

# مقایسه عملکرد و پیچیدگی آشکارسازهای چندکاربره CDMA در ترکیب با روشهای مختلف دایورسیتی ارسال و دریافت در کانالهای فیدینگ تخت

وحید طباطبائوکیلی، سیدمحمد رضوی زاده و پائیز عزمی

**چکیده:** دو فاکتور مهم محدودکننده عملکرد در سیستم‌های سیار CDMA، تداخل چند کاربره و اعوجاج چندمسیری می‌باشند. تاکنون تکنیک‌های پردازشی متعددی برای مقابله با این تداخل و اعوجاج پیشنهاد شده‌اند که دو دسته مهم آنها آشکارسازی چند کاربره (MUD) و کدینگ فضا-زمان (STC) می‌باشند. روشهای آشکارسازی چندکاربره به موضوع چگونگی کاهش و یا حذف تداخل چندکاربره در سیستم‌های CDMA می‌پردازند. از سوی دیگر کدهای فضا-زمان با بهره‌گیری از آنتنهای چندگانه در فرستنده و گیرنده، تکنیک‌هایی را برای مقابله با فیدینگ در کانال‌های بی‌سیم ارائه می‌نمایند. در این مقاله ترکیب دو روش مذکور مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور روشهای کلی آشکارسازهای چندکاربره شامل تکنیک‌های خطی و غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته و ساختارهایی برای کاربرد آنها در سیستم‌های CDMA که بیش از یک آنتن در فرستنده و گیرنده خود استفاده می‌نمایند، ارائه می‌شود. سپس عملکرد نرخ خطای این ساختارها از طریق شبیه‌سازی کامپیوتری مطالعه و با هم مقایسه می‌گردد. در بخش دیگری از مقاله پیچیدگی ساختارهای گیرنده پیشنهادی محاسبه و با یکدیگر مقایسه می‌گردند.

**واژه‌های کلیدی:** سیستم‌های CDMA، آشکارسازی چندکاربره، کدهای فضا-زمان، کانال‌های فیدینگ تخت

## ۱. مقدمه

یکی از مشکلات اساسی در سیستم‌های DS-SS<sup>۱</sup> تداخل چندکاربره یا MAI<sup>۲</sup> است. این تداخل از نامتعامل بودن کدهای گسترده‌ساز<sup>۳</sup> کاربران در گیرنده ایجاد می‌شود. اثرات مهم این تداخل در سیستم‌های CDMA افت عملکرد و محدود شدن ظرفیت می‌باشند. تاکنون روشهای مختلفی برای مقابله با این تداخل ارائه شده‌اند که یکی از این روشها آشکارسازی چندکاربره یا MUD<sup>۴</sup>

است. در روشهای آشکارسازی چندکاربره سعی بر این است که با استفاده از اطلاعاتی نظیر کد، توان ارسالی و زمانبندی کاربران اثر تداخل چندکاربره کاسته و یا بطور کامل حذف شود. در طول چند سال گذشته تحقیقات بسیاری در زمینه تکنیک‌های مختلف آشکارسازی چندکاربره در سیستم‌های CDMA صورت گرفته و روشهای مختلفی هم برای آن ارائه گردیده است. در سال ۱۹۸۶ آشکارساز چندکاربره بهینه یا آشکارساز MLSD<sup>۵</sup> برای اولین بار توسط Verdu پیشنهاد شد [۱ و ۲]. آشکارساز بهینه با داشتن قابلیت‌هایی نظیر مقاومت در برابر مشکل دور-نزدیک و کاهش MAI، دارای عملکرد بهتری نسبت به آشکارسازهای متعارف در سیستم CDMA می‌باشد. ولی پیچیدگی این آشکارساز در سیستم‌های عملی بسیار زیاد است. به این دلیل در طول دهه گذشته تحقیقات بسیاری در مورد طراحی آشکارسازهای زیربهینه که از لحاظ پیاده‌سازی عملی‌تر باشند، انجام گرفته است.

مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۱۱/۱۹ دریافت و در تاریخ ۱۳۸۴/۹/۱ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر وحید طباطبائوکیلی، دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران.  
vakily@iust.ac.ir

دکتر سیدمحمد رضوی زاده، مرکز تحقیقات مخابرات ایران.  
smrazavi@ieee.org

دکتر پائیز عزمی، دانشکده برق، دانشگاه تربیت مدرس.  
pazmi@modares.ac.ir

<sup>۱</sup> Direct Sequence-Code Division Multiple Access

<sup>۲</sup> Multiple Access Interference

<sup>۳</sup> Spreading Codes

<sup>۴</sup> Multiuser Detection

<sup>۵</sup> Maximum Likelihood Sequence Detector

مقالات ارائه شده در مورد آشکارسازی چندکاربره فضا-زمان نیز در اکثر موارد به مبحث ترکیب آشکارسازی چندکاربره و روشهای شکل‌دهی بیم در یک آرایه آنتن‌ها پرداخته‌اند [۷ و ۹]. کارهای اولیه در مورد ترکیب کدینگ فضا-زمان و آشکارسازی چندکاربره در [۱۰ و ۱۱] آمده است.

بعد از این، چندین مقاله در مورد استفاده از کدینگ فضا-زمان در سیستم‌های CDMA و بررسی ساختارهای فرستنده و گیرنده برای آنها منتشر شده است [۱۲، ۱۵ و ۱۶]. با این وجود در اکثر کارهای انجام شده بیشتر تکیه بر تکنیکهای کدینگ فضا-زمان بوده و بررسی روشهای آشکارسازی چندکاربره کمتر مورد توجه بوده است [۱۶ و ۱۷]. در اکثر مقالات از آشکارسازی چندکاربره خطی مانند آشکارساز ناهمبسته‌ساز و یا MMSE استفاده شده است [۱۱، ۱۳، ۱۸ و ۲۱]. در مقاله حاضر چندساختار گیرنده برای آشکارسازی کدینگ فضا-زمان در سیستم‌های CDMA ارائه می‌شود. این ساختارهای گیرنده بر اساس ترکیب روشهای مختلف آشکارسازی چندکاربره خطی و غیرخطی و دیکدینگ فضا-زمان می‌باشند. تأکید این مقاله بر روی استفاده از روشهای مختلف آشکارسازی چندکاربره و ارائه ساختارهایی ساده برای استفاده از آنها در سیستم‌های CDMA چندآنتنی و مقایسه آنها است. مقایسه عملکرد ساختارهای ارائه شده با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری انجام می‌گیرد [۱۹]. همچنین پیچیدگی ساختارهای ارائه شده محاسبه می‌گردد تا بتواند در کنار عملکرد خطا، بعنوان معیاری برای انتخاب یک ساختار مناسب بکار گرفته شود. در مقایسه با کارهای مشابه قبلی میتوان گفت که در این مقاله (۱) گیرنده‌های پیشنهادی جهت ترکیب روشهای آشکارسازی چندکاربره غیرخطی (SIC و PIC و DF) با کدینگ فضا-زمان در مقالات قبلی ارائه نشده است (۲) در این مقاله در یک قالب ثابت، به بررسی روشهای مختلف ترکیب آشکارسازی چندکاربره و کدینگ فضا-زمان پرداخته شده است. یعنی در مقالات مختلف قبلی، از مدلهای شبیه‌سازی متفاوت بهره برده‌اند. ولی جهت مقایسه این روشها لازم است تا آنها در یک شرایط یکسان بررسی گردند. این مطلب در مورد روشهای آشکارسازی چندکاربره در مقالاتی نظیر [۲ و ۱۲] وجود داشته ولی در مورد ترکیب آشکارسازی چندکاربره و کدینگ فضا-زمان مشاهده نداشتند. (۳) علاوه بر این پیچیدگی گیرنده‌ها نیز محاسبه و با هم مقایسه شده است. این مساله هم در هیچ یک از مقالات مرتبط قبلی موجود نبوده است. به عنوان مثال، در مقاله [۲۱] پیچیدگی‌های روشهای آشکارسازی چندکاربره به تنهایی و بدون کدینگ فضا-زمان بررسی شده است.

