

## الگوریتم شکل دهی پرتو در کدهای فرکانس- زمان- فضا (STFBF) برای دست یابی به مرتبه کامل چندگانگی و بهبود کیفیت مخابره

منصور نجاتی جهرمی<sup>۱\*</sup>، مهسا شریفزاده<sup>۲</sup>، امیرمهدی سازدار<sup>۳</sup>

۱- استادیار، ۳- کارشناس ارشد، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، ۲- کارشناس ارشد دانشگاه آزاد اسلامی- واحد تهران جنوب  
(دریافت: ۹۷/۱۲/۰۶، پذیرش: ۹۸/۰۳/۲۵)

### چکیده

استفاده از سامانه‌های مخابراتی با نرخ داده بالا همراه با کیفیت خدمات مطلوب، زیرساخت یک سامانه فرماندهی و کنترل (C4I) است که در شرایط بحران باید با بهترین کیفیت مخابره، مورد استفاده قرار گیرد. به کارگیری چنین ساختاری در سامانه‌های پدافندی نوین از موضوعات تحقیقاتی بسیار مهم است. از آنجاکه افزایش پهنای باند و یا توان ارسالی به منظور افزایش نرخ داده، راه کاری پرهزینه و گاهی غیر عملی است، استفاده از سامانه‌های تقسیم فرکانسی متعامد چند ورودی/چند خروجی (MIMO-OFDM) به یکی از فن‌آوری‌های اصلی سامانه‌های مخابراتی نسل چهارم تبدیل شده است. به تازگی روش‌های کدینگ فرکانس-زمان-فضا (STF) برای بهبود بهره چندگانگی توسعه یافته است. این مقاله با استفاده از ترکیب روش شکل دهی پرتو و STF به تجزیه و تحلیل MIMO-OFDM می‌پردازد. روش پیشنهادی STFBF که ترکیب این دو روش است، از لحاظ نرخ خطای بیت نسبت به STF بدون شکل دهی پرتو، عملکرد بهتری دارد و همچنین الگوی پیشنهادی نسبت به ترکیب روش شکل دهی پرتو و روش کد بلوکی زمان-فضا (STBC) نیز عملکرد بهتری دارد.

**کلیدواژه‌ها:** کدینگ فرکانس-زمان-فضا (STF)، سامانه چند ورودی/چند خروجی، تقسیم فرکانسی متعامد، شکل دهی پرتو، مرتبه چندگانگی

## Frequency-Time-Space Beam Forming (STFBF) Algorithm to Achieve Full-Order Multiplicity and Improve Transmission Quality

M. Nejati Jahromi<sup>\*</sup>, M. Sharifzade, A. M. Sazdar

Shahid Sattary Aeronautical University of Science and Technology  
(Received: 25/02/2019; Accepted: 15/06/2019)

### Abstract

Using the high-speed data communication systems, along with the quality of service desirable, is the infrastructure of a command and control system (C4I) that should be used in the worst case scenario with the best transmission quality. The use of such a structure in the new defensive systems is very important research topics. As bandwidth increase to increase data rates is costly and sometimes impractical, the use of the orthogonal frequency division multiplexing systems (MIMO-OFDM) The main technology has become the 4G systems. Because of this, multi-channel systems in wireless systems are used to improve the transmission quality and high-speed telecommunication data, and recently, Frequency-Time-Space Coding (STF) methods have been developed to improve multiplicity interest. The purpose of this paper is to analyze the MIMO-OFDM using a combination of beam shaping and STF techniques. The proposed STFBF method, which combines these two methods, performs better in terms of bit error rates than STF without beamforming and the proposed model is better than the combination of beamforming method and time-space block method (STBC).

**Keywords:** Space-Time -Frequency (STF) Coding, Multi-Input Multi-Output System, Orthogonal Frequency Division, Beam Shaping, Multiplicity Order

## ۱. مقدمه

تلفیق دو روش پتانسیل روبرویی با نیاز شدید به 4G/LTE به افزایش نرخ داده بالا و پوشش وسیع را دارد [۳-۲].

در لینک داده شبکه<sup>۱۲</sup> که در عملیات‌های امروزی استفاده می‌شود (لینک ۱۱، لینک ۱۶ یا لینک ۲۲)، عملاً سامانه‌های آفندی و پدافندی در حلقه‌های مختلف و مرتبط با فرماندهی به صورت مجزا و توسعه یافته کار می‌کنند و تنوع دایورسیتی در آن‌ها به صورت متنوع (فضایی، زمانی، فرکانسی، کدی و آنتنی) به طور کامل مورد استفاده است. به کارگیری این روش منجر به افزایش قابلیت اطمینان و کیفیت شبکه و انجام موفق عملیات می‌شود.

## ۲. پیشینه تحقیق

فن‌های بسیاری برای رسیدن به چندگانگی مرتبه کامل توسط کانال MIMO انجام شده است. کدگذاری فضا-زمان (ST) از چندگانگی فضایی فراهم شده توسط تعداد آنتن‌های مخابراتی بهره می‌برد [۴]. اما، کانال‌های فرکانس‌گزين، بُعد دیگری از چندگانگی را فراهم می‌سازند. بنابراین، کدبندی STF و کدبندی SF برای بهره‌گیری از چندگانگی پیشینه فراهم شده توسط کانال‌های فرکانس‌گزين MIMO انجام شده‌اند [۵]. در مقابل با فن‌های تسهیم فضایی که هدف اصلی آن‌ها فراهم‌سازی نرخ‌های بیت بالاتر در مقایسه با سامانه‌های تک-ورودی تک-خروجی (SISO)<sup>۱۳</sup> است، فن‌های چندگانگی به طور برجسته باهدف بهبود کارکرد خطا شکل می‌گیرند. این امر بر اساس بهره چندگانگی و بهره کدگذاری انجام می‌پذیرد. هنگامی که فن‌های چندگانگی به همراه طرح کدگذاری کانال مدولاسیون تطبیقی به کار گرفته شوند، می‌توانند به طور غیرمستقیم برای تقویت نرخ‌های بیت نیز مورد استفاده قرار بگیرند [۶].

آقای چو [۷] یک استراتژی شکل‌گیری پرتو جدید را برای سامانه‌های چند کاربری پیشنهاد کرد که مشتمل بر  $N$  آنتن مخابره در سمت فرستنده و  $M \leq N$  آنتن‌های گیرنده تک آنتنی می‌باشند. طرح پیشنهادی<sup>۱۴</sup> STFBF در دسترس‌های چندگانه تقسیم فضایی کلاسیک بهتر شده و به همان نرخ داده‌های مشابه با تسهیم فضایی برای تمام کاربران اما با بهره چندگانگی کارکرد بسیار بالاتر می‌رسد. در مقایسه با سامانه فضا-زمان لایه‌ای آزمایشگاه بل، نرخ نماد<sup>۱۵</sup> آن مشابه بوده و عملکرد آن به سبب بهره چندگانگی، بسیار بالاتر است. آقای فلچر [۸] کارکرد طرح کدگذاری توربو فرکانس-فضا کارآمد پهنای باند را در سرتاسر کانال‌های با باند وسیع مطالعه کرد. وی نتایج را برای کانال‌های

در سامانه‌های<sup>۱</sup> MIMO-OFDM کاربران می‌توانند از ابعاد فضا و فرکانس و همچنین زمان، در ارسال داده استفاده نمایند و امکان بهره‌برداری هم‌زمان را از چندگانگی فضایی، فرکانسی و چند کاربری خواهند داشت. چالش‌های امروزی در سامانه‌های مخابرات بی‌سیم با توجه به محدودیت‌های پهنای باند و پدیده‌های انتشاری مثل محوشودگی<sup>۲</sup> و تداخل<sup>۳</sup>، بالا بردن بازده کیفی و قابلیت اطمینان<sup>۴</sup> سامانه است. برای این منظور فناوری مختلفی چون فناوری MIMO-OFDM مطرح شده است که با ایجاد بهره چندگانگی<sup>۵</sup> و بهره تسهیم<sup>۶</sup> و با غلبه بر پدیده چندمسیری<sup>۷</sup>، افزایش نرخ ارسال، بازده طیفی<sup>۸</sup> و قابلیت اطمینان لینک را به دنبال خواهد داشت. کدهای فرکانس-فضا (SF)<sup>۹</sup>، زمان-فضا (ST)<sup>۱۰</sup> و فرکانس-زمان-فضا (STF)<sup>۱۱</sup> باهدف افزایش دسترسی چندگانه در سامانه‌های MIMO-OFDM به کار می‌روند.

سامانه‌های MIMO به صورت گسترده در ارتباطات با شبکه‌های بی‌سیم که دلیل آن انتقال سرعت داده‌های بالا و دستیابی به چندگانگی فضایی در محوشودگی محیط STF است، مورد استفاده قرار می‌گیرند. چندگانگی، یک فن کارآمد برای روبرویی با محوشودگی و افزایش قابلیت اطمینان مخابره‌ها از طریق کانال‌های بی‌سیم است زیرا نسخه مستقل چندگانه‌ای را از سیگنال مخابره شده در گیرنده فراهم می‌سازد. اثرات متضاد محیط انتشار پیام بی‌سیم، با به کارگیری سامانه‌های مخابراتی چند-ورودی چند-خروجی کاهش قابل توجهی می‌یابند. سامانه‌های MIMO به دلیل اینکه می‌توانند به وسیله درجات آزادی فضایی ایجاد شده توسط آنتن‌های چندگانه، افزایش چشمگیری در راندمان طیفی ایجاد نمایند، بسیار مورد توجه واقع شده‌اند [۱].

