

## گیرنده خطی نوین مبتنی بر SVD در سیستم های چندکاربره MIMO MC-CDMA

مرتضی رجب زاده<sup>۱</sup>، حسین ضمیری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه برق

<sup>۲</sup> دانشگاه فردوسی مشهد، مرکز پژوهشی مخابرات و کامپیوتر

morteza.rajabzadeh@ieee.org, hzamiri@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده - مهم ترین چالش فراروی به کارگیری سیستم های MIMO MC-CDMA چندکاربره، تداخل چندکاربره (MUI) و تداخل فضایی (CSI) ناشی از ارسال چند آنتنی است. برای مقابله با این چالش ها، گیرنده های خطی و غیر خطی متعددی معرفی شده اند. به تازگی دو گیرنده خطی نوین با عنوان های TIC و SC-MMSE پیشنهاد شده است [۶] که اثر تداخل های MUI و CSI ناشی از ارسال چند آنتنی را به خوبی حذف می کنند. در این مقاله، عملکرد احتمال خطای گیرنده های پیشنهادی با عملکرد گیرنده های غیر خطی تحت عنوان OSSMIC مقایسه شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که گیرنده خطی TIC قادر است تداخل های MUI و CSI را کاملاً حذف کند و عملکرد آن مشابه عملکرد گیرنده غیر خطی ZF-OSSMIC است. گیرنده خطی SC-MMSE، با در نظر گرفتن معیار MMSE برای آشکارسازی سمبل، نرخ خطای بیت (BER) کمتری را در مقایسه با TIC و گیرنده های غیرخطی ZF-OSSMIC و MMSE-OSSMIC نشان می دهد. برای مقایسه حجم محاسباتی، پس از معرفی این گیرنده ها، ارجحیت گیرنده های پیشنهادی از لحاظ پیاده سازی نشان داده شده است.

کلید واژه- پرتوسازی، SVD، سیستم های چندرودی-چندخروجی، گیرنده های خطی و غیر خطی، MC-CDMA

CDMA تداخل چندکاربره (MUI)<sup>۶</sup> و تداخل فضایی (CSI)<sup>۷</sup> می باشد.

### ۱- مقدمه

در ارسال فرسوس<sup>۸</sup>، گیرنده های متفاوتی برای مقابله با این عوامل ارائه شده اند که از دید کلی می توان آن ها را به دو دسته خطی و غیرخطی تقسیم بندی کرد. اساس گیرنده های غیرخطی حذف متوالی تداخل فضایی می باشد [۲ و ۱]. در میان گیرنده های غیرخطی ارائه شده برای ارسال فرسوسی سیستم MIMO MC-CDMA، ساختار گیرنده پیشنهادی در [۲] با نام کلی OSSMIC، به صورت متوالی تداخل فضایی را در سطح چیپ سیستم حذف می کند و پس از گسترش زدایی، تداخل چندکاربره را در سطح سمبل حذف می کند. این گیرنده توانایی بالایی برای حذف همزمان MUI و CSI دارد. اما از طرف دیگر به علت تکراری بودن آن، حجم محاسباتی بالایی دارد.

در [۳] گیرنده خطی مبتنی بر معیار MMSE ارائه شده است که برای آشکارسازی سیگنال کاربر مطلوب به کد گسترش سایر کاربرها نیاز دارد. در [۴ و ۵] نیز گیرنده های خطی دیگری بر مبنای معیار MMSE پیشنهاد شده اند که به طور کامل نمی

سیستم MC-CDMA<sup>۱</sup> به عنوان راهکاری مناسب برای به کارگیری در کانال های پهن باند چندکاربره مطرح است. این روش برای مقابله با فرکانس گزینی کانال پهن باند از تکنیک OFDM<sup>۲</sup> بهره می برد. همچنین با استفاده از روش CDMA<sup>۳</sup>، اطلاعات ارسالی را به وسیله کدهای گسترش<sup>۴</sup> در زیرحامل های ایجاد شده توسط تکنیک OFDM گسترده می کند. این ویژگی باعث استفاده از مزایای چندگانگی فرکانسی، ساده شدن گیرنده و امکان ارسال و دریافت چندکاربره می شود.

سیستم چندرودی-چندخروجی (MIMO<sup>۵</sup>) یکی از روش هایی است که برای بالا بردن سرعت انتقال داده و افزایش قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار می گیرد و در آن فرستنده و گیرنده از آرایه ای از آنتن ها استفاده می کنند. مهم ترین چالش های فراروی به کارگیری همزمان سیستم های MIMO و MC-