ساختار این مقاله بصورت زیر می‌باشد. در بخش دوم ساختارهای ترکیبی پیشنهادی برای آشکارسازی چندکاربره فضا-زمان ارائه شده‌اند. در بخش سوم نتایج شبیه‌سازی در مورد بررسی عملکرد ساختارهای ترکیبی نشان داده شده است. در بخش چهارم پیچیدگی محاسباتی روشها با هم مقایسه شده و بخش پنجم هم به جمع‌بندی مقاله می‌پردازد.

آشکارسازهای زیر بهینه را می‌توان به دو گروه عمده آشکارسازهای خطی و آشکارسازهای حذف‌کننده تداخل به روش تفریق<sup>۶</sup> (یا آشکارسازهای غیرخطی) طبقه‌بندی کرد. آشکارساز ناهمبسته‌ساز<sup>۷</sup> و آشکارساز MMSE از انواع مهم آشکارسازهای چندکاربره خطی [۲۱] و آشکارساز حذف متوالی تداخل (SIC)<sup>۸</sup>، آشکارساز حذف‌کننده موازی تداخل (PIC)<sup>۹</sup> و آشکارساز با فیدبک تصمیم (DF)<sup>۱۰</sup> از انواع آشکارسازهای غیر خطی می‌باشند. مبحث دیگری که چندسال اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته، استفاده از چندین آنتن در فرستنده و گیرنده سیستم‌های بی‌سیم به منظور مقابله و یا بهره‌برداری از فیدینگ چندمسیره می‌باشد. در این رابطه دو هدف عمده مد نظر بوده است.

گروهی از این تحقیقات در مورد استفاده از سیستم‌های چند آنتنی در فرستنده و گیرنده یا بعبارت دیگر استفاده از ساختارهای MIMO<sup>۱۱</sup> برای رسیدن به ظرفیت بالای انتقال در کانال‌های فیدینگ چندمسیره متمرکز بوده و گروه دیگر به بهره‌گیری از روش دایورسیتی ارسال<sup>۱۲</sup> و معرفی کدهای فضا-زمان<sup>۱۳</sup> (STC) برای غلبه بر فیدینگ در سیستم‌های موبایل و بهبود عملکرد این نوع از سیستم‌ها پرداخته‌اند [۳ و ۶].

کدهای فضا-زمان به دو دسته کلی کدهای ST بلاکی یا STBC<sup>۱۴</sup> و کدهای ST ترلیسی یا STTC<sup>۱۵</sup> تقسیم می‌شوند. در مقایسه این دو نوع از کدها میتوان گفت که کدهای STBC به علت ساختار ساده‌تر از مقبولیت بیشتری برخوردار بوده و به همین دلیل در مقاله حاضر از این دسته از کدها بهره گرفته شده است.

معروفترین کد STBC، کد پیشنهادی توسط Alamouti است [۵]. این کد از دو آنتن در جهت ارسال استفاده کرده و با استفاده از یک پردازش خطی در گیرنده سیگنالها را دیکد می‌کند. کد پیشنهادی توسط Alamouti یک کد فضا-زمان با نرخ یک می‌باشد. به علت سادگی دیکدینگ، از این کد در بسیاری از مراجع استفاده شده و حتی بصورت یک پیشنهاد در سیستم موبایل نسل سوم هم مطرح شده است.

در بررسی مقالات مربوط به حذف تداخل در سیستم‌های CDMA میتوان دریافت که در اکثر مقالات اولیه که در مورد تکنیک‌های آشکارسازی چندکاربره ارائه شده‌اند، سیستم CDMA از یک آنتن در جهت ارسال و یا دریافت استفاده می‌نماید. از سوی دیگر در اکثر مقالات اصلی مبحث کدینگ فضا-زمان و یا MIMO، سیستم‌های تک‌کاربره مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

<sup>6</sup> Subtractive Interference Cancellation detector

<sup>7</sup> Decorrelating detector

<sup>8</sup> Successive Interference cancellation

<sup>9</sup> Parallel Interference Cancellation

<sup>10</sup> Decision Feedback

<sup>11</sup> Multiple Input-Multiple Output

<sup>12</sup> Transmit Diversity

<sup>13</sup> Space-Time Codes

<sup>14</sup> Space-Time Block Codes

<sup>15</sup> Space-Time Trellis Codes

مختلف کاربرها است. می‌توان سیگنال دریافتی در رابطه (۱) را بصورت زیر بشکل ماتریسی نوشت:

$$\mathbf{r}_p = \mathbf{b} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{h}_p \cdot \mathbf{C} \quad p=1,2 \quad (2)$$