سامانه‌های MIMO با استفاده از OFDM، فعالانه برای تقاضای فزاینده اخیر به مخابرات با سرعت بالا یا سامانه‌های آتی ارتباطات از راه دور مورد بررسی قرار گرفته‌اند. MIMO می‌تواند ظرفیت و چندگانگی را بالا ببرد در حالی که OFDM اثرات زیان‌آور را به سبب محوشودگی چندمسیره کاهش می‌دهد و

<sup>1</sup> Multi-Input Multi-Output Orthogonal Frequency Division Multiplexing

<sup>2</sup> Fading

<sup>3</sup> Interference

<sup>4</sup> Reliability

<sup>5</sup> Diversity Gain

<sup>6</sup> Multiplexing Access Gain

<sup>7</sup> Multipath

<sup>8</sup> Spectral Efficiency

<sup>9</sup> Space Frequency

<sup>10</sup> Space Time

<sup>11</sup> Space Time Frequency

<sup>12</sup> Network Datalink

<sup>13</sup> Single Input Single Output

<sup>14</sup> Frequency-Time-Space Beam Forming (FTSBF)

<sup>15</sup> Symbol Rate

بررسی حذف آنالوگ‌ها برای دست‌یابی به دوپلر کامل برای یک سامانه MIMO-OFDM پرداخت. از این پدیده مرتبه کامل دوپلر برای شبکه بی‌سیم MIMO و همچنین از روش OFDM استفاده می‌شود. یانگ نان [۱۷] در سال ۲۰۱۶ به بررسی الگوریتم تخمین کانال مشترک از طریق هموتوپ<sup>۳</sup> و وزن برای سامانه گسترده MIMO-OFDM پرداخت. در سال‌های اخیر با رشد روزافزون ارتباطات چندرسانه‌ای شامل صوت، تصویر و داده در شبکه‌های کامپیوتری مانند اینترنت و افزایش تقاضا برای استفاده از سرویس‌های موبایل، سعی می‌شود سامانه‌هایی طراحی شود که برای ارسال نرخ بیت بالا بر روی کانال‌های همراه با فیدینگ، بازدهی مناسبی داشته باشند. یک گزینه بسیار مناسب برای شبکه‌های بی‌سیم پزرفیت، مدولاسیون چندحاملی<sup>۴</sup> و به‌ویژه فن OFDM است. حالت خاصی از سامانه‌های چندحاملی وجود دارد که در آن اطلاعات با نرخ بیت بالا به چند دسته موازی با نرخ بیت‌های پایین‌تر تفکیک می‌شوند و هرکدام به‌وسیله زیرحامل‌های مختلف مدوله می‌شوند. انگیزه اصلی استفاده از OFDM، مقاومت این سیستم در کانال‌های چندمسیره است. به علت کاهش نرخ بیت مربوط به هر زیرحامل نسبت به نرخ بیت اصلی، دوره زمانی سمبل افزایش می‌یابد، درحالی‌که دوره زمانی سیگنال تداخل، ثابت است. بنابراین تداخل بین سمبلی یا ISI کاهش یافته و در نتیجه کارایی سیستم در کانال‌های چندمسیره بهبود می‌یابد. ارسال موازی اطلاعات و تقسیم فرکانس یا FDM که ایده اولیه آن به دهه ۱۹۵۰ برمی‌گردد، به‌طور مشخص در دهه ۱۹۶۰ مطرح شده و مورد توجه قرار گرفت. برخلاف دیگر سامانه‌های چندحاملی، در فن OFDM حامل‌ها برهم عمود هستند. تعامد حامل‌ها باعث می‌شود حامل‌های مختلف علی‌رغم اینکه در حوزه فرکانس همپوشانی دارند، در گیرنده از یکدیگر قابل تفکیک باشند. مزیت این روش بازدهی طیفی بیشتر بوده و به همین دلیل مورد توجه قرار گرفته است. در سال ۱۹۷۱ وینستون [۱۸] ایده استفاده از تبدیل فوریه گسسته را برای پیاده‌سازی OFDM مطرح کرد که تحولی اساسی در کاهش پیچیدگی سیستم ایجاد کرد.

قدم مهم دیگر توسط پلد [۱۹] در سال ۱۹۸۰ برداشته شد که استفاده از پسوند تکرار یا گسترش تکرار را جهت حل مشکل تعامد حامل‌ها ارائه داد که، بهره مرتبه چندگانگی را با معرفی MIMO به سامانه تقسیم فراوانی متعامد از پیش کد شده منظومه غیرخطی<sup>۵</sup> (NCP-OFDM) موجود با گروه‌بندی زیرحامل، تقویت می‌سازد ولی این امر تحت تأثیر پیچیدگی

MIMO با پهنای باند شبیه‌سازی شده و مشتمل بر دو آنتن مخابراتی و متجاوز از دو آنتن گیرنده به نمایش گذاردند. در کدگذاری ST، مزیت چندگانگی قابل حصول بیشینه، برابر با حاصل ضرب تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده است. کدهای STF می‌توانند مرتبه‌ای از چندگانگی که معادل با حاصل ضرب تعداد آنتن‌های فرستنده، تعداد آنتن‌های گیرنده و تعداد tap یا اتصال وسط در کانال‌های مستقل است، به دست دهند [۹].

استراتژی کدگذاری STF با کدگذاری بلوک OFDM چندگانه برای آنتن‌های مخابراتی متعددی پیشنهاد شده است [۱۰]. آقای گونگ [۲] روش کدگذاری STF را در کانال‌های MIMO-OFDM معرفی نمود. المحمود [۵] یک روش کدگذاری STF را ارائه داد که ایده انتشار فرکانس را بسط داده و چگونگی انتشار نمادها را در میان چندین مخابرات بلوک OFDM برای تفکیک کامل آن‌ها در گیرنده نشان می‌دهد. گوان [۱۱] از مدل همبستگی نمایی استفاده کرده و با تلفیق شکل‌گیری پرتو با طرح کد، بلوک فضا-زمان<sup>۱</sup> (STBC)، BER تئوریک را پیشنهاد می‌کند.

شرای وستاوا [۱۲] رویکردی را برای پیوند دادن زمان بندی و شکل‌گیری پرتو که از شرایط تعامد کاربرهای برنامه‌ریزی شده با کاهش بازخورد بهره می‌گیرد را پیشنهاد کرد. الگوریتم حاصل بر مبنای بازخورد SINR بیشینه و شاخص پرتو متناظر آن است. زانگ [۱۳] به یک سامانه سلولی توجه خود را معطوف می‌دارد که در آن از فن MIMO-OFDM و شکل‌گیری پرتو استفاده شده است. آن‌ها رویکرد مبتنی بر شکل‌گیری پرتو متعامد تصادفی تکراری و همبستگی بین زیرحاملی که از شرایط تعامد کاربر برنامه‌ریزی شده با کاهش بازخورد استفاده می‌کند، در پیش گرفتند. چانگ [۱۴] از شکل‌گیری پرتو تصادفی<sup>۲</sup> به سبب بازخورد کمتر و سادگی آن استفاده کرد هرچند کارکرد آن ضعیف‌تر از سایر طرح‌های شکل‌گیری پرتو متعامدی است که از اطلاعات کانالی کامل استفاده می‌کنند.

سورندار [۱۵] در سال ۲۰۱۶ به بررسی سامانه MIMO-OFDM از پیش کد شده منظومه غیرخطی با پیچیدگی کم و بهره چندگانگی بالا با گروه‌بندی زیرحامل پرداخت. کدهای مجزای فاصله بیشینه مبتنی بر فن چندگانگی فضای سیگنال غیرخطی، انعطاف‌پذیری در طراحی کانال‌های چندگانگی و مرتبه‌های چندگانگی را فراهم می‌سازند. با این حال، در تجربه‌های واقعی، این مرتبه‌های چندگانگی تنها می‌توانند به‌وسیله افزایش اندازه منظومه به‌درستی تقویت شوند. لی [۱۶] در سال ۲۰۱۵ به

<sup>3</sup> Homotopy<sup>4</sup> Multicarrier Modulation<sup>5</sup> Nonlinear Constellation Precoding (NCP) -OFDM<sup>1</sup> Space-Time Block Code (STBC)<sup>2</sup> Random Beamforming (RBF)

مؤثری از پهنای باند استفاده می‌کنند بسیار مورد توجه قرار داده است. سیگنال‌های نمایی مختلط زمان-محدود  $\{e^{j2\pi f_k t}\}_{k=0}^{K-1}$  را که نشان‌دهنده زیرحامل‌های مختلف در  $f_k = \frac{k}{T_s}$  در سیگنال OFDM هستند را برای  $0 \leq t \leq T_s$  در نظر می‌گیریم. این سیگنال‌ها نسبت به هم متعامد تعریف می‌شوند اگر [۲۰]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} e^{j2\pi f_k t} e^{-j2\pi f_i t} dt \\ = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} e^{j2\pi \frac{(k-i)}{T_s} t} dt \\ = \delta[k-i] \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن،  $\delta[p]$  تابع دلتای دیراک<sup>۶</sup> است. تعامد یک شرط اساسی برای سامانه‌های OFDM است. ویژگی تعامد در OFDM این امکان را می‌دهد که زیرحامل‌ها به‌گونه‌ای کنار هم قرار گیرند که باندهای کناری<sup>۷</sup> زیرحامل‌های مجاور با یکدیگر هم‌پوشانی داشته باشند ولی دریافت سیگنال در گیرنده بدون اثر تداخل بین‌حاملی<sup>۸</sup> باشد. این ویژگی، موجب صرفه‌جویی هرچه بیشتر در پهنای باند ارسالی برای یک نرخ داده مشخص نسبت به دیگر سامانه‌های تسهیم تقسیم فرکانسی (FDM)<sup>۹</sup> می‌شود. به همین دلیل گفته می‌شود که OFDM به شکل بسیار کارایی از پهنای باند در دسترس استفاده می‌کند [۲۰].

