq k < (j+1)N_s$  خواهد بود. از طرفی حداکثر  $(z_k)$  همان حداکثر غلظت در بازه  $\lambda_m$  است. آستانه است. آستانه  $\gamma_{th}$  به عنوان نیمی از مقدار پیک پاسخ ضربه کانال با فاصله  $d$  تنظیم می‌شود.  $\hat{a}_j$  مقدار سمبل آشکار شده در بازه  $\lambda_m$  است.

### نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی کمی عملکرد طرح آشکارسازی OAD، نرخ خطای بیت به عنوان معیار عملکرد [۱۹] استفاده می‌شود. برای  $N_{tr}$  سمبل منتقل شده،  $N_e$  سمبل توسط گیرنده اشتباه آشکارسازی می‌شوند و نرخ خطای بیت به صورت رابطه (۱۸) در زیر تعریف می‌شود:

$$BER = \frac{N_e}{N_{tr}} \quad (18)$$

نرخ خطای بیت پایین‌تر و کمتر نشان دهنده عملکرد بهتر است. نتایج شبیه‌سازی در ادامه نشان داده شده است. نرخ خطای بیت در این نتایج، نشان‌دهنده نرخ خطای بیت تمام دنباله است. طول دنباله سمبلی از ۱۰۰۰ بیت تا ۱۰۰۰۰ بیت با یک گام ۱۰۰۰ بیتی تغییر می‌کند. نمودارهای فرمز رنگ نرخ خطای بیت بدون استفاده از الگوریتم حذف ISI را نشان می‌دهند، در حالی که نمودارهای آبی‌رنگ نرخ خطای بیت آشکارسازی با استفاده از



شکل ۱۵. طرح کلی آشکارسازی تطبیقی بهینه OAD

برای حل مشکل تداخل بین سمبلی، در محاسبه ISI، از اطلاعات آخرین سمبل "۱" استفاده می‌کنیم و با استفاده از تخمینی که در رابطه (۱۳) در نظر گرفته شده است، تداخل بین سمبلی یا همان ISI را بدست می‌آوریم [۱۷].

$$\hat{y}_{ISI,k} = N \sum_{j=0}^{\lfloor k/N_s \rfloor - 1} a_j h_{*,k-jN_s} \quad (13)$$

که \* نشانگر آخرین سمبل "۱" است. طبق رابطه (۱۴) با کم کردن ISI از سیگنال  $y_k$ ، نمونه‌هایی بدون وجود ISI خواهیم داشت که می‌توان از آن‌ها برای آشکارسازی استفاده کرد.

$$\begin{aligned} z_k &= y_k - \hat{y}_{ISI,k} \\ &= y_{current,k} + y_{ISI,k} - \hat{y}_{ISI,k} + n_k \end{aligned} \quad (14)$$

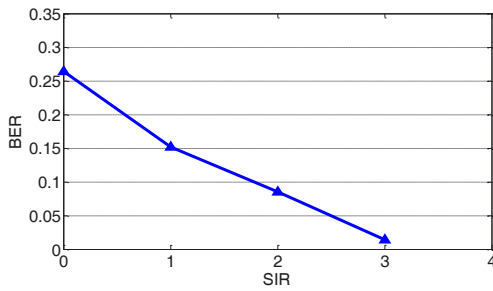
به طوری که  $\hat{y}_{ISI,k}$  سیگنال ISI تخمین زده شده است. اگر تخمین به اندازه کافی خوب باشد، سیگنال کاهش ISI داده شده  $z_k$  می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$z_k = y_{current,k} + n_k \quad (15)$$

برای تمرکز بر روی تجزیه و تحلیل ISI فرض می‌شود که نسبت سیگنال به نویز به اندازه کافی بزرگ است، به این معنی که نویز کوچک است. پس خواهیم داشت:

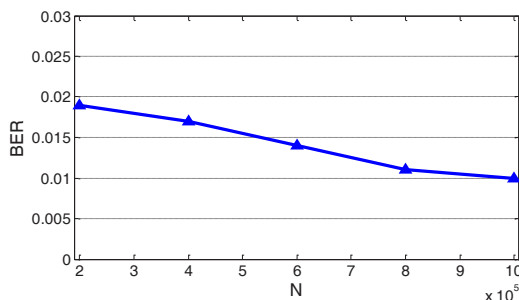
<sup>12</sup> Multiple Input and Multiple Output