که  $\mathbf{C} = [\mathbf{C}_1 \mathbf{C}_2 \dots \mathbf{C}_K]^T$  ماتریس کدهای کاربران با ابعاد  $K \times N$ ،  $\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_K]$  بردار دیتا کاربران با ابعاد  $1 \times K$  و  $\mathbf{h}_p = \text{diag}(h_{p,1}, h_{p,2}, \dots, h_{p,K})$  و  $\mathbf{A} = \text{diag}(A_1, A_2, \dots, A_K)$  به ترتیب ماتریس دامنه‌ها و کانال مربوط به آنتن  $p$ ام و هر دو با ابعاد  $K \times K$  هستند.

در ادامه نحوه آشکارسازی را با فرض استفاده از هر یک از آشکارسازهای مطرح شده در بخش قبل مورد بررسی قرار می‌دهیم.

### ۲-۱-۱. گیرنده متعارف CDMA

در این حالت در هر آنتن از یک گیرنده متعارف یا یک فیلتر منطبق استفاده می‌شود.

خروجی هر یک از این فیلترهای منطبق در آنتن  $p$ ام یک بردار به طول  $K$  است که بصورت زیر از ضرب سیگنال دریافتی توسط آن آنتن در ماتریس کدهای کاربران بدست می‌آید:

$$\mathbf{t}_p = \mathbf{r}_p \mathbf{C}^T \quad p=1,2 \quad (3)$$

خروجی دو فیلتر منطبق توسط تکنیک  $\text{MRC}^{16}$  با هم ترکیب شده تا متریک مناسب برای تصمیم‌گیری بدست آید:

$$\mathbf{z} = \mathbf{t}_1 \cdot \mathbf{h}_1^* + \mathbf{t}_2 \cdot \mathbf{h}_2^* \quad (4)$$

و در نهایت تصمیم‌گیری ML در مورد بردار بیت‌های ارسالی انجام خواهد شد.

### ۲-۱-۲. آشکارساز چندکاربره ناهمبسته‌ساز

برای بهبود عملکرد گیرنده CDMA می‌توان از آشکارساز چندکاربره استفاده کرد. در این قسمت ما از آشکارساز خطی ناهمبسته‌ساز استفاده کرده‌ایم. این آشکارساز مطابق شکل (۱) در خروجی گیرنده متعارف در هر آنتن قرار می‌گیرد. در اینصورت می‌توان نوشت:

$$\mathbf{u}_p = \mathbf{t}_p \mathbf{R}_{lin} \quad p=1,2 \quad (5)$$

که در این رابطه بردار  $\mathbf{u}_p$  بردار  $1 \times K$  خروجی آشکارساز ناهمبسته‌ساز و  $\mathbf{R}_{lin}$  ماتریس ناهمبسته‌ساز با ابعاد  $K \times K$  بصورت زیر تعریف می‌شود [۱]:

$$\mathbf{R}_{lin} = \mathbf{R}_{dec} = \mathbf{R}^{-1} = (\mathbf{C} \mathbf{C}^T)^{-1} \quad (6)$$

بعد از این مرحله تخمین بردار دیتای ارسالی  $\hat{\mathbf{b}}$  از روی خروجی این آشکارساز چندکاربره بصورت زیر تعیین می‌گردد:

$$\mathbf{z} = \mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{h}_1^* + \mathbf{u}_2 \cdot \mathbf{h}_2^* \quad (7)$$

## ۲. ساختارهای ترکیبی برای آشکارسازی چندکاربره

### فضا-زمان

در بخش قبلی مقدمه‌ای از آشکارسازی چندکاربره و کدینگ-فضا-زمان بیان شد. در این بخش، استفاده از کدینگ-فضا-زمان بلوکی را در سیستم‌های CDMA با استفاده از آشکارسازی چندکاربره بررسی می‌کنیم. برای اینکار عملکرد تکنیک‌های مختلف آشکارسازی چندکاربره را در سیستم‌هایی با چند آنتن در فرستنده و گیرنده بدست می‌آوریم.