در فرستنده OFDM بیت‌های ارسالی پس از تصویر بر روی سمبل‌های یک مدولاسیون خطی مانند QAM یا PSK، از طریق میدل S/P به K رشته موازی تبدیل شده و سپس هر کدام بر روی یک زیرحامل ارسال می‌شود. سیگنال زمان پیوسته<sup>۱۰</sup> OFDM باند پایه<sup>۱۱</sup> به‌صورت زیر بیان می‌شود [۲۰ و ۲۱]:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{K-1} S[n, k] e^{j2\pi f_k (t - nT_s)} \quad (4)$$

که در آن،  $S[n, k]$  سمبل ارسالی  $n$ ام در زیرحامل  $k$ ام است. با نمونه‌برداری از  $s(t)$  از  $t = nT_s + l \frac{T_s}{K}$  که  $l = 0, 1, \dots, K-1$ ، سیگنال زمان گسسته OFDM در سمبل ارسالی  $n$ ام در زیرحامل  $k$ ام بدین صورت می‌باشد [۲۰ و ۲۱]:

$$s[n, l] = \sum_{k=0}^{K-1} S[n, k] e^{j2\pi k \frac{l}{K}} \quad (5)$$

رابطه بالا در حقیقت عکس تبدیل فوریه گسسته (IDFT)<sup>۱۲</sup>

K نقطه‌ای سمبل‌های ارسالی است. بنابراین، فرستنده OFDM را می‌توان با استفاده از IDFT پیاده‌سازی کرد و به همین شکل

کدگذاری احتمالی بیشینه (ML)<sup>۱</sup> است که با تعداد آنتن‌ها به‌طور نمایی افزایش پیدا می‌کند. با فرض این‌که ماهیت کانال شبه استاتیک باشد، از آن برای کاهش پیچیدگی توسط معرفی کدهای بلوکی فضا-زمان (STBC) استفاده می‌کنیم.

### ۳. مبانی روش پیشنهادی

#### ۳-۱. سامانه چند-ورودی/خروجی

طراحی الگوریتم‌های مؤثر مخابراتی و شناخت محدودیت‌های موجود در عملکرد سامانه‌های MIMO، بررسی کانال MIMO را از اهمیت بالایی برخوردار کرده است. ماتریس کانال متغیر با زمان یک سامانه MIMO با  $M$  آنتن فرستنده و  $N$  آنتن گیرنده در باند پایه به‌صورت زیر بیان می‌شود [۶]:

$$H(t, \tau) = \begin{bmatrix} h_{11}(t, \tau) & \dots & h_{1M}(t, \tau) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1}(t, \tau) & \dots & h_{NM}(t, \tau) \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن، المان  $i$  و  $z$  کانال MIMO،  $h_{ij}(t, \tau)$  پاسخ ضربه متغیر با زمان کانال موجود بین آنتن فرستنده  $z$ -ام و آنتن گیرنده  $i$ -ام در باند پایه است. سیگنال دریافتی در آنتن گیرنده  $i$ -ام در باند پایه عبارت است از [۶]:

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^M h_{ij}(t, \tau) s_j(t) + n_i(t), \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

که در آن  $s_j(t)$  سیگنال ارسالی از آنتن فرستنده  $z$ -ام بوده و  $n_i(t)$  نویز جمع شونده در آنتن گیرنده  $i$ -ام می‌باشد. هر المان کانال MIMO دارای ماهیت آماری بوده و معمولاً به‌صورت فرآیند تصادفی گوسی مختلط با تقارن دایروی<sup>۲</sup> و میانگین صفر در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، اندازه هر المان کانال MIMO دارای توزیع رایلی<sup>۳</sup> و فاز آن دارای توزیع یکنواخت<sup>۴</sup> است. به‌دست آوردن ماکزیمم بهره چندگانگی فضایی، نا همبستگی بین المان‌های کانال MIMO را لازم می‌دارد. بدین منظور علاوه بر داشتن شرایط انتشار غنی در محیط همه، فاصله آنتن‌ها نیز باید به‌اندازه کافی بزرگ باشد که معمولاً فاصله‌ای به‌اندازه  $\lambda/2$  برای رسیدن به این مقصود کفایت می‌کند. در این حالت المان‌های کانال MIMO دارای توزیع مستقل یکنواخت (i.i.d)<sup>۵</sup> می‌باشند و چندگانگی فضایی از مرتبه  $M \times N$  حاصل می‌شود.

#### ۳-۲. سامانه تقسیم فرکانسی متعامد

فراهم آوردن نرخ داده‌ی بالا به‌عنوان یک چالش کلیدی در سامانه‌های مخابرات بی‌سیم، استفاده از فن‌هایی را که به‌صورت

<sup>6</sup> Dirac Delta Function

<sup>7</sup> Side Bands

<sup>8</sup> Inter Carrier Interference

<sup>9</sup> Frequency Division Multiplexing

<sup>10</sup> Continuous Time

<sup>11</sup> Baseband

<sup>12</sup> Inverse Discrete Fourier Transform

<sup>1</sup> Maximum Likelihood (ML)

<sup>2</sup> Circularly Symmetric Complex Gaussian Stochastic Process

<sup>3</sup> Rayleigh Distribution

<sup>4</sup> Uniform Distribution

<sup>5</sup> Independent Identically Distributed

OFDM مخبره با نرخ داده بالا همراه با پوشش وسیع را ممکن می‌کند. یک سامانه MIMO-OFDM با تعداد  $M_t$  آنتن فرستنده و  $M_r$  آنتن گیرنده و همچنین  $N$  زیرحامل را در نظر می‌گیریم. با در نظر گرفتن محوشدگی کانال‌های فرکانسی بین  $i$  امین آنتن فرستنده  $g$  امین آنتن گیرنده (هر جفت آنتن فرستنده و گیرنده)، که با پیشوند چرخشی  $L$  (تعداد تأخیرهای مسیر) مدل می‌کنیم.  $h_{i,g}^n$  بیانگر مؤلفه کانال فرکانس‌گزين بين  $i$  امین آنتن فرستنده و  $g$  امین آنتن دریافتی در بازه زمانی  $n$  ام است که مطابق رابطه (۸) تعریف شده می‌شود [۱۰].

$$\left[ h_{i,g}^n(0), h_{i,g}^n(1), h_{i,g}^n(2), \dots, h_{i,g}^n(L-1) \right]^T \quad (8)$$

در رابطه (۱) عملگر ترانهاده است. در اینجا کانال MIMO در طول یک زیرحامل OFDM ثابت است اما مقدار آن می‌تواند از یک زیرحامل OFDM تا زیرحامل دیگر تغییر کند، همچنین یک سامانه OFDM با تعداد  $N$  زیرحامل در نظر گرفته شده است که دارای کدینگ STF از  $M_t$  آنتن فرستنده و  $M_r$  آنتن گیرنده و  $N$  زیرحامل OFDM است. هر کلمه کد STF از یک مجموعه سمبل‌های ارسال شده توسط  $M_t$  آنتن فرستنده با تعداد بازه سمبل‌های OFDM ( $M_x$ ) و تعداد زیرحامل‌های  $N$  تشکیل شده است. در هر فرکانس، حامل  $k$  ام ماتریس هر کلمه به صورت رابطه (۹) است [۱۰]:

$$S(k) = \begin{bmatrix} S_1^1(k) & S_1^2(k) & \dots & S_1^{M_t}(k) \\ S_2^1(k) & S_2^2(k) & \dots & S_2^{M_t}(k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{M_x}^1(k) & S_{M_x}^2(k) & \dots & S_{M_x}^{M_t}(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

به طوری که هر  $S(k)$  یک کد بلوک فضا-زمان است. اولین شرط برای رسیدن به چندگانگی کامل سامانه این است که  $(M_x \geq M_t)$  باشد. در مدل از  $S_{ii}^i(K)$  به عنوان یک سمبل ارسال شده در  $k$ -امین زیرحامل از  $i$  امین آنتن فرستنده در طول  $n$  امین سمبل OFDM استفاده می‌شود. در آنتن دریافتی سیگنال دریافتی  $y_n^g(k)$  پس از حذف پیشوند چرخشی و اعمال تابع تبدیل فوریه سریع (FFT) در  $g$ -امین آنتن گیرنده در  $n$  امین سمبل ارسالی از رابطه (۱۰) به دست می‌آید [۱۰].

$$y_n^g(k) = \sum_{i=1}^{M_t} H_{i,g}(k) s_n^i(k) + p_n^g(k) \quad (10)$$

به طوری که  $H_{i,g}(k)$  یک مرتبه کانال از  $k$  امین حامل و از  $i$  امین آنتن گیرنده به  $g$  امین آنتن فرستنده می‌باشد و همچنین  $p_n^g(k)$  نویز گوسی مختلط دایروی با میانگین صفر و واریانس  $N_0$  است. به علاوه  $H_{i,g}(k)$  از رابطه (۱۱) به دست می‌آید [۱۰].

گیرنده OFDM می‌تواند با استفاده از DFT<sup>۱</sup> ساخته شود. الگوریتم‌های FFT<sup>۲</sup> و IFFT<sup>۳</sup> یک روش با پیچیدگی محاسباتی کم برای DFT و IDFT ارائه می‌دهند. الگوریتم FFT، تعداد عملیات مختلط مورد نیاز برای یک DFT  $K$  نقطه‌ای را از  $K^2$  به  $\frac{K}{2} \log\left(\frac{K}{2}\right)$  کاهش می‌دهد. بنابراین، پیاده‌سازی OFDM با کمک FFT بسیار ساده است.