<sup>۱</sup> Multicarrier-Code Division Multiple Access

<sup>۲</sup> Orthogonal Frequency Division Multiplexing

<sup>۳</sup> Code Division Multiple Access

<sup>۴</sup> spreading code

<sup>۵</sup> Multiple Input-Multiple Output

<sup>۶</sup> Multiuser Interference

<sup>۷</sup> Co-Space Interference

<sup>۸</sup> Downlink

گسترده شده و بر روی  $L$  زیرحامل قرار می گیرد که  $\gamma$  بهره کد و  $L$  تعداد زیرحامل ها می باشد. در حالت کلی تعداد زیرحامل ها می تواند مضرب صحیحی از بهره کد باشد. در این مقاله، بدون از بین رفتن کلیت، فرض می کنیم که  $L = \gamma$ . در این صورت داده ارسالی بر روی زیرحامل  $g$  ام برابر است با

$$\mathbf{s}_m^{(g)} = c_m^{(g)} \cdot \mathbf{d}_m, \quad g = 1, \dots, \gamma \quad (1)$$

از طرف دیگر کانال مخابراتی MIMO فرکانس-گزینه بین فرستنده مرکزی و کاربر  $m$  ام را می توان در حوزه فرکانس به صورت یک ماتریس بلوکی قطری [۶] نمایش داد:

$$\mathbf{H}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_m^{(1)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_m^{(2)} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \mathbf{H}_m^{(L)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

اندازه این ماتریس  $ML \times NL$  می باشد. عنصر بلوکی قطری  $g$  ام ماتریس فوق، نشانگر کانال تخت MIMO در زیرحامل  $g$  ام می باشد که بعد آن  $M \times N$  است.

در گیرنده کاربر  $m$  ام، بردار دریافتی برای زیرحامل  $g$  ام به صورت زیر خواهد بود:

$$\mathbf{x}_m^{(g)} = \mathbf{H}_m^{(g)} \mathbf{s}_m^{(g)} + \mathbf{H}_m^{(g)} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^K \mathbf{s}_k^{(g)} + \boldsymbol{\xi}_m^{(g)} \quad (3)$$

که  $\mathbf{x}_m^{(g)} = [x_{m,1}^{(g)}, \dots, x_{m,M}^{(g)}]^T$  می باشد، به طوری که  $x_{m,j}^{(g)}(n)$  سیگنال دریافتی توسط گیرنده کاربر  $m$  ام در آنتن  $j$  ام از زیرحامل  $g$  ام است.  $\boldsymbol{\xi}_m^{(g)}$  نیز بردار  $M \times 1$  نویز گوسی با میانگین صفر و ماتریس خودهمبستگی  $\boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{\xi}_m^{(g)}} = \sigma_{\boldsymbol{\xi}_m^{(g)}}^2 \mathbf{I}_M$  خواهد بود. در رابطه (۳)، ماتریس  $\mathbf{H}_m^{(g)}$  باعث تولید تداخل فضایی (CSI) می شود و عبارت دوم نیز نمایانگر تداخل چندکاربره (MUI) می باشد. پرتوسازی توامان در فرستنده و گیرنده مبتنی بر SVD روش کارایی برای حذف CSI است، اما به دلیل وجود MUI، این روش کارایی خود را در حالت چندکاربره از دست می دهد [۶]. برای حل این مشکل گیرنده های TIC و SC-MMSE در [۶] پیشنهاد شده اند که در بخش های بعدی آن ها را معرفی کرده و عملکرد آن ها را بررسی می کنیم.

### ۳- گیرنده های خطی مبتنی بر SVD

در گیرنده های خطی پیشنهادی، برای از بین بردن همزمان تداخل چندکاربره و تداخل فضایی، سمبل های داده علاوه بر

توانند بر تداخل های فوق غلبه کنند. به تازگی در [۶]، دو گیرنده خطی مبتنی بر تجزیه مقایر تکین (SVD) ارائه شده است که به خوبی بر تداخل های فضایی و چندکاربره فایق می آیند. در این دو گیرنده خطی اطلاعات ارسالی به طور همزمان در فضا و فرکانس گسترده می شوند. در روش اول، در گیرنده کاربر مطلوب، تعامد سازی بر مبنای اطلاعات کد گسترش کاربرها و SVD ماتریس کانال انجام می شود و بدین وسیله تداخل های MUI و CSI به طور کامل حذف می شود. به همین دلیل به این روش Total Interference Cancellation یا اختصاراً TIC می گوئیم. در روش دوم ترازش مبتنی بر معیار MMSE در گیرنده انجام می شود که باعث بهبود احتمال خطای گیرنده می شود. مزیت این دو گیرنده، علاوه بر حذف بسیار خوب MUI و CSI خطی بودن آن هاست که در مقایسه با گیرنده های حذف تداخل تکراری حجم محاسباتی کمتری دارند.

این مقاله به مقایسه عملکرد گیرنده های خطی پیشنهادی [۶] و گیرنده های غیرخطی پیشنهادی [۲] اختصاص یافته است. برای این منظور، پس از معرفی این گیرنده ها، درجه پیچیدگی محاسباتی آن ها با هم مقایسه شده است. همچنین عملکرد آن ها در حذف تداخل های CSI و MUI در شرایط مختلف به وسیله شبیه سازی بررسی شده است.