برای ارسال سیگنالها در روی چند آنتن از کدینگ-فضا-زمان بلوکی پیشنهادی توسط Alamouti بهره می‌گیریم. ما بررسی خود را به چند حالت مختلف داپورسیتی یا آرایشهای مختلف آنتنها در فرستنده و گیرنده، محدود می‌کنیم:

الف) یک آنتن در فرستنده، دو آنتن در گیرنده، (ب) دو آنتن در فرستنده، یک آنتن در گیرنده، (ج) یک آنتن در فرستنده، چهار آنتن در گیرنده، (د) دو آنتن در فرستنده، دو آنتن در گیرنده.

البته ساختارهای بدست آمده قابل تعمیم به لینک‌های با بیش از دو آنتن و کدهای فضا-زمان دیگر هم می‌باشند. تکنیک‌های آشکارسازی چندکاربره مورد بررسی نیز عبارتند از:

۱- آشکارساز ناهمبسته‌ساز،

۲- آشکارساز MMSE،

۳- آشکارساز PIC،

۴- آشکارساز SIC،

۵- آشکارساز DF. در این بخش ساختارهای مختلف حاصل از ترکیب حالات بالا را بدست آورده و عملکرد آنها را با یکدیگر مقایسه می‌کنیم.

### ۲-۱. یک آنتن در فرستنده، دو آنتن در گیرنده

در این حالت هر یک از کاربرها از طریق یک آنتن ارسالی سیگنال خود را به گیرنده که به دو آنتن مجهز می‌باشد، ارسال می‌کنند. در این صورت سیگنال دریافتی در هر یک از آنتنهای گیرنده بصورت زیر است:

$$\mathbf{r}_p = \sum_{k=1}^K A_k b_k h_{k,p} \mathbf{C}_k + \mathbf{n}_p, \quad p=1,2 \quad (1)$$

که در این رابطه بردار  $\mathbf{r}_p$  بردار  $1 \times N$  نشان‌دهنده سیگنال دریافتی در آنتن  $p$ ام،  $A_k$  دامنه سیگنال مربوط به کاربر  $k$ ام،  $b_k$  بیت اطلاعات مربوط به کاربر  $k$ ام،  $h_{p,k}$  ضریب کانال بین آنتن فرستنده کاربر  $k$ ام و آنتن  $p$  در گیرنده ایستگاه ثابت،  $\mathbf{C}_k$  بردار کد گسترده‌ساز مربوط به کاربر  $k$ ام با ابعاد  $1 \times N$  بردار نویز در آنتن  $p$ ام با ابعاد  $1 \times N$  می‌باشند. مدولاسیون مورد استفاده در این مقاله، مدولاسیون BPSK می‌باشد.

این سیگنال در هر یک از آنتنهای گیرنده دریافت می‌شود. مطابق رابطه بالا، سیگنال دریافتی در هر آنتن ترکیبی از سیگنالهای

<sup>16</sup> Maximal Ratio Combining

### ۵-۱-۲. آشکارساز چند کاربره SIC

آشکار ساز SIC ساختاری مشابه آشکارساز PIC دارد. تنها تفاوت در اینجا آنست که در این آشکار ساز سیگنال کاربران بصورت سریال و متوالی آشکارسازی شده و پس از تخمین دیتای یک کاربر، MAI مربوط به آن کاربر با کمک اطلاعات کد آن کاربر و اطلاعات کانال محاسبه شده و از کل سیگنال دریافتی کاسته می‌شود. سپس این سیگنال به طبقه بعد که مربوط به کاربر دیگر می‌باشد، داده می‌شود. در نتیجه این آشکارساز یک آشکارساز چندطبقه محسوب می‌گردد که تعداد طبقات در آن برابر تعداد کاربران می‌باشد [۲۰]. در این آشکار ساز لازم است تا در ابتدا کاربرها بر اساس ترتیب توانی مرتب شوند [۱]. اگر فرض کنیم مجموعه زیر نشان دهنده شماره کاربران بر اساس ترتیب توانی باشد:

$$\mathbf{s} \equiv \{k_1, k_2, \dots, k_K\} \quad (11)$$

برای کاربر  $k_1$  ام که قویترین کاربر می‌باشد عملیات آشکارسازی بر اساس روابط زیر انجام می‌گیرد:

$$z_{p,k_1} = h_{k_1,p}^* \mathbf{r}_p \mathbf{C}_{k_1}^T \quad p=1,2 \quad (12)$$

$$\hat{b}_{k_1} = \text{sign}(\Re\{z_{1,k_1} + z_{2,k_1}\}) \quad (13)$$

$$\mathbf{MAI}_{p,k_1} = A_{k_1} b_{k_1} h_{k_1,p} \mathbf{C}_{k_1} \quad p=1,2 \quad (14)$$

$$\mathbf{r}_p = \mathbf{r}_p - \mathbf{MAI}_{p,k_1} \quad (15)$$

برای سایر کاربرها نیز عملیاتی مشابه عملیات فوق انجام می‌گیرد. بعد از  $K$  طبقه سیگنال تمامی کاربرها آشکار خواهد شد.

### ۶-۱-۲. آشکارساز چند کاربره DF

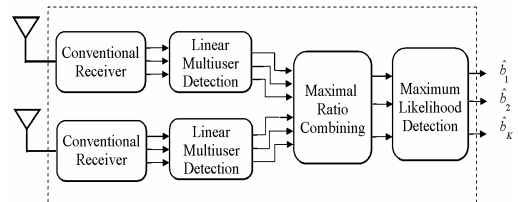
آشکارساز چند کاربره DF یک آشکارساز چند کاربره غیرخطی بوده که ساختاری مشابه آشکارساز SIC دارد با این تفاوت که سیگنال دریافتی در ابتدا توسط یک فیلتر سفیدکننده فیلتر شده و سپس عملیات حذف MAI مشابه SIC بصورت سریال انجام می‌گیرد. اولین واحد در این آشکارساز یک گیرنده متعارف است. فیلتر سفیدکننده از تجزیه Cholesky ماتریس همبستگی بصورت زیر بدست می‌آید [۲۰]:

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}^T \mathbf{F} \quad (16)$$

ماتریس  $F$  مربعی و با ابعاد  $K \times K$  می‌باشد. خروجی آشکارساز متعارف در ماتریس سفیدکننده  $(\mathbf{F})^{-1}$  ضرب می‌شود:

$$\mathbf{u}_p = \mathbf{t}_p (\mathbf{F})^{-1} \quad p=1,2 \quad (17)$$

در این آشکارساز نیز در ابتدا سیگنالها بر حسب دریافتی مرتب شده و اولین (قویترین) سیگنال بصورت زیر آشکارسازی می‌گردد:



شکل ۱. ساختار گیرنده با استفاده از دو آنتن در گیرنده و آشکارساز چند کاربره خطی

### ۳-۱-۲. آشکارساز چند کاربره MMSE

در مورد آشکارساز MMSE هم میتوان از ساختاری مشابه شکل (۱) و روابط مشابه روابط قسمت قبل استفاده کرد. تنها تفاوت در ماتریس ناهمبسته ساز مورد استفاده است که در این حالت بصورت زیر تعریف می‌شود [۱]:

$$\mathbf{R}_{in} = \mathbf{R}_{MMSE} = (\mathbf{R} + \sigma^2 / A^2)^{-1} \quad (8)$$

### ۴-۱-۲. آشکارساز چند کاربره PIC

آشکارساز PIC یک آشکارساز چند طبقه می‌باشد. در طبقه اول این آشکارساز از یک آشکارساز متعارف استفاده شده و یک تخمین اولیه از دیتای ارسالی بدست می‌آید. سپس از دیتای بدست آمده به همراه اطلاعات کانال و کدهای کاربران برای تخمین MAI استفاده شده و تخمین حاصل از سیگنال دریافتی کاسته می‌شود [۲۰]. در حالت وجود دو آنتن در گیرنده، عملیات بالا در هر یک از دو آنتن انجام می‌شود.