برای مقابله با پخش زمانی کانال<sup>۴</sup> که منجر به برهم زدن تعامد بین زیرحامل‌ها و در نتیجه افت عملکرد در سامانه‌های OFDM می‌شود، معمولاً از یک پیشوند چرخشی<sup>۵</sup> (CP) در سامانه‌های OFDM استفاده می‌شود. سیگنال OFDM ارسالی که به آن CP اضافه شده طبق رابطه زیر تعریف می‌گردد [۲۰]:

$$s_{cp}(t) = \begin{cases} s(t), & 0 \leq t \leq T_s \\ s(t+T_s), & -T_g \leq t \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

در رابطه بالا  $T_g$  زمان پیشوند چرخشی و  $T = T_g + T_s$  کل زمان بلوک OFDM است. برای جلوگیری از تداخل بین سمبل‌ها باید زمان  $T_g$  از بیشینه پخش زمانی کانال ( $\tau_m$ ) بیشتر باشد. یک سیگنال OFDM که شامل  $K$  زیرحامل است را نشان می‌دهد. پهنای باند سیگنال تقریباً برابر  $(K+1)\Delta f$  است و  $\Delta f = \frac{1}{T_s}$  پهنای فرکانسی هر زیرحامل می‌باشد. از آنجایی که نرخ ارسال هر زیرحامل  $\frac{1}{T}$  سمبل بر ثانیه می‌باشد، نرخ ارسال کل سمبل OFDM برابر  $\frac{K}{T}$  است. بنابراین، کارایی پهنای باند در یک سامانه OFDM عبارت است از [۲۲]:

$$\eta = \frac{K/T}{(K+1)\Delta f} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K} + \frac{T_g}{T_s}} \quad (7)$$

واحد  $\eta$  سمبل بر ثانیه بر هر هرتز می‌باشد. در بسیاری از سامانه‌های OFDM،  $K \gg 1$  و  $T_g \ll T$  می‌باشد و بنابراین،  $\eta \approx 1$  و کارایی پهنای باند بسیار بالاست.

### ۳-۳ ترکیب دو سامانه MIMO-OFDM

با توجه به اینکه MIMO و OFDM هر دو فن‌هایی جهت افزایش نرخ داده هستند، ترکیب این دو فن کارایی پهنای باند سامانه مخابراتی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، با استخراج چندگانگی فضایی توسط سامانه‌های MIMO (به‌ویژه ترکیب کارآمد چندگانگی‌های زمانی، فرکانسی و فضایی) و ترکیب آن با فن

<sup>1</sup> Discrete Fourier Transform

<sup>2</sup> Fast Fourier Transform

<sup>3</sup> Inverse Fast Fourier Transform

<sup>4</sup> Channel Delay Spread

<sup>5</sup> Cyclic Prefix

است و  $v_i$  نیز نویز جمعی در گیرنده  $i$  ام است.

بردارهای بهینه شکل‌دهی پرتو به گونه‌ای طراحی می‌شوند که علاوه بر بیشینه نمودن تابع هدف که در اینجا سیگنال به تداخل و نویز<sup>۱</sup> یا SINR است، تابع هزینه را نیز کمینه نمایند. هدف اصلی بردار بهینه شکل‌دهی پرتو، بیشینه نمودن توان سیگنال دریافتی توسط کاربر مطلوب و کمینه نمودن توان نویز و اختلال سیگنال سایر کاربران هست. سیگنال دریافتی کابل  $i$  ام را می‌توان به صورت رابطه (۱۵) نمایش داد [۲۳]:

$$y_i = h_i^H w_i s_i + h_i^H \sum_{K \neq i} w_k s_k + v_i \quad (15)$$

در این صورت با فرض وجود آمارگان مرتبه دوم کانال، SINR کاربر  $i$  ام برابر است با [۲۳]:

$$\text{SINR}_i = \frac{w_i^H R_i w_i}{\sum_{k \neq i} w_k^H R_i w_k + \sigma_i^2} \quad (16)$$

که  $R_i$  نشان‌دهنده ماتریس کوواریانس کانال از فرستنده ایستگاه پایه تا کاربر  $i$  ام است. سیگنال‌های داده، غیر وابسته در نظر گرفته می‌شوند.

### ۳-۴. فن شکل‌دهی پرتو در گیرنده و فرستنده

وجود چند آنتن در سامانه‌های MIMO برای آن‌ها درجه آزادی به وجود می‌آورد که به سامانه امکان ارسال دنباله‌های مستقل داده را در یک فرکانس بدون ایجاد تداخل قابل توجه میان دنباله‌های داده برای سامانه فراهم می‌نماید [۲۳].

در شبکه‌ای بی‌سیم با کاربران متحرک هر کاربر در ارتباط رو به بالا می‌تواند به عنوان یک آنتن ارسال در یک ارتباط نقطه به نقطه سامانه MIMO در نظر گرفته شود. در این صورت یک ساختار گیرنده مشابه MIMO، قابلیت تفکیک سیگنال‌های ارسالی کاربران مختلف را دارد. چنین ساختاری را شکل‌دهی پرتو در طرف گیرنده می‌نامند. راهبرد مشابهی را نیز برای ارتباط رو به پایین (هنگامی که رو به ایستگاه پایه) داده‌ای مستقل برای کاربران متفاوت ارسال می‌نماید قابل استفاده می‌باشد.

در این حالت با وجود این که آنتن‌های گیرنده متعلق به کاربران متفاوت است و بنابراین، نمی‌تواند از ساختار گیرنده MIMO استفاده کرد، اما با استفاده از دوگانگی میان ارتباط رو به بالا و ارتباط رو به پایین می‌توان چنین ارتباطی را به یک ارتباط رو به بالا مجازی تبدیل کرد و شکل‌دهی پرتو متناظر را معین نمود. که مدل باند پایه سامانه تغییرناپذیر با زمان ارتباط رو به بالا به صورت زیر می‌باشد [۲۳]:

$$H_{i,g}(k) = \sum_{i=0}^{L-1} h_{i,g}^n(1) e^{-j(2\pi/N)ik} \quad (11)$$

وجود چند آنتن در سامانه‌های MIMO به سامانه امکان ارسال دنباله‌های مستقل داده را در یک فرکانس، بدون ایجاد تداخل قابل توجه میان دنباله‌های داده را فراهم می‌نماید [۲۳].

در شبکه بی‌سیم با کاربران متحرک، هر کاربر در ارتباط رو به بالا می‌تواند به عنوان یک آنتن ارسال در یک ارتباط نقطه به نقطه سامانه MIMO در نظر گرفته شود. در این صورت یک ساختار گیرنده مشابه MIMO، قابلیت تفکیک سیگنال‌های ارسالی کاربران مختلف را دارد. چنین ساختاری را شکل‌دهی پرتو در طرف گیرنده می‌نامند. استراتژی مشابهی را نیز برای ارتباط رو به پایین (هنگامی که رو به ایستگاه پایه) داده‌ای مستقل برای کاربران متفاوت ارسال می‌نماید قابل استفاده است. در این حالت، به دلیل اینکه آنتن‌های گیرنده متعلق به کاربران متفاوت است، نمی‌توان از ساختار گیرنده MIMO استفاده کرد، اما با استفاده از دوگانگی میان ارتباط رو به بالا و ارتباط رو به پایین می‌توان چنین ارتباطی را به یک ارتباط رو به بالای مجازی تبدیل کرد و شکل‌دهی پرتو متناظر را معین نمود. مدل باند پایه سامانه تغییرناپذیر با زمان ارتباط رو به بالا به صورت رابطه (۱۲) است [۲۳]:

$$y = \sum_{i=1}^N h_i s_i + w \quad (12)$$

که در آن،  $y$  سیگنال دریافتی از آنتن‌ها در طرف گیرنده ایستگاه اصلی است و  $s_i$  سیگنال ارسالی از کاربر  $i$  ام و  $N$  تعداد کاربران است و  $w$  نشانگر نویز دسته‌جمعی مستقل در اطراف گیرنده است. بردار  $h_i$  نشانگر بردار بهره کانال از کاربر  $i$  ام تا آنتن گیرنده است. بردار  $h_i$  اثر فضایی کاربر  $i$  ام نامیده می‌شود. گیرنده در طرف ایستگاه پایه بر اساس بردارهای متفاوت اثر فضایی کاربران، قادر به تفکیک کاربران می‌باشد. به طور مشابه شکل‌دهی پرتو در طرف فرستنده نیز در ایستگاه پایه جهت ارسال داده به کاربران مختلف قابل استفاده است. در صورتی که هر کاربر دارای یک آنتن باشد، بردار سیگنال‌های ارسالی به صورت رابطه (۱۳) خواهد بود [۲۳]:

$$x = \sum_{i=1}^N w_i s_i \quad (13)$$

که در آن،  $s_i$  و  $w_i$  به ترتیب سیگنال ارسالی به سمت کاربر  $i$  ام و  $i$  امین بردار شکل‌دهی پرتو است. در این صورت سیگنال دریافتی توسط کاربر  $i$  ام برابر است با [۲۳]:

$$y_i = h_i^H x + v_i \quad (14)$$

که  $h_i$  نشان‌دهنده بردار بهره کانال بین فرستنده و کاربر  $i$  ام

<sup>1</sup> Signal To Interference And Noise Ratio (SINR)

با این فرض توان سیگنالی ارسالی در فرستنده برابر است با [۲۳]:

$$P_T = \sum_{i=1}^N w_i^H w_i \quad (22)$$

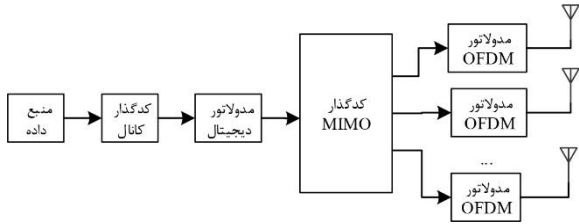
به‌طور کلی بلوک دیاگرام فرستنده و گیرنده MIMO-OFDM می‌توان به‌صورت شکل (۱) نشان داد.