ساماندهی مقاله به این صورت است که در بخش بعد مدل کلی سیستم MIMO MC-CDMA معرفی می شود. بخش های سوم و چهارم به ترتیب به معرفی گیرنده های خطی و گیرنده غیرخطی OSSMIC اختصاص یافته است. پس از آن در بخش پنجم، حجم محاسبات این گیرنده ها مقایسه شده است. نتایج شبیه سازی گیرنده ها در بخش پنجم بیان می شود و بخش ششم نیز به نتیجه گیری اختصاص می یابد. در این مقاله بردارها و ماتریس ها به ترتیب با حروف کوچک و بزرگ توپر نشان داده می شوند، همچنین  $(.)^T$  نشان دهنده عملگر ترانهاده و  $(.)^H$  نشان دهنده عملگر ترانهاده مزدوج می باشد.

### ۲- مدل مرسوم سیستم MIMO MC-CMDA

سیستم فرسوی MIMO MC-CDMA را در نظر بگیرید که فرستنده مرکزی اطلاعات را با  $N$  آنتن برای  $K$  کاربر فعال ارسال کرده و گیرنده هریک از کاربران نیز به  $M$  آنتن دریافت مجهز است. برای کاربر  $m$  ام، بردار داده  $\mathbf{d}_m = [d_{m,1}, d_{m,2}, \dots, d_{m,N}]^T$  می باشد. هریک از سمبل های ارسالی توسط بردار کد گسترش  $\mathbf{c}_m = [c_m^{(1)}, c_m^{(2)}, \dots, c_m^{(\gamma)}]^T$

حوزه فرکانس در فضا نیز گسترده می شوند. برای این منظور، فرض می کنیم که قرار است گیرنده تعداد  $J$  سمبل داده را ارسال کند به نحوی که  $J \leq N$ . بردار سیگنال داده  $\mathbf{d}_m = [d_{m,1}, d_{m,2}, \dots, d_{m,J}]^T$  در ماتریس کد گسترده ستون های ماتریس  $\mathbf{C}_m = [\mathbf{c}_{m,1}, \mathbf{c}_{m,2}, \dots, \mathbf{c}_{m,J}]$  بردارهای کد گسترش متعامد و متفاوت با طول  $NL$  هستند به نحوی که برای  $m, k \in \{1, 2, \dots, K\}$  داریم:  $\mathbf{C}_m^H \mathbf{C}_k = \mathbf{I}_J \delta(m-k)$  که منظور از  $\mathbf{I}_J$  ماتریس یکه با اندازه  $J \times J$  می باشد. بدین ترتیب بردار اطلاعات آماده ارسال در حوزه فرکانس-فضا به صورت زیر درمی آید:

$$\mathbf{s}_m = \mathbf{C}_m \mathbf{d}_m \quad (4)$$

که ابعاد  $\mathbf{s}_m$  برابر  $NL \times 1$  می باشد. در فرستنده مرکزی، بردار داده کاربران مختلف با هم جمع شده و پس از تبدیل به حوزه زمان بر روی کانال MIMO ارسال می شود. در گیرنده کاربر  $m$ ، سیگنال دریافتی پس از تبدیل به حوزه فرکانس،  $\mathbf{y}_m$ ، با ابعاد  $ML \times 1$  به این صورت خواهد بود

$$\mathbf{y}_m = \mathbf{H}_m \sum_{k=1}^K \mathbf{C}_k \mathbf{d}_k + \zeta_m \quad (5)$$

که  $\mathbf{H}_m$  ماتریس فضا-فرکانس کانال به فرم بلوکی ارائه شده در رابطه (۲) است.  $\zeta_m$  نیز بردار نویز سفید گوسی با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس  $\mathbf{R}_\zeta = \sigma_\zeta^2 \mathbf{I}_{ML}$  است. تجزیه مقادیر تکین (SVD) ماتریس کانال را می توان به این صورت نوشت

$$\mathbf{H}_m = \mathbf{U}_m \mathbf{\Lambda}_m \mathbf{V}_m^H \quad (6)$$

که  $\mathbf{U}_m$  و  $\mathbf{V}_m$  ماتریس های یکانی به ترتیب با ابعاد  $ML \times NL$  و  $NL \times NL$  می باشند. ماتریس  $\mathbf{\Lambda}_m$  نیز ماتریس قطری با ابعاد  $NL \times NL$  می باشد. حال به معرفی ساختار گیرنده ها می پردازیم.