شکل ۱۹ نمودار نرخ خطای بیت بر حسب تعداد بیت‌هایی که ISI آن‌ها بعد از آخرین بیت "۱" دریافتی کم شده است را برای ۱۰۰۰۰ بیت ارسالی نشان می‌دهد. بدین صورت که بدون حذف تداخل بین سمبلی، نرخ خطای بیت بیش از ۲۵ درصد خواهد بود. با حذف ISI از یک، دو و سه بیت، بعد از آخرین بیت "۱" دریافتی، نرخ خطای بیت به ترتیب ۱۵، ۸ و ۱ درصد خواهد شد.



شکل ۱۹. نمودار میانگین نرخ خطای بیت بر حسب تعداد بیت‌هایی که ISI آن‌ها بعد از آخرین بیت "۱" دریافتی کم شده است

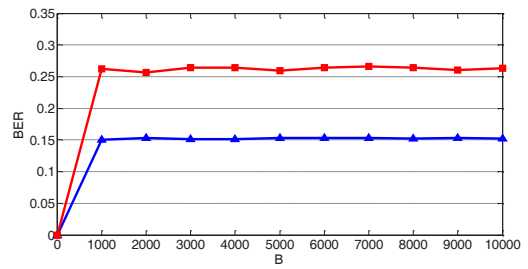
همانطور که گفته شد، در مدولاسیون OOK برای ارسال بیت "۱"، N مولکول آزاد می‌شود. در شکل ۲۰ تاثیر تعداد مولکول‌های آزاد شده برای بیت "۱" بر روی میزان نرخ خطای بیت را مشاهده می‌کنید. در این نمودار تعداد مولکول‌های آزاد شده را از ۲۰۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰۰ مولکول افزایش داده‌ایم و دیده می‌شود که نرخ خطای بیت با افزایش مقدار N، کاهش می‌یابد. می‌توان به این موضوع اشاره کرد که با افزایش N، کیفیت سیگنال یا به عبارت دیگر SNR افزایش می‌یابد و با افزایش SNR، صحت سیگنال بهبود یافته و نرخ خطای بیت کاهش می‌یابد.



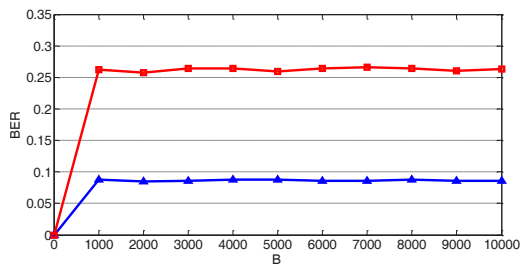
شکل ۲۰. تاثیر تعداد مولکول‌های آزاد شده برای بیت "۱" بر روی میزان نرخ خطای بیت

فاصله بین فرستنده و گیرنده یکی از عوامل موثر بر روی نرخ خطای بیت یا همان BER خواهد بود. شکل ۲۱ اثر فاصله بین فرستنده و گیرنده بر روی میزان نرخ خطای بیت را نمایش

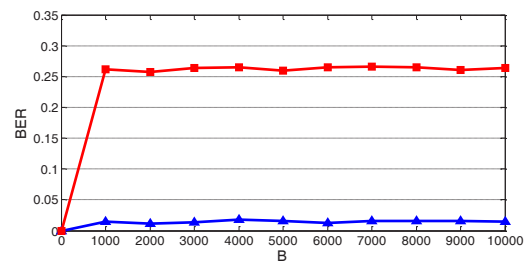
الگوریتم OAD را نمایش می‌دهند. در شکل ۱۶ فقط از یک بیت بعدی، بعد از آخرین بیت "۱" دریافتی کم شده است.



شکل ۱۶. تاثیر تعداد بیت‌های ارسالی بر روی میزان نرخ خطای بیت با حذف ISI فقط از یک بیت بعدی بعد از آخرین بیت "۱" دریافتی همچنین در شکل ۱۷، میزان ISI از دو بیت بعدی، بعد از آخرین بیت "۱" دریافتی کم شده است. در این شکل نرخ خطای بیت در حدود ۰/۰۸ است. نرخ خطای بیت به میزان قابل توجهی کم شده است ولی هنوز هم نیاز به بهبود حس می‌شود.