#### ۴. روش پیشنهادی

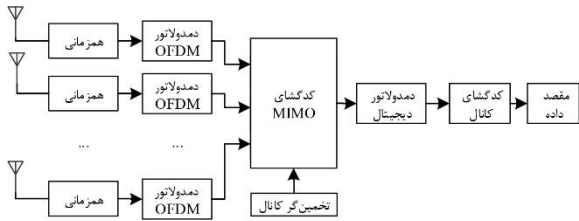
برای بهره‌گیری از چندگانگی فضایی حاصل از به‌کارگیری روش MIMO ابتدا سمبل‌های داده را در طول آنتن‌ها گسترش داده می‌شوند. فرض کنید  $w$  یک ماتریس متعامد  $M_f \times M_f$  باشد، در این صورت سمبل‌های گسترش‌یافته فضایی جدید به‌صورت رابطه (۲۴) تعریف می‌شوند:

$$[s'_1, s'_2, \dots, s'_{mt}] = [s_1, s_2, \dots, s_{mt}] w \quad (24)$$

که در آن  $s'_i$  و  $s_i$  برای بهره‌گیری بیشتر از چندگانگی چندمسیره در کانال، سمبل‌های جدید  $s'_i$  را در زیرحامل‌های مختلف گسترش داده می‌شوند.



الف. فرستنده MIMO-OFDM



ب. گیرنده MIMO-OFDM

شکل ۱. بلوک دیاگرام فرستنده و گیرنده MIMO-OFDM

فرض کنید  $A$  یک ماتریس  $N \times N$  باشد در این صورت سمبل‌های  $x_i$  که سمبل‌های به‌دست‌آمده از گسترش سمبل‌ها در طول فضا-فرکانس است از رابطه (۲۵) به‌دست می‌آید:

$$[x_1, x_2, \dots, x_{mt}] = A [s'_1, s'_2, \dots, s'_{mt}] \quad (25)$$

بنابراین، هرکدام از کلمات کد STF را می‌توان طبق رابطه (۲۶) با یک ماتریس با ابعاد  $M_x N_x M_f$  نشان داد:

$$X = [X_1^T, X_2^T, \dots, X_{M_x}^T]^T \quad (26)$$

روش شکل‌دهی پرتو به‌عنوان یک روش فیلتر خطی در

$$y = \sum_{i=1}^N h_i s_i + w \quad (17)$$

که در آن،  $y$  سیگنال دریافتی از آنتن‌ها در طرف گیرنده ایستگاه اصلی است و  $s_i$  سیگنال ارسالی از کاربر  $i$ -ام و  $N$  تعداد کاربران است و  $w$  نشانگر نویز دسته‌جمعی مستقل در اطراف گیرنده می‌باشد. بردار  $h_i$  نشانگر بردار بهره کانال از کاربر  $i$ -ام تا آنتن گیرنده است. بردار  $h_i$  اثر فضایی کاربر  $i$ -ام نامیده می‌شود. گیرنده در طرف ایستگاه پایه بر اساس بردارهای متفاوت اثر فضایی کاربران قادر به تفکیک کاربران می‌باشد. به‌طور مشابه شکل‌دهی پرتو در طرف فرستنده نیز در ایستگاه پایه جهت ارسال داده به کاربران مختلف قابل‌استفاده می‌باشد. در صورتی که هر کاربر دارای یک آنتن باشد، بردار سیگنال‌های ارسالی به‌صورت زیر می‌باشد [۲۳]:

$$x = \sum_{i=1}^N w_i s_i \quad (18)$$

که در آن،  $s_i$  سیگنال ارسالی به سمت کاربر  $i$ -ام و  $w_i$   $i$ -ام بردار شکل‌دهی پرتو است. در این صورت سیگنال دریافتی توسط کاربر  $i$ -ام برابر است با [۲۳]:

$$y_i = h_i^H x + v_i \quad (19)$$

که  $h_i$  نشان‌دهنده بردار بهره کانال بین فرستنده و کاربر  $i$ -ام است و  $v_i$  نیز نویز جمعی در دریافت گیرنده  $i$ -ام است. بردارهای بهینه شکل‌دهی پرتو به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که علاوه بر بیشینه نمودن تابع هدف که در اینجا سیگنال به نویز و تداخل (SINR) است، تابع هزینه را نیز مینیمم نمایند. هدف اصلی بردار بهینه شکل‌دهی پرتو بیشینه نمودن توان سیگنال دریافتی توسط کاربر مطلوب و مینیمم نمودن توان نویز و اختلال سیگنال سایر کاربران می‌باشد. سیگنال دریافتی کاربر  $i$ -ام را می‌توان به‌صورت زیر نمایش داد [۲۳]:

$$y_i = h_i^H w_i s_i + h_i^H \sum_{k \neq i}^N w_k s_k + v_i \quad (20)$$

در این صورت با فرض وجود آمارگان مرتبه دوم کانال SINR کاربر  $i$ -ام برابر است با [۲۳]:

$$\text{SINR}_i = \frac{w_i^H R_i w_i}{\sum_{k \neq i} w_k^H R_i w_k + \sigma_i^2} \quad (21)$$

که  $R_i$  نشان‌دهنده ماتریس کوواریانس کانال از فرستنده ایستگاه پایه تا کاربر  $i$ -ام می‌باشد. سیگنال‌های داده، غیر وابسته در نظر گرفته می‌شوند و بنابراین، داریم [۲۳]:

$$E\{s_i s_j^*\} = \delta_{ij} \quad (22)$$

دریافتی به PDF نویز وابسته است. لذا قاعده آشکارسازی ML به رابطه (۳۰) منجر می‌شود.

$$Z' = \arg \min_{Z'} \left[ \frac{\rho}{M_t} \|Z'W'H\|_F^2 - 2 \sqrt{\frac{\rho}{M_t}} \operatorname{tr} \left( \operatorname{Re} \left[ Z'W'HR^H \right] \right) \right] \quad (30)$$

حال چنانچه  $Z'$  ارسال شده باشد، احتمال اینکه گیرنده ML مقدار  $Z'_{ML} \neq Z'$  را آشکار کند برابر است با:

$$\Pr \left( \operatorname{tr} \left[ 2 \operatorname{Re} \sqrt{\frac{\rho}{M_t}} (z' - z'_{ML}) W'HR^H \right] \geq \frac{\rho}{M_t} (z' - z'_{ML}) W'H_F^2 \right) \quad (31)$$

بنابراین، احتمال اینکه  $Z'$  مخایره شود اما  $Z'_{ML} \neq Z'$  آشکار شود از رابطه (۳۲) به دست می‌آید:

$$\Pr(z' \rightarrow z'_{ML}) = Q \left( \sqrt{\frac{\rho}{M_t}} (z' \rightarrow z'_{ML}) W'H_F^2 \right) \quad (32)$$

به طوری که  $Q(\cdot)$  تابع گوسی Q است که مطابق رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود:

$$Q(Z) = \int_Z^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-y^2/2} dy \quad (33)$$

## ۵. نتایج شبیه‌سازی

الگوریتم پیشنهادی STFBF در MATLAB2016 شبیه‌سازی شده است برای اجرای تمامی شبیه‌سازی‌ها از مدولاسیون BPSK (مدولاسیون فاز باینری) استفاده شده است و آشکارسازی ML در گیرنده نیز اجرا شده است (پارامترهای این شبیه‌سازی در جدول (۱) آمده است).

جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی

۴	تعداد آنتن‌های فرستنده
۲	تعداد آنتن‌های گیرنده
۱۶	تعداد زیرحامل‌ها
۴	تعداد کانال‌ها (جفت مسیر فرستنده و گیرنده)
BPSK	نوع مدولاسیون
ML	روش آشکارسازی در گیرنده
Montcarlo	روش نمونه‌برداری
STF	نوع کدینگ

کد متعامد اعمال شده به هر  $S(K)$  (کد بلوک فضا-زمان) کد الموتی<sup>۳</sup> است. در اینجا تعداد زیرحامل‌ها ۱۶N و L تعداد تأخیر مسیریها نیز ۴ فرض می‌شود. شکل (۲) عملکرد BER را برای یک سامانه  $2 \times 4$  MIMO نشان می‌دهد.

دامنه‌های فضایی است که به‌طور مستقیم برای کنترل اثرات تابش یک سامانه آنتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. هنگام دریافت یک سیگنال روش شکل‌دهی پرتو می‌تواند حساسیت دریافت‌کننده را افزایش دهد و همچنین حساسیت را در جهت تداخل و نویز کاهش دهد.