### ۳-۱- گیرنده خطی TIC

در گیرنده TIC از ماتریس های پرتوسازی حاصل از SVD ماتریس کانال به صورت زیر استفاده می شود:

$$\tilde{\mathbf{y}}_m = \mathbf{\Lambda}_m^{-1} \mathbf{U}_m^H \mathbf{y}_m = \mathbf{V}_m^H \sum_{k=1}^K \mathbf{C}_k \mathbf{d}_k + \mathbf{\Lambda}_m^{-1} \mathbf{U}_m^H \zeta_m \quad (7)$$

در رابطه فوق، تداخل های چندکاربره و فضایی وجود دارند. برای حذف همزمان آن ها، به جای استفاده از ماتریس کد متعامد مورد استفاده در فرستنده مرکزی،  $\mathbf{C}_m$ ، ماتریس گسترش زدای جدید  $\mathbf{G}_m$  را تعریف می کنیم به نحوی که شرط زیر را برآورده

کند

$$\mathbf{C}_m^H = \mathbf{G}_m^H \mathbf{V}_m^H \quad (8)$$

پس از گسترش زدایی با استفاده از این ماتریس، خواهیم داشت

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{d}}_m &= \mathbf{G}_m^H \tilde{\mathbf{y}}_m = \mathbf{G}_m^H \mathbf{V}_m^H \sum_{k=1}^K \mathbf{C}_k \mathbf{d}_k + \mathbf{G}_m^H \mathbf{\Lambda}_m^{-1} \mathbf{U}_m^H \zeta_m \\ &= \mathbf{C}_m^H \sum_{k=1}^K \mathbf{C}_k \mathbf{d}_k + \mathbf{G}_m^H \mathbf{\Lambda}_m^{-1} \mathbf{U}_m^H \zeta_m \end{aligned} \quad (9)$$

با توجه به تعامد ماتریس کد کاربرهای مختلف، رابطه (۹) به صورت زیر در می آید

$$\hat{\mathbf{d}}_m = \mathbf{C}_m^H \mathbf{C}_m \mathbf{d}_m + \mathbf{C}_m^H \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^K \mathbf{C}_k \mathbf{d}_k + \boldsymbol{\eta}_m = \mathbf{d}_m + \boldsymbol{\eta}_m \quad (10)$$

که  $\boldsymbol{\eta}_m = \mathbf{G}_m^H \mathbf{\Lambda}_m^{-1} \mathbf{U}_m^H \zeta_m$  بردار نویز با اندازه  $J \times 1$  باقیمانده در بردار خروجی گسترش زدا (سیگنال پیش از ورود به آشکارساز) است. همان طور که مشاهده می شود، سیگنال تداخلی سایر کاربران و همچنین تداخل فضایی ناشی از کانال MIMO به طور کامل حذف شده است. از طرف دیگر، نویز پیش از ورود به آشکارساز،  $\boldsymbol{\eta}_m$ ، در ماتریس  $\mathbf{\Lambda}_m^{-1}$  ضرب می شود که یک ماتریس قطری است. عناصر قطری این ماتریس، معکوس مقادیر تکین حاصل از SVD ماتریس کانال است. لذا در زیرحامل هایی که مقدار تکین مربوط به آن کوچک است، نویز تقویت می شود و باعث افت کارایی گیرنده TIC می شود. هر چند این امر تاثیری بر حذف تداخل کامل این روش ندارد.

### ۳-۲- گیرنده SC-MMSE مبتنی بر SVD

در گیرنده SC-MMSE فقط ماتریس پرتوساز  $\mathbf{U}_m$  به بردار دریافتی در گیرنده کاربر  $m$  در رابطه (۵) اعمال می شود

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{y}}_m &= \mathbf{U}_m^H \mathbf{y}_m \\ &= \mathbf{\Lambda}_m \mathbf{V}_m^H \mathbf{C}_m \mathbf{d}_m + \mathbf{\Lambda}_m \mathbf{V}_m^H \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^K \mathbf{C}_k \mathbf{d}_k + \mathbf{U}_m^H \mathbf{v}_m \end{aligned} \quad (11)$$

در این روش، برای ترازش هر یک از سمبل های  $d_{m,j}$ ، به جای به کارگیری  $\mathbf{\Lambda}_m^{-1}$ ، از یک ماتریس قطری مجزا استفاده می شود. برای سمبل  $j$ ام، ماتریس قطری  $\mathbf{F}_{m,j}$  را به صورت  $\mathbf{F}_{m,j} = \text{diag}(f_{m,j}^{(1)}, f_{m,j}^{(2)}, \dots, f_{m,j}^{(NL)})$  در نظر می گیریم. این ماتریس، پیش از گسترش زدایی به خروجی پرتوساز در رابطه (۱۱) اعمال می شود. لذا سمبل خروجی گسترش زدا به این صورت در می آید

#### ۴- گیرنده های غیر خطی OSSMIC

گیرنده OSSMIC با انجام محاسبات فضا-زمان لایه ای هر دو تداخل فضایی و چندکاربره را در سطح چیپ از بین می برد. رابطه (۳) را که بردار سیگنال دریافتی در گیرنده کاربر  $m$  ام برای زیرحامل  $g$  ام نشان می دهد، در نظر بگیرید. در پردازش لایه ای فضا-زمان، ابتدا سمبل فضایی ارسالی با بیشترین توان، با استفاده از فیلترهای فضایی ZF یا MMSE از بردار دریافتی حذف می شود. بدون از دست دادن کلیت، سمبل داده ارسالی کاربر  $m$  ام از آنتن اول در زیرحامل  $g$  ام را در نظر می گیریم که برای بدست آوردن آن ابتدا فیلتر فضایی ZF را به صورت زیر اعمال می کنیم:

$$y_m^{(g),1} = \left[ \mathbf{H}_m^{(g)+} \right]^1 \mathbf{x}_m^{(g)} = s_m^{(g),1} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^K s_k^{(g),1} + \tilde{\zeta}_m^{(g)} \quad (19)$$