شکل ۱۷. تاثیر تعداد بیت‌های ارسالی بر روی میزان نرخ خطای بیت با حذف ISI از دو بیت بعدی بعد از آخرین بیت "۱" دریافتی در پایان، در شکل ۱۸، میزان ISI از سه بیت بعدی، بعد از آخرین بیت "۱" دریافتی کم شده است. نرخ خطای بیت از ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ متغیر است و این نشان می‌دهد که عملکرد الگوریتم OAD قابل قبول بوده است. برای مثال در ۱۰۰۰۰ بیت، نرخ خطای بیت ۰/۱۴۴ است، که نشان دهنده فقط ۱۴۴ بیت نادرست ارسالی از میان ۱۰۰۰۰ بیت ارسالی است که رقم قابل قبولی است.



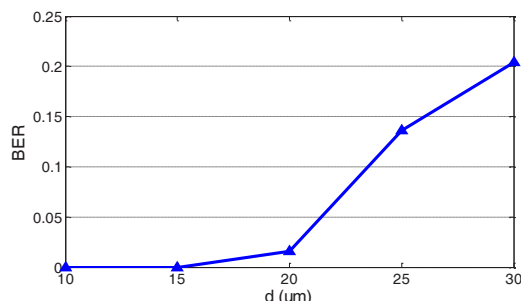
شکل ۱۸. تاثیر تعداد بیت‌های ارسالی بر روی میزان نرخ خطای بیت با حذف ISI از سه بیت بعدی بعد از آخرین بیت "۱" دریافتی

مشکل تداخل بین سمبلی یا همان ISI، ما از اضافه کردن نویز خودداری کردیم. در ادامه بحث‌های مربوط به تداخل بین سمبلی و نحوه مقابله با آن مطرح شد. روش OAD برای آشکارسازی بیت‌های دریافتی استفاده شد که در بخش پنجم به صورت کامل توضیح داده شد. از معیار نرخ خطای بیت برای سنجش عملکرد آشکارسازی تطبیقی بهینه استفاده شده است و نتایج قابل قبولی به دست آمد که در بخش ششم به آن‌ها اشاره گردید.

## مراجع

- [1] Farsad, N., Yilmaz, H. B., Eckford, A., Chae, C. B., & Guo, W. "A comprehensive survey of recent advancements in molecular communication", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 3, 1887-1919, 2016.
- [2] Hiyama, S., Moritani, Y., Suda, T., Egashira, R., Enomoto, A., Moore, M., & Nakano, T. "Molecular communication", Journal-Institute of Electronics Information and Communication Engineers, 89 no. 2, 162, 2006.
- [3] Kuran, M. S., Yilmaz, H. B., Tugcu, T., & Akyildiz, I. F. "Modulation techniques for communication via diffusion in nanonetworks", In 2011 IEEE international conference on communications (ICC) (pp. 1-5). IEEE, June 2011.
- [4] Kuran, M. Ş., Yilmaz, H. B., Tugcu, T., & Akyildiz, I. F. "Interference effects on modulation techniques in diffusion based nanonetworks", Nano Communication Networks, vol. 3 no. 1, 65-73, Mars 2012.
- [5] Kim, N. R., & Chae, C. B. "Novel modulation techniques using isomers as messenger molecules for nano communication networks via diffusion", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 31, no. 12, pp. 847-856, 2013.
- [6] N. Garralda, I. Llatser, A. Cabellos-Aparicio, E. Alarcón, and M. Pierobon, "Diffusion-based physical channel identification in molecular nanonetworks," Elsevier Nano Communication Networks, vol. 2, no. 4, pp. 196-204, December 2011.
- [7] M. U. Mahfuz, D. Makrakis, and H. T. Mouftah, "On the characterization of binary concentration-encoded molecular communication in nanonetworks," Elsevier Nano Communication Networks, vol. 1, no. 4, pp. 289-300, December 2010.
- [8] I. Llatser, A. Cabellos-Aparicio, M. Pierobon, and E. Alarcón, "Detection techniques for diffusion-based molecular communication," IEEE Journal on Selected Areas in

می‌دهد. در این شکل همانطور که مشاهده می‌نمایید، فاصله را از ۱۰ میکرومتر تا ۳۰ میکرومتر تغییر داده‌ایم. همانطور که انتظار می‌رود با افزایش فاصله بین فرستنده و گیرنده، نرخ خطای بیت افزایش می‌یابد.



شکل ۲۱. تاثیر فاصله بین فرستنده و گیرنده بر روی میزان نرخ خطای بیت. فاصله‌ها بر حسب میکرومتر هستند

جدول ۱ پارامترهای شبیه‌سازی مورد استفاده در نرم‌افزار متلب را در این مقاله نمایش می‌دهد. در این جدول پارامترهایی همچون طول دنباله سمبلی یا همان تعداد بیت‌های ارسالی، ضریب انتشار مولکول‌های اطلاعاتی ارسالی، تعداد مولکول‌هایی که در مدولاسیون OOK برای ارسال بیت "۱" استفاده شده‌اند، فاصله ثابت بین فرستنده و گیرنده و غیره که در این مقاله استفاده شده‌اند، آورده شده است.

جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی

مقادیر	نماد	پارامترهای شبیه‌سازی
$10^4$	$B$	طول دنباله سمبلی
$2.2 \times 10^{-9}$	$D$	ضریب انتشار
$3 \times 10^6$	$N$	تعداد مولکول‌ها
$20 (\mu m)$	$d$	فاصله بین فرستنده و گیرنده
$96 (ms)$	$T_b$	فاصله سمبلی
$6 (ms)$	$T_s$	گام نمونه‌برداری
16	$N_s$	تعداد نمونه در هر فاصله سمبلی

## نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش آشکارسازی تطبیقی بهینه ارائه شده است. در ابتدا بیت‌های ارسالی توسط مدولاسیون OOK مدوله شدند و از کانال مخابراتی موردنظر که از قانون دوم انتشار فیک به دست آمده است، عبور داده شدند. نویز شمارش برای اضافه شدن به سیگنال عبوری از کانال می‌توانست مورد استفاده قرار گیرد که روابط آن آورده شده است ولی برای بررسی دقیق‌تر

- [15] B. Li, M. Sun, S. Wang, W. Guo, and C. Zhao, "Local convexity inspired low-complexity noncoherent signal detector for nanoscale molecular communications", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 5, pp. 2079–2091, June 2016.
- [16] A. Singhal, R. K. Mallik, and B. Lall, "Performance analysis of amplitude modulation schemes for diffusion-based molecular communication", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 10, pp. 5681–5691, June 2015.
- [17] Chang, G., Lin, L., & Yan, H. "Adaptive detection and ISI mitigation for mobile molecular communication", *IEEE Transactions on nanobioscience*, vol. 17, no. 1, pp. 21-35, December 2017.
- [18] B. H. Koo, C. Lee, H. B. Yilmaz, N. Farsad, A. Eckford, and C. B. Chae, "Molecular MIMO: From theory to prototype", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 3, pp. 600–614, March 2016.
- [19] A. Aijaz and A.-H. Aghvami, "Error performance of diffusion-based molecular communication using pulse-based modulation", *IEEE transactions on nanobioscience*, vol. 14, no. 1, pp. 146–151, June 2015.
- [9] B. Tepekule, A. E. Pusane, H. B. Yilmaz, and T. Tugcu, "Energy efficient ISI mitigation for communication via diffusion," *IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, pp.33–37, 2014.
- [10] A. W. Eckford, "Nanoscale communication with brownian motion," *41st Annual Conference on Information Sciences and Systems*, pp.160–165, 2007.
- [11] B. Atakan and O. B. Akan, "An information theoretical approach for molecular communication", *2nd Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems*, pp. 33–40, 2007.
- [12] J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*, 2nd edition Oxford University Press, 1975.
- [13] D. Kilinc and O. B. Akan, "Receiver design for molecular communication", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 12, pp. 705–714, December 2013.
- [14] M. Pierobon and I. F. Akyildiz, "Diffusion-based noise analysis for molecular communication in nanonetworks", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 6, pp. 2532–2547, June 2011.