البته برای تخمین اولیه دیتا از اطلاعات موجود در هر دو آنتن استفاده می‌شود تا اطلاعات دقیقتری بدست آمده و در نتیجه تخمین MAI هم دقیقتر صورت گیرد. ساختار گیرنده در این حالت در شکل (۲) آورده شده است. آشکارساز متعارف اولیه از روابطی مشابه روابط (۳) و (۴) استفاده می‌کند. سپس بردار MAI مربوط به هر کاربر از دیتای تخمینی سایر کاربران و نیز با استفاده از کانال و کدهای کاربران بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{MAI}_{p,k} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^K (A_m \hat{b}_m h_{p,m} \mathbf{C}_m) \quad p=1,2 \quad (9)$$

سپس این بردار از سیگنال دریافتی کاسته می‌شود تا سیگنال لازم برای آشکارسازی آن کاربر بدست آید:

$$\tilde{\mathbf{r}}_{p,k} = (\mathbf{r}_p - \mathbf{MAI}_{p,k}) \quad k=1,2,\dots,K \quad (10)$$

در این سیگنال تداخل ناشی از سایر کاربران کاهش یافته است. سپس این سیگنال جدید به طبقه دوم داده می‌شود که آن طبقه عملیاتی مشابه طبقه اول انجام می‌دهد. تعداد طبقات مورد نیاز در گیرنده معمولاً دو تا سه طبقه است و نشان داده شده است که در صورت استفاده از طبقات بیشتر عملکرد تقریباً ثابت مانده و بهبودی حاصل نمی‌شود [۲۲].

متوالی ارسال می‌شوند. در شیار زمانی اول جفت سمبول‌های  $(b_{k,1}, b_{k,2})$  و در دوره بیت دوم جفت سمبول‌های  $(-b_{k,2}, b_{k,1})$  به ترتیب از طریق دو آنتن فرستنده ارسال می‌شوند [۵]. در اینصورت بردارهای سیگنالهای دریافتی در دو شیار زمانی بصورت زیر خواهند بود:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_1 = \sum_{k=1}^K (A_k h_{1,k} b_{k,1} + A_k h_{2,k} b_{k,2}) \mathbf{C}_k + \mathbf{n}_1 \\ \mathbf{r}_2 = \sum_{k=1}^K (-A_k h_{1,k} b_{k,2} + A_k h_{2,k} b_{k,1}) \mathbf{C}_k + \mathbf{n}_2 \end{cases} \quad (25)$$

که  $\mathbf{r}_m$  سیگنال دریافتی در شیار زمانی  $m$ ام با ابعاد  $1 \times N$ ،  $h_{m,k}$  ضریب کانال بین آنتن  $m$ ام کاربر  $k$ ام و آنتن گیرنده و  $b_{k,m}$  دیتا کاربر  $k$ ام در شیار زمانی  $m$ ام می‌باشند.

در اینجا فرض شده که ضرایب کانال در طول دو شیار زمانی ثابت باقی بمانند. با استفاده از (۲۵) و با تعریف  $\mathbf{b}_1 = [b_{11}, b_{21}, \dots, b_{K1}]$ ،  $\mathbf{b}_2 = [b_{12}, b_{22}, \dots, b_{K2}]$  و  $\mathbf{h}_1 = \text{diag}(h_{11}, h_{22}, \dots, h_{K2})$  و  $\mathbf{h}_2 = \text{diag}(h_{12}, h_{22}, \dots, h_{K2})$  سیگنالهای دریافتی را میتوان بصورت زیر نوشت

$$\begin{cases} \mathbf{r}_1 = (\mathbf{b}_1 \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{h}_1 + \mathbf{b}_2 \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{h}_2) \mathbf{C} + \mathbf{n}_1 \\ \mathbf{r}_2 = (-\mathbf{b}_2 \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{h}_1 + \mathbf{b}_1 \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{h}_2) \mathbf{C} + \mathbf{n}_2 \end{cases} \quad (26)$$

اکنون به بررسی ساختارهای گیرنده مختلف برای این سیگنال‌ها می‌پردازیم.