در رابطه فوق،  $\mathbf{H}_m^{(g)+}$  ماتریس شبه معکوس  $\mathbf{H}_m^{(g)}$  است و  $[\mathbf{A}]^1$  نیز مبین اولین سطر ماتریس  $\mathbf{A}$  است. واضح است که داده ارسالی تمام کاربرها بر روی آنتن اول در زیرحامل  $g$  ام را دربردارد. پس از گسترش زدایی خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} z_m^1 &= \sum_{g=1}^{\gamma} c_m^{(g)} y_m^{(g),1} \\ &= \sum_{g=1}^{\gamma} c_m^{(g)} s_m^{(g),1} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^K \sum_{g=1}^{\gamma} c_m^{(g)} s_k^{(g),1} + \sum_{g=1}^{\gamma} c_m^{(g)} \tilde{\zeta}_m^{(g)} \quad (20) \\ &= d_m^1 + \sum_{g=1}^{\gamma} c_m^{(g)} \tilde{\zeta}_m^{(g)} \end{aligned}$$

$z_m^1$  شامل سمبل ارسالی و نویز است که پس از آشکارسازی، می توان به تخمینی از سمبل ارسالی  $\hat{d}_m^1$  رسید. قدم بعدی در گیرنده لایه ای، استخراج سمبل آشکارشده در رابطه (۲۰) از بردار دریافتی،  $\mathbf{x}_m^{(g)}$  است. اما در رابطه (۱۹)، باید به این نکته توجه داشت که با استفاده از فیلتر فضایی  $\left[ \mathbf{H}_m^{(g)+} \right]^1$  سیگنال ارسالی تمام کاربرها بر روی آنتن هایی غیر از آنتن شماره ۱ حذف می شود. پس از گسترش زدایی طبق (۲۰)، سیگنال ارسالی کاربران دیگر بر روی آنتن شماره ۱ حذف می شود. لذا علاوه بر استخراج سمبل آشکار شده  $z_m^1$ ، بایستی اثر سیگنال ارسالی کاربران دیگر بر روی آنتن شماره ۱ (که آن را با  $I_m^{(g),1}$  نشان می دهیم) نیز از  $\mathbf{x}_m^{(g)}$  استخراج شود. بنابراین بردار دریافتی جدید به صورت زیر بدست می آید:

$$\hat{d}_{m,j} = \mathbf{g}_{m,j}^H \mathbf{F}_{m,j}^H \tilde{\mathbf{y}}_m \quad (12)$$

که  $\mathbf{g}_{m,j}$  ستون  $j$  ام ماتریس  $\mathbf{G}_m$  است. با تبدیل ماتریس قطری  $\mathbf{F}_{m,j}$  به بردار  $\mathbf{f}_{m,j}$  و همچنین تبدیل بردار  $\mathbf{g}_{m,j}$  به ماتریس قطری  $\tilde{\mathbf{G}}_{m,j} = \text{diag}(g_{m,j}^{(1)}, g_{m,j}^{(2)}, \dots, g_{m,j}^{(NL)})$  می توان رابطه (۱۲) را به صورت زیر بازنویسی کرد

$$\begin{aligned} \hat{d}_{m,j} &= \mathbf{f}_{m,j}^H \tilde{\mathbf{G}}_{m,j}^H \tilde{\mathbf{y}}_m \\ &= \mathbf{f}_{m,j}^H \tilde{\mathbf{G}}_{m,j}^H \mathbf{\Lambda}_m \mathbf{V}_m^H \mathbf{C}_m \mathbf{d}_m \\ &\quad + \mathbf{f}_{m,j}^H \tilde{\mathbf{G}}_{m,j}^H \mathbf{\Lambda}_m \mathbf{V}_m^H \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^K \mathbf{C}_k \mathbf{d}_k \\ &\quad + \mathbf{f}_{m,j}^H \tilde{\mathbf{G}}_{m,j}^H \mathbf{U}_m^H \zeta_m \end{aligned} \quad (13)$$

برای آن که بتوان بردار ترازش مربوط به سمبل  $j$  ام (یعنی  $\mathbf{f}_{m,j}$ ) را محاسبه کرد، میانگین مجذور خطا (MSE) را برای این سمبل به صورت زیر تعریف می کنیم

$$J = E \left\| \mathbf{d}_{m,j} - \hat{\mathbf{d}}_{m,j} \right\|^2 \quad (14)$$

از آنجا که معیار MMSE را برای سمبل در نظر می گیریم و ترازش را برای هر چیپ سیستم انجام می دهیم، این گیرنده را Symol-Chip level MMSE یا اختصاراً (SC-MMSE) می نامیم.