هنگام مخابره یک سیگنال، آنتن شکل‌دهی پرتو می‌تواند توان تابش را افزایش دهد. فن شکل‌دهی پرتو می‌تواند به‌منظور کاهش تأخیر اندازه‌گیری شده از کانال فیزیکی مفید باشد و لذا پخش‌شدگی کانال را کمتر می‌کند. در روش شکل‌دهی پرتو جریان به‌طور غیر وابسته و چندگانه به‌وسیله یک بردار وزن برای مخابره در کانال‌های چندگانه کدبندی می‌شود. در اینجا  $M_t$  را به‌صورت پرتوهای متعامد در نظر می‌گیریم به‌طوری‌که برای  $w_i (M_t \times 1)$  نهای مختلف  $i=1,2,3 \dots M_t$  تولید می‌شود. این پرتوها برای یک توزیع همسانگرد<sup>۱</sup> تولید می‌شوند. اندازه ماتریس شکل‌دهی پرتو w برابر با  $M_t \times M_t$  است. در اینجا بعد از در نظر گرفتن شکل‌دهی پرتو، یک پیام کلی از ماتریس سیگنال تحت عنوان  $[wx^T]^T$  دریافت می‌شود. سیگنال‌های دریافتی از تمام  $M_t$  آنتن‌های فرستنده در g-امین آنتن گیرنده برای حامل kام به‌صورت  $r_{\eta}^g(k)$ ، از رابطه (۲۷) به دست می‌آید:

$$r_{\eta}^g(k) = \sqrt{\rho / M_t} \sum_{i=1}^{M_t} \left\{ \sum_{q=1}^{M_t} w_{iq} x_q^n(k) \right\} H_{i,g}(k) + p_{\eta}^g(k) \quad (27)$$

به طوری که  $\rho$  نسبت سیگنال به نویز است. قالب ماتریسی رابطه (۲۷) به‌صورت رابطه (۲۸) است:

$$R = \sqrt{\frac{\rho}{M_t}} DH + P \quad (28)$$

در رابطه (۲۸)  $R$ ،  $H$  و  $P$  به ترتیب نماینده ماتریس‌های سیگنال دریافتی، کانال و نویز سیگنال هستند. در آنتن دریافتی از روش آشکارسازی بر مبنای بیشینه شباهت (ML) برای تخمین سیگنال مخابره استفاده می‌شود. برای شرایط کانال‌های گوسی که در این مقاله در نظر گرفته شده است قاعده ML به رابطه (۲۹) (min فاصله) ساده می‌شود:

$$\hat{X} = \arg \min_X \|R - \sqrt{\frac{\rho}{M_t}} DH\|_F^2 \quad (29)$$

$\hat{X}$  بردار سمبل آشکار شده (تخمین سمبل X ارسالی از سمبل R دریافتی) و همچنین  $\|\cdot\|_F$  نرم فروبینیوس<sup>۲</sup> است.

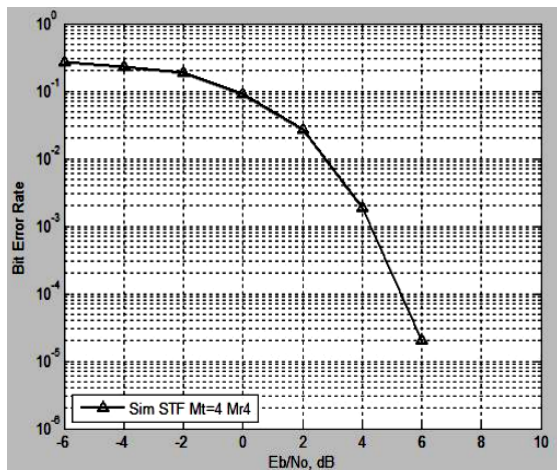
با در نظر گرفتن اطلاعات پایه یک کانال به‌طور دقیق خواهیم یافت که در سمت گیرنده احتمال خطا در آشکارسازی سیگنال

<sup>۳</sup> Alamouti Code

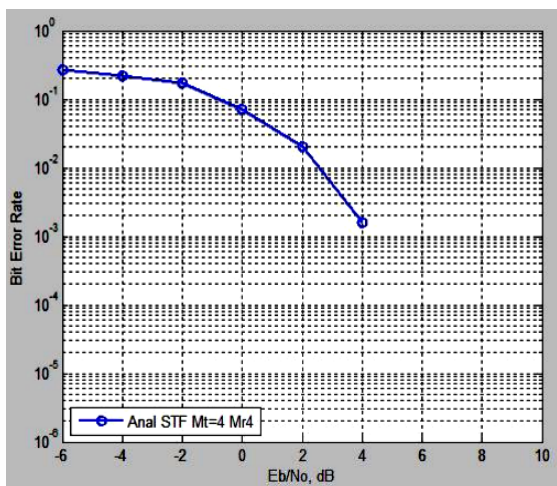
<sup>۱</sup> Isotropic

<sup>۲</sup> Frobenius





شکل ۴. عملکرد نرخ خطای بیت با روش مونت‌کارلو برای کدینگ STF برای  $M_r = 4$  و  $M_t = 4$ .

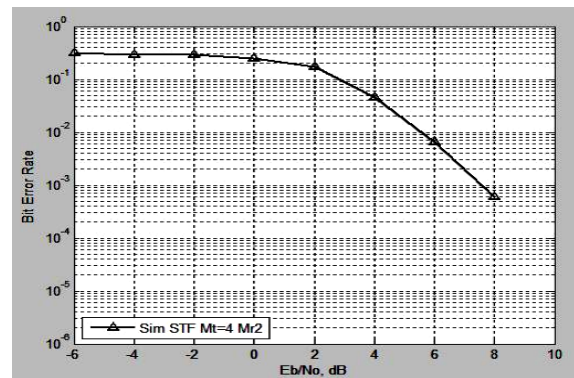


شکل ۵. عملکرد نرخ خطای بیت با ترکیب روش آنالیزی با STF برای  $M_r = 4$  و  $M_t = 4$ .

شکل (۶) عملکرد نرخ خطای بیت با ترکیب روش شکل‌دهی پرتو با STF برای  $M_r = 2$  و  $M_t = 2$  را نشان می‌دهد. در واقع این نمودار یکی از اهداف اصلی این مقاله که به صورت شبیه‌سازی شده و تحلیلی به دست آمده است را نشان می‌دهد. از این نمودار برداشت می‌شود که طبق نتایج تحلیلی، مرتبه چندگانگی بیشتر افزایش یافته است. با توجه به اینکه مرتبه چندگانگی به صورت شیب نمودار احتمال خطا بر حسب SNR در مقیاس لگاریتمی تعریف می‌شود لذا داریم [۲۳]:

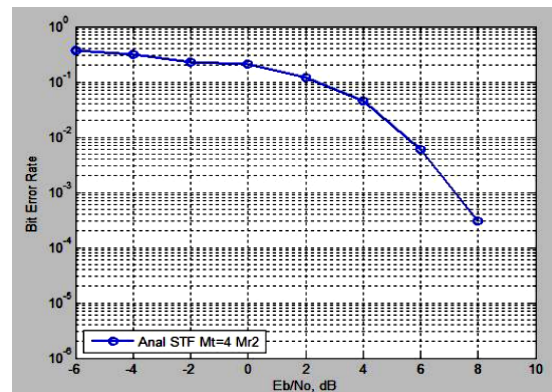
$$d(r) = - \lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{\log P_{out}(r, SNR)}{\log(SNR)} \quad (20)$$

این که کدام روش دارای مرتبه چندگانگی بهتر است با مقایسه کیفی نمودارها قابل استنباط است



شکل ۲. عملکرد نرخ خطای بیت با مونت‌کارلو روش STF برای  $M_t = 4$  و  $M_r = 2$ .

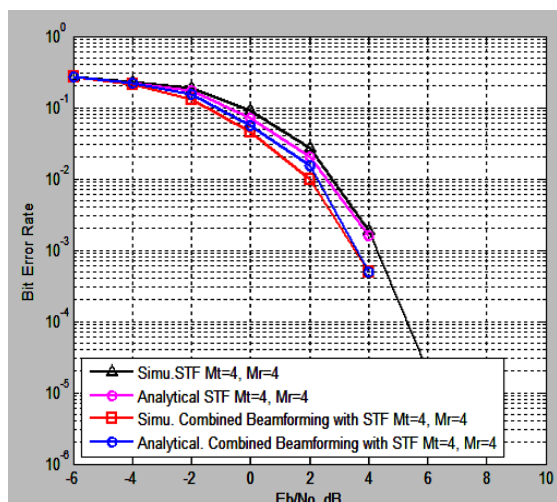
درواقع در شکل (۲) عملکرد نرخ خطای بیت با روش مونت‌کارلو برای کدینگ STF با تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده به ترتیب  $M_r = 2$  و  $M_t = 4$  نشان داده شده است که در شکل (۲) پیداست نرخ خطای بیت بر حسب SNR چه تغییراتی دارد. شکل (۳) عملکرد نرخ خطای بیت با استفاده از روابط تحلیلی برای سامانه با کدینگ STF و تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده به ترتیب  $M_r = 2$  و  $M_t = 4$  را نشان می‌دهد.



شکل ۳. عملکرد نرخ خطای بیت با ترکیب روش آنالیزی با STF برای  $M_r = 2$  و  $M_t = 4$ .

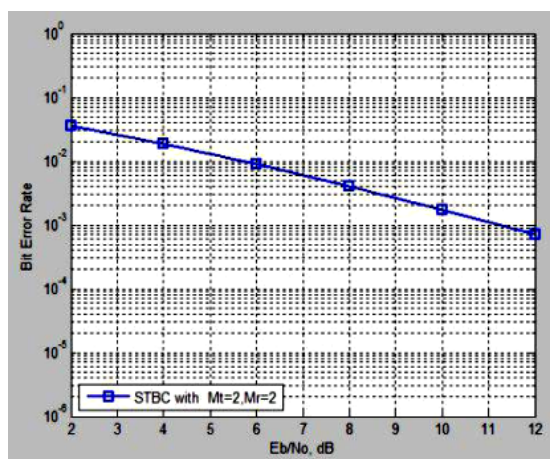
با توجه به این که هر دو شکل (۲) و (۳) عملکرد نسبتاً مشابهی را نشان می‌دهند لذا صحت روابط تحلیلی ارائه شده در این مقاله را می‌توان استنتاج کرد چراکه روابط تحلیلی انطباق خوبی با نتایج شبیه‌سازی به دست آمده از روش مونت‌کارلو دارند. در شکل‌های (۴) و (۵) نیز مشابه شکل‌های قبلی عملکرد روش کدینگ STF با تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده  $M_t = 4$  و  $M_r = 4$  به ترتیب برای روش‌های مونت‌کارلو و تحلیلی نشان داده شده است. انطباق خوب دو نمودار مذکور با یکدیگر مجدداً صحت روابط تحلیلی به دست آمده برای عملکرد سامانه بر مبنای کدینگ STF در این مقاله را تأیید می‌کند.