### ۱-۲-۲. آشکارساز متعارف CDMA

در این حالت سیگنال دریافتی در هر شیار زمانی در گیرنده از یک آشکارساز متعارف یا فیلتر منطبق عبور می‌کند:

$$\mathbf{t}_m = \mathbf{r}_m \mathbf{C}^T, \quad m=1,2 \quad (27)$$

که  $\mathbf{r}_m$  سیگنال دریافتی در شیار  $m$ ام با ابعاد  $1 \times N$  و  $\mathbf{t}_m$  بردار خروجی آشکارساز متعارف با ابعاد  $1 \times K$  است. سپس این دو خروجی با هم ترکیب شده و متریک مناسب جهت آشکارسازی را تولید می‌گردد.

نحوه ترکیب دو خروجی بر اساس دیکدینگ فضا-زمان معرفی شده توسط Alamouti می‌باشد. البته در اینجا این آشکارساز بصورت چند کاربره استفاده شده است [۵]:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_1 = \mathbf{t}_1 \cdot \mathbf{h}_1^* + \mathbf{t}_2^* \cdot \mathbf{h}_2 \\ \mathbf{u}_2 = \mathbf{t}_1 \cdot \mathbf{h}_2^* - \mathbf{t}_2^* \cdot \mathbf{h}_1 \end{cases} \quad (28)$$

نهایتاً تصمیم‌گیری ML از روی متریک‌های فوق برای بردارهای دیتای مربوط به دو شیار زمانی انجام می‌گیرد.

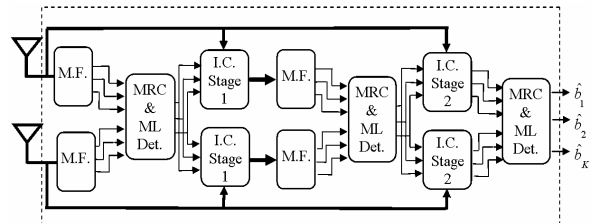
### ۲-۲-۲. آشکارساز چندکاربره ناهمبسته ساز

در این حالت مشابه دایورسیتی دریافت با دو آنتن از دو آشکارساز چندکاربره ناهمبسته ساز در خروجی دو آشکارساز متعارف مربوط به سیگنالهای دو شیار زمانی استفاده می‌شود. در اینصورت ماتریس

$$\mathbf{z}_1 = h_{1,1}^* u_{1,1} + h_{1,2}^* u_{1,2} \quad (18)$$

$$\hat{\mathbf{b}}_1 = \text{sign}(\Re[\mathbf{z}_1]) \quad (19)$$

سپس با استفاده از داده، MAI مربوط به این کاربر در هر آنتن  $p$  محاسبه شده و از سیگنال خروجی فیلتر منطبق مربوط به کاربر دوم در آن آنتن کسر می‌شود:



شکل ۲. ساختار گیرنده با استفاده از دو آنتن در گیرنده و آشکارساز چندکاربره غیرخطی

$$MAI_{p,1} = A_1 \hat{\mathbf{b}}_1 \mathbf{h}_{p,1} \mathbf{F}_{1,k} \quad p=1,2 \quad (20)$$

$$u_{p,2} = u_{p,2} - MAI_{p,1} \quad p=1,2 \quad (21)$$

دیتای کاربر دوم با ترکیب MRC این سیگنالها و مطابق روابط (۱۸) و (۱۹) تخمین زده می‌شود. در مورد بقیه کاربران نیز عملیات بصورت بالا تکرار می‌شود.

در حالت کلی برای هر کاربر  $k$ ام MAI مربوطه با استفاده از دیتای تخمینی و اطلاعات دامنه کاربران قبل و نیز با کمک اطلاعات کانال بصورت زیر محاسبه شده و از خروجی فیلتر منطبق مربوط به آن کاربر کم می‌گردد:

$$MAI_{p,k} = \sum_{i=1}^{k-1} A_i \hat{\mathbf{b}}_i \mathbf{h}_{p,i} \mathbf{F}_{k,i} \quad p=1,2 \quad k=2, \dots, K \quad (22)$$

$$u_{p,k} = u_{p,k} - MAI_{p,k} \quad p=1,2 \quad k=2, \dots, K \quad (23)$$

سپس عملیات آشکارسازی برای آن مانند قبل و بر اساس روابط (۱۸) و (۱۹) تکرار می‌شود.

### ۲-۲. دو آنتن در فرستنده، یک آنتن در گیرنده