برای کمینه کردن معیار MSE در رابطه (۱۴) از آن مشتق گرفته و حاصل را مساوی صفر قرار می دهیم. در این صورت، پس از انجام محاسبات، بردار ترازش سمبل  $j$  ام به صورت زیر تعیین می شود

$$\mathbf{f}_{m,j} = \left( \mathbf{A}_{m,j} + \mathbf{B}_{m,j} \right)^{-1} \mathbf{a}_{m,j} \quad (15)$$

به نحوی که داریم

$$\mathbf{A}_{m,j} = \tilde{\mathbf{G}}_{m,j}^H \mathbf{\Lambda}_m \mathbf{V}_m^H \left( \sum_{k=1}^K \mathbf{C}_k \mathbf{C}_k^H \right) \mathbf{V}_m \mathbf{\Lambda}_m \tilde{\mathbf{G}}_{m,j} \quad (16)$$

$$\mathbf{B}_{m,j} = \sigma_{\zeta}^2 \tilde{\mathbf{G}}_{m,j}^H \tilde{\mathbf{G}}_{m,j} \quad (17)$$

$$\mathbf{a}_{m,j} = \tilde{\mathbf{G}}_{m,j}^H \mathbf{\Lambda}_m \mathbf{V}_m^H \mathbf{c}_{m,j} \quad (18)$$

با استفاده از بردار بدست آمده در رابطه فوق، اثر کانال MIMO کاملاً حذف نمی شود و در نتیجه تداخل های CSI و MUI به طور کامل از بین نمی روند. اما از آنجا که در این گیرنده معیار MSE کمینه می شود، مقدار تداخل باقیمانده بسیار کم است و عملکرد آن در مجموع بسیار بهتر از گیرنده TIC است.

$$\mathbf{x}_m^{(g)'} = \mathbf{x}_m^{(g)} - (c_m^{(g)} \hat{d}_m^1 + I_m^{(g),1}) \left[ \mathbf{H}_m^{(g)T} \right]^T \quad (21)$$

در عبارت فوق  $c_m^{(g)} \hat{d}_m^1$  نشان دهنده تخمین داده کاربر مطلوب در زیرحامل  $g$  ام و  $I_m^{(g),1}$  نشان دهنده تداخل سایر کاربران در زیرحامل  $g$  ام ارسال شده بر روی آنتن شماره 1 است که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$I_m^{(g),1} = y_m^{(g),1} - c_m^{(g)} z_m^1 \quad (22)$$

در لایه بعدی، بردار اصلاح شده  $\mathbf{x}_m^{(g)'}$  برای آشکارسازی سایر سمبل های ارسالی مورد استفاده قرار می گیرد. گیرنده فوق که از فیلتر فضایی ZF استفاده می کند، با عنوان ZF-OSSMIC نامیده می شود. لازم به ذکر است که  $\mathbf{H}_m^{(g)+}$  می تواند به صورت فیلتر فضایی MMSE نیز تولید شود که برای توضیحات بیشتر در این زمینه می توان به مرجع [2] مراجعه کرد.

#### 5- مقایسه پیچیدگی محاسباتی

در این بخش به مقایسه درجه پیچیدگی محاسباتی گیرنده های خطی مبتنی بر SVD و گیرنده های غیرخطی حذف تداخل تکراری می پردازیم. برای این منظور معیار مقایسه را فلاپ (flop) در نظر می گیریم. هر عملگر محاسباتی حقیقی (جمع، ضرب، تفریق و تقسیم) یک فلاپ نامیده می شود [7]. فرض می کنیم که  $J = M = N$ . در این صورت با شمارش عملگرهای مورد نیاز در گیرنده های خطی TIC و SC-MMSE می توان به راحتی نشان داد که بیشترین محاسبات مربوط به محاسبه SVD ماتریس کانال مطابق رابطه (6) است. از آنجا که ماتریس  $\mathbf{H}_m$  یک ماتریس قطری بلوکی است، برای محاسبه SVD آن بایستی به تعداد  $L$  بار SVD ماتریس زیرحامل های  $N' \times N$  محاسبه شود. از آنجا که درجه پیچیدگی محاسباتی SVD برای یک ماتریس  $N' \times N$  به روش ارائه شده در [7] برابر  $O(N^3)$  است، در نتیجه درجه پیچیدگی محاسباتی گیرنده های TIC و SC-MMSE برابر  $O(LN^3)$  است.