شکل‌دهی پرتو و نیز STF بدون شکل‌دهی پرتو به ترتیب ۴/۳dB و ۳/۵dB است. لذا روش پیشنهادی STFBF ترکیب روش شکل‌دهی پرتو و روش STF افزایش حدود ۰/۸dB را نسبت به روش STF بدون شکل‌دهی پرتو نشان می‌دهد.



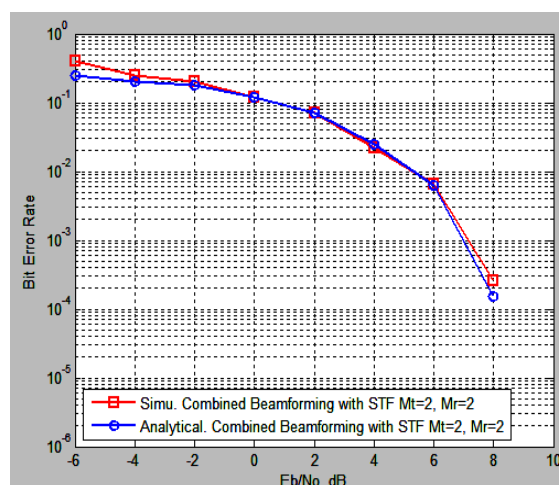
شکل ۸. عملکرد نرخ خطای بیت با ترکیب روش شکل‌دهی پرتو با STF و روش STF بدون شکل‌دهی پرتو  $M_r=4$  و  $M_t=4$ .

شکل (۹) عملکرد نرخ خطای بیت با روش STBC برای  $M_r=2$  و  $M_t=2$  را نشان می‌دهد. این نمودار برای روش STBC ترکیب‌شده با شکل‌دهی پرتو برای تعداد فرستنده و گیرنده هر کدام به دست آمده است که برای نرخ خطای  $10^{-3}$  مقدار  $SNR=11/2$  dB را می‌طلبد. در اینجا تغییرات نرخ خطا برحسب نویز به صورت خطی است.



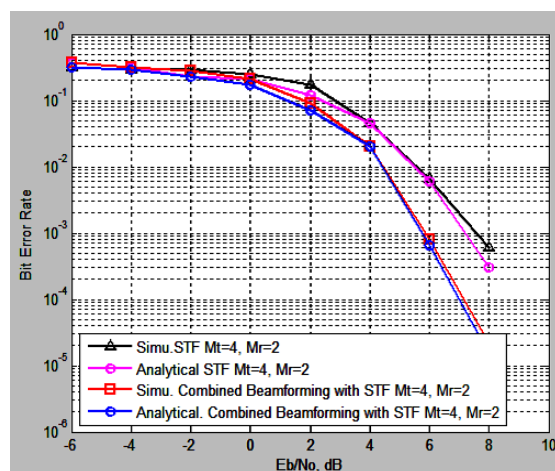
شکل ۹. عملکرد نرخ خطای بیت برای روش STBC ترکیب‌شده با شکل‌دهی پرتو برای  $M_r=2$  و  $M_t=2$ .

در شکل (۱۰) عملکرد نرخ خطای بیت برای حالت ترکیب روش شکل‌دهی پرتو و روش‌های STF و نیز STBC نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوی پیشنهادی STFBF به بهره چندگانگی بالاتری نسبت به ترکیب



شکل ۶. عملکرد نرخ خطای بیت با ترکیب روش شکل‌دهی پرتو با STF برای  $M_r=2$  و  $M_t=2$ .

شکل (۷) عملکرد نرخ خطای بیت با ترکیب روش شکل‌دهی پرتو با STF و روش STF بدون شکل‌دهی پرتو برای  $M_r=4$  و  $M_t=2$  را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که مرتبه چندگانگی با استفاده از ترکیب روش STF با شکل‌دهی پرتو خیلی بیشتر از روش STF بدون شکل‌دهی پرتو است.

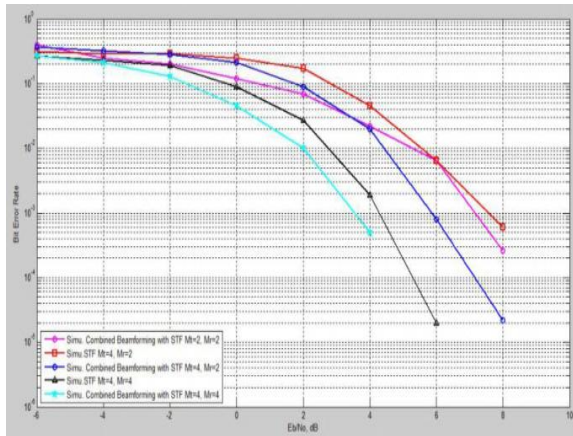


شکل ۷. عملکرد نرخ خطای بیت با ترکیب روش شکل‌دهی پرتو با STF و روش STF بدون شکل‌دهی پرتو برای  $M_r=2$  و  $M_t=4$ .

ضمناً هر دو روش مونت کارلو و تحلیلی برای روش STF به همراه شکل‌دهی پرتو نیز عملکرد نسبتاً یکسانی را نتیجه می‌دهند که این مجدداً صحت روابط به دست آمده برای احتمال خطای سامانه STF به همراه شکل پرتو در این مقاله را تأیید می‌کند.

در شکل (۸) دیده می‌شود که ترکیب روش شکل‌دهی پرتو با روش STF به مرتبه بالاتری از چندگانگی نسبت به روش STF بدون شکل‌دهی پرتو رسیده است. همچنین مشاهده می‌شود که برای نرخ خطای بیت  $10^{-3}$ ، مقدار SNR با روش ترکیب با

آنتنی و شکل‌دهی پرتو را در نظر نگرفته و فرمولاسیون آن در حالت خاص  $2 \times 2$  بررسی شده است. در صورتی که در حالت کلی کد فضا-زمان باید به صورت  $n \times n$  در نظر گرفته شود.



شکل ۱۱. عملکرد نرخ خطای بیت برای روش‌های مختلف به ازای تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده متفاوت

در طرح پیشنهادی مقاله حاضر در فرمولاسیون و بیان زیرساخت حالت کلی رعایت شده و لحاظ گردیده و چون ۴ فرستنده و ۲ گیرنده در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است، عملاً دایورسیتی آنتنی و شکل‌دهی پرتو مفهوم پیدا کرده است و اثر خود را نشان می‌دهد. جدول (۲) مقایسه نتایج به دست آمده از راه‌حل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

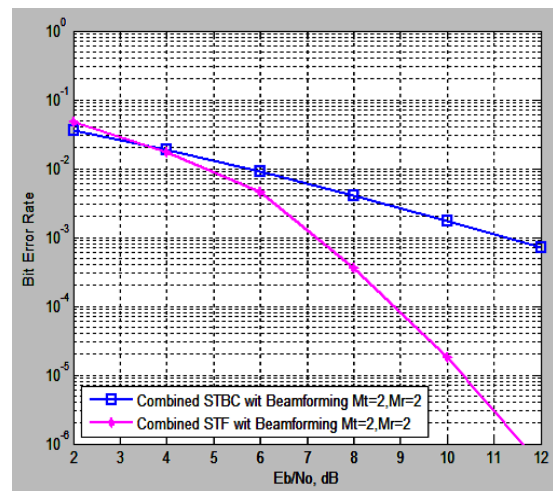
جدول ۲. مقایسه نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی

مرتبه چندگانگی	مقدار SNR مورد نیاز در احتمال خطای $10^{-3}$	روش و مشخصات مخابره	$\beta$
2.1	11.1 dB	STBC with Beamforming, $M_t=2, M_r=2$	۱
3.1	7.2 dB	STF with Beamforming, $M_t=2, M_r=2$	۲
3.5	7.1 dB	STF, $M_t=4, M_r=2$	۳
5.6	4.3 dB	STF, $M_t=4, M_r=4$	۴
7.6	5.8 dB	STF with Beamforming, $M_t=4, M_r=2$	۵
8.5	3.5 dB	STF with Beamforming, $M_t=4, M_r=4$	۶

## ۶. نتیجه‌گیری

در مخابرات، استفاده از چندگانگی منجر به افزایش قابلیت اطمینان سیگنال مخابره شده از طریق استفاده از چند کانال مخابراتی با ویژگی‌های مستقل شده است. چندگانگی نقش مهمی را در ترکیب محوشدگی و تداخل فرکانسی و جلوگیری از

روش شکل‌دهی پرتو و روش STBC دارد. مشاهده می‌شود برای نرخ خطای بیت  $10^{-3}$  مقدار SNR برای حالت ترکیب روش شکل‌دهی پرتو و روش‌های STF و STBC به ترتیب با ۷/۲ dB و ۱۱/۱ dB برابر است. که روش ترکیب پیشنهادی STFBF شکل‌دهی پرتو و روش STF نسبت به ترکیب روش‌های شکل‌دهی پرتو و روش STBC حدوداً 4dB بیشتر است.