برای انجام حذف تداخل لایه ای فضا-زمان معرفی شده در بخش 4 در گیرنده های غیرخطی ZF-OSSMIC و MMSE-OSSMIC، در هر زیرحامل بایستی به تعداد  $J = N$  بار عمل معکوس گیری از یک ماتریس مربعی انجام شود. با توجه به حذف ستون های آشکارسازی شده در انتهای پردازش در هر لایه، ابعاد این ماتریس در لایه اول  $N \times N$  است. در لایه بعدی پردازش ابعاد ماتریس به  $(N-1) \times (N-1)$  کاهش می یابد و در

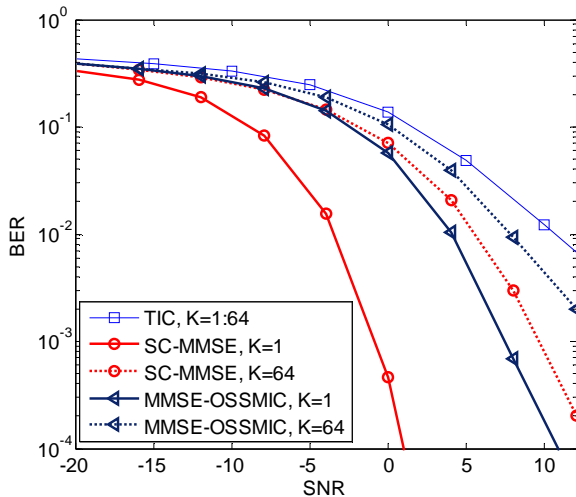
آخرین لایه معکوس یک اسکالر محاسبه می شود. در نتیجه درجه پیچیدگی محاسباتی گیرنده های غیرخطی OSSMIC بیشتر از  $O(LN^3)$  و کمتر از  $O(LN^4)$  می باشد که این مقدار بالاتر از درجه پیچیدگی گیرنده های خطی مبتنی بر SVD می باشد.

#### 6- نتایج شبیه سازی

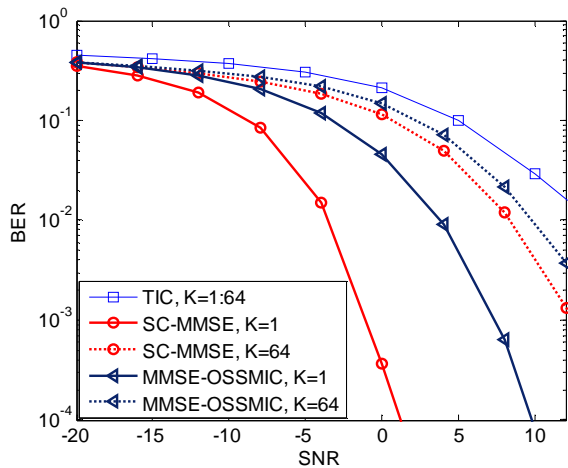
برای انجام شبیه سازی ها، سیستم MIMO MC-CDMA در حالت فرسو با  $L = 64$  زیرحامل در نظر گرفته شده است. فرستنده مرکزی با  $N$  آنتن دنباله سمبل های مستقل و با توزیع یکنواخت را برای  $K$  کاربر با مدولاسیون 16QAM ارسال می کند. تعداد آنتن های گیرنده  $M$  می باشد. کد گسترش به کاررفته، کد متعامد Walsh-Hadamard می باشد. کانال ارتباطی بین فرستنده و گیرنده، فرکانس گزین تارکننده و دارای گسترش تاخیر نمایی با حداکثر  $L_c = 16$  مسیر است. تمام نتایج با میانگین گیری بر روی 10000 تحقق پذیری مستقل کانال مخابراتی بدست آمده اند.

در این بخش، عملکرد گیرنده های خطی معرفی شده، از لحاظ نرخ خطا (BER) با عملکرد گیرنده های غیر خطی OSSMIC مقایسه می شود. همچنین نتایج گیرنده مرسوم مبتنی بر SVD است که آن را Conventional SVD یا اختصاراً CSVD می نامیم [6]، نیز برای مقایسه آورده شده است.

در شکل 1 عملکرد BER روش TIC با روش های CSVD و ZF-OSSMIC، در شرایط تک کاربره و تمام بار برای  $J = M = N = 2$  مقایسه شده است. همان طور که در شکل دیده می شود، عملکرد هر سه روش، در حالت تک کاربره کاملاً یکسان است. اما در شرایطی که  $K = 64$ ، روش CSVD توانایی حذف تداخل چندکاربره را ندارد. از طرف دیگر، منحنی BER گیرنده های TIC و ZF-OSSMIC، در دو حالت  $K=1$  و  $K=64$  کاملاً بر روی هم افتاده است. یعنی گیرنده های TIC و ZF-OSSMIC قادر هستند که تداخل فضایی و چندکاربره را به طور کامل و به یک اندازه حذف کنند. منحنی خطای گیرنده خطی SC-MMSE برای مدولاسیون 16QAM و  $J = M = N = 2$  با عملکرد خطای روش TIC و MMSE-OSSMIC در شکل 2 مقایسه شده است. مشاهده می شود که عملکرد خطای TIC، در مقایسه با گیرنده های با معیار MMSE چندان خوب نیست. زیرا در روش TIC، مقادیر تکین کوچک ماتریس کانال باعث تقویت نویز می شوند. همچنین دیده می شود که گیرنده خطی SC-



شکل ۲: نرخ خطای بیت بر حسب SNR برای گیرنده های SC-MMSE و TIC برای  $J = M = N = 2$  و مدولاسیون 16QAM در مقایسه با MMSE-OSSMIC



شکل ۳: نرخ خطای بیت بر حسب SNR برای گیرنده های SC-MMSE و TIC برای  $J = M = N = 4$  و مدولاسیون 16QAM در مقایسه با MMSE-OSSMIC

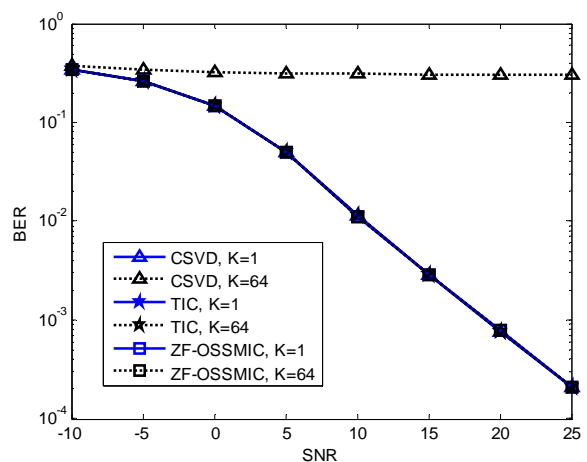
## مراجع

- [1] M. Vehkaperä, D. Tujkovic, Z. Li and M. Juntti, "Receiver design for spatially layered downlink MC-CDMA system," *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, vol. 54, No. 3, pp. 1042 - 1055, May 2005.
- [2] Y. Lee, H. Park, "Low-Complexity Detections for downlink MIMO MC-CDMA systems," in *Proc. IEEE PIMRC Fall*, pp. 1-5, Sep 2006.
- [3] K. Kyeongyeon, H. Jaesang, L. Chungyong, and S. Seijoon, "Asymptotic analysis of downlink MIMO multicarrier CDMA systems with a minimum mean square error receiver," in *Proc. IEEE VTC Spring*, vol 3, pp. 1501-1505, 2006.
- [4] Z. Lei, X. Peng and F. Chin, "V-BLAST receivers for downlink MC-CDMA systems," in *Proc. IEEE VTC*, October 2003, pp. 866-870.
- [5] A. Phasouliotis and D.K.C. So, "A novel OSSMIC receiver for downlink MIMO MC-CDMA systems," in *Proc. IEEE VTC*, May 2008, pp. 1271-1275.
- [6] H. Zamiri-Jafarian, M. Rajabzadeh, "SVD-based receiver for downlink MIMO MC-CDMA systems," accepted in *IEEE ICC*, 2009.
- [7] G. H. Golub and C. F. V. Loan, *Matrix Computations*, 3rd ed. Baltimore(MD), USA: Johns Hopkins University Press, 1996.

MMSE عملکرد BER بهتری در مقایسه با گیرنده غیرخطی MMSE-OSSMIC در هر دو حالت تک کاربره و چندکاربره دارد. از طرف دیگر، از آنجایی که SC-MMSE تعامد کدها را حفظ نمی کند، نمی تواند MUI را کاملاً حذف کند. این مساله باعث افت کمی در کارایی آن در حضور MUI می شود. با این وجود عملکرد آن در شرایط تمام بار همچنان از عملکرد تک کاربره روش TIC بهتر است. مقایسه عملکرد گیرنده های SC-MMSE نشان داده شده است. نتایج شکل ۲، در این شکل نیز تکرار می شود.

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله عملکرد گیرنده های نوین خطی معرفی شده در [۶] برای حذف تداخل های CSI و MUI در سیستم های چندکاربره MIMO MC-CDMA در حالت فرسوسو با عملکرد گیرنده های غیر خطی پیشنهادی در [۵] مقایسه شد. نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد که گیرنده خطی TIC توانایی حذف کامل تداخل های MUI و CSI را دارد و عملکرد آن با عملکرد گیرنده غیر خطی ZF-OSSMIC یکسان است. از طرف دیگر، در گیرنده خطی SC-MMSE گرچه تداخل های چندکاربره و فضایی کاملاً حذف نمی شود، اما به دلیل در نظر گرفتن معیار کمینه سازی میانگین مجذور خطای آشکارسازی سمبل، عملکرد BER آن حتی در شرایط حالت تمام بار بهتر از عملکرد گیرنده خطی TIC و همچنین گیرنده های غیر خطی OSSMIC است. در مجموع، گیرنده های خطی معرفی شده، عملکرد بهتری را هم از لحاظ نرخ خطا و هم از لحاظ حجم محاسباتی نشان می دهند.



شکل ۴: نرخ خطای بیت بر حسب SNR برای گیرنده TIC برای  $J = M = N = 2$  و مدولاسیون 16QAM در مقایسه با گیرنده ZF-OSSMIC