شکل ۱۰. بررسی نرخ خطای بیت برای حالت ترکیب روش شکل‌دهی پرتو و روش STF و همچنین ترکیب آن با STBC برای حالت‌های  $M_t=2$  و  $M_r=2$ .

با مقایسه شکل (۹) با شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی STFBF ترکیب STF با شکل‌دهی پرتو برای تعداد آنتن‌های  $M_t=2$  و  $M_r=2$  عملکرد بسیار بهتری را نسبت به روش STBC با شکل‌دهی پرتو دارد.

شکل (۱۱) عملکرد نرخ خطای بیت برای روش‌های مختلف به ازای تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده متفاوت را نشان می‌دهد. شکل (۱۱) نشان می‌دهد که روش ترکیب STF و شکل‌دهی پرتو به طور قابل توجهی مرتبه چندگانگی را افزایش می‌دهد و بهره چندگانگی بسیار خوبی را فراهم می‌آورد. همچنین در شکل (۱۱) افزایش شیب نمودار با افزایش تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده به راحتی قابل رؤیت است.

آقای پادماجا [۲۴] بررسی و مقایسه‌ای بین STF، SF و ST در MIMO-OFDM انجام شده است، در طرح پیشنهادی [۲۴] با تلفیق شکل‌دهی پرتو و STF در MIMO-OFDM روش STFBF ارائه و مرتبه بالایی از دایورسیتی فضایی حاصل شده است. آقای شریواست [۲۵] با فرض کد فضا-زمان  $2 \times 2$  در شبیه‌سازی خود، ۲ فرستنده و ۱ گیرنده لحاظ نموده است و عملاً دایورسیتی

- [5] Al-Mahmoud, N.; Zoltowski, M. "A Novel Approach to Space Time Frequency Coded MIMO-OFDM Over Frequency Selective Fading Channels"; IEEE Trans. Acoust. Speech (ICASSP) 2010, 2554-2557.
- [6] Mietzner, G.; Schober, R.; Lampe, L.; Gerstacker, W.; Hoehner, P. "Multiple-Antenna Techniques for Wireless Communications: A Comprehensive Literature Survey"; IEEE Commun. Surv. Tutorials 2006, 11, 87-105.
- [7] Cho, S.; Hwang, I.; Tarokh, V.; You, C. "A Practical Transmit Beamforming Strategy for Closed Loop MIMO Communication"; Int. J. Commun. Syst. 2012, 25, 8, 1091-1099.
- [8] Fletcher, P.; McNamara, D.; Piechocki, R. "On the Performance of Recursive Space Frequency Codes and Iterative Decoding in Wideband OFDM-MIMO Systems: Simulated and Measured Results"; Int. J. Commun. Syst. 2004, 17, 789-810.
- [9] Fazel, F.; Jafarkhani, H. "Quasi-Orthogonal Space Frequency and Space Time Frequency Block Codes for MIMO OFDM Channels"; IEEE Trans. Wireless Commun. 2008, 7, 184-192.
- [10] Liu, Z.; Xin, Y.; Giannakis, G. "Space Time Frequency Coded OFDM Over Frequency Selective Fading Channels"; IEEE Trans. Signal Proc. 2002, 50, 2465-2476.
- [11] Guan, J.; Ye, X.; Zhang, B. "Performance Analysis of a Scheme Combined STBC with Beamforming in Spatial Correlated Channel"; IEEE Network Secur. Wireless Commun. Trusted Comput. 2009, 1, 496-500.
- [12] Shrivastava, N.; Singh, S.; Trivedi, A. "Joint Scheduling and Random Beamforming with Reduced Feedback in Multiuser MIMO-OFDM"; IEEE Wireless Adv. 2011, 66-69.
- [13] Shrivastava, N.; Trivedi, A. "Iterative Random Beamforming for MIMO-OFDM Systems"; IEEE Int. Conf. Commun. (NCC), 2012, 1-5.
- [14] Chung, J.; Hwang, C.; Kim, K.; Kim, Y. "A Random Beamforming Technique in MIMO Systems Exploiting Multiuser Diversity"; IEEE J. Sel. Areas Commun. 2003, 21, 848-855.
- [15] Surendar, M.; Muthuchidambaranathan, P. "Low Complexity and High Diversity Gain Non-Linear Constellation Precoded MIMO-OFDM System with Subcarrier Grouping"; AEU Int. J. Electron. Commun. 2016, 70, 265-271.
- [16] Lee, J.; Sohn, I.; Kim, Y. "Analog Cancellation Schemes for Full Duplex MIMO-OFDM Systems"; AEU Int. J. Electron. Commun. 2016, 70, 272-277.
- [17] Nan, Y.; Sun, X.; Zhang, L. "Joint Channel Estimation Algorithm via Weighted Homotopy for Massive MIMO-OFDM System"; Digit. Signal. Process 2016, 50, 34-42.
- [18] Weinstein, S.; Ebert, P. "Data Transmission by Frequency Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform"; IEEE Trans. Commun. Technol. 1971, 19, 5, 628-634.
- [19] Peled, A.; Ruiz, A. "Frequency Domain Data Transmission Using Reduced Computational Complexity Algorithms"; IEEE Trans. Acoust. Speech. 1980, 5, 964-967.
- [20] Ye Geoffrey, L.; Stuber, G. L. eds. "Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications"; Springer Science & Business Media, 2006.
- [21] Henrik, S.; Lüders, C. "Theory and Applications of OFDM and CDMA: Wideband Wireless Communications"; John Wiley & Sons, 2005.

خطای بیت متوالی ایفا می‌نماید. چندگانگی از این مسئله نشست می‌گیرد که هر کانال مستقل می‌تواند شرایط متفاوتی را تجربه کند و ارسال چند مدل از سیگنال و یا دریافت چند مدل از سیگنال و ترکیب آن‌ها در گیرنده می‌تواند به تصمیم صحیح‌تری در مورد سیگنال ارسالی بیانجامد. در روش پیشنهادی STFBB این مقاله عملکرد بهتری نسبت به روش STF بدون شکل‌دهی پرتو مشاهده شد. در اینجا از شبیه‌سازی مونت کارلو برای ارزیابی عملکرد سامانه MIMO برای نرخ خطای بیت استفاده شده است، همچنین در تمام شبیه‌سازی‌ها آشکارسازی ماکزیمم شباهت (ML) در آنتن‌های گیرنده استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی STFBB که روش STF را با شکل‌دهی پرتو ترکیب می‌کند برای نرخ خطای بیت  $10^{-3}$  دارای حدوداً  $0.8$  dB عملکرد بهتری نسبت به روش STF بدون شکل‌دهی پرتو است. همچنین مشاهده شد که برای نرخ خطای بیت  $10^{-3}$ ، روش پیشنهادی STFBB دارای حدود  $4$  dB عملکرد بهتر نسبت به ترکیب روش شکل‌دهی پرتو با روش STBC است. اشکال روش STFBB نیز این است که اگرچه با افزایش درجه دایورسیتی، عملکرد بهتر است اما پیچیدگی کدگذاری با معیار حداکثر احتمال (ML) در گیرنده بیشتر می‌شود. در مورد موضوع جمینگ نیز باید ذکر شود، اگرچه باتوجه به فن‌های متنوعی که در جمینگ وجود دارد برای اثبات مقاومت روش پیشنهادی در مقاله در برابر جمینگ درسه شکل تحلیلی و توصیفی و ارزیابی میدانی کاری بسیار جالب و جذاب است اما در یک پاسخ کلی هرچه دایورسیتی فضایی، زمانی، فرکانسی، کدی یا آنتنی افزایش یابد به دلیل وجود مسیرهای گوناگون در پارامترهای یاد شده عملاً تأثیر جمینگ کمتر یا به عبارتی مقاومت روش بیشتر خواهد بود البته میزان کمی آن باید ارزیابی شود که زمینه پژوهشی دیگری است.

## ۷. مراجع‌ها

- [1] Francisco, R.; Slock, D. "An Optimized Unitary Beamforming Technique for MIMO Broadcast Channels"; IEEE Trans. Wireless Commun. 2010, 9, 990-1000.
- [2] Gong, Y.; Letaie, K. "Space-Frequency-Time Coded OFDM for Broadband Wireless Communications"; IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM01). 2001, 1, 519-523.
- [3] Zhang, W.; Xia, X.; Letaief, K. "Space-Time/Frequency Coding for MIMO-OFDM in Next Generation Broadband Wireless Systems"; IEEE Wireless Commun. Lett. 2007, 14, 32-43.
- [4] Tarokh, V.; Jafarkhani, H.; Calderban, A. "Space-Time Block Codes From Orthogonal Designs"; IEEE Trans. Inf. Theory 1999, 45, 1456-1467.

- [24] Padmaja, C.; Malleswari, B. L. "Performance Analysis of Space-Time-Frequency MIMO OFDM Techniques;" IEEE Int. Conf. on Adv. Eng. Technol. Res. 2014, 1-5.
- [25] Shrivastava, N.; Aditya, T. "Performance of Beamforming Combined with Spacetime-Frequency Code in Spatially Correlated Channel"; Int. J. Wireless Mobile Comput. 2014, 7, 282-288.
- [22] Weinstein, S.; Ebert, P. "Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform"; IEEE Trans. Commun. Technol. 1971, 19, 628-634.
- [23] Yoo, T.; Goldsmith, A. "On the Optimality of Multiantenna Broadcast Scheduling Using Zero Forcing Beamforming"; IEEE J. Sel. Areas Commun. 2006, 24, 528-541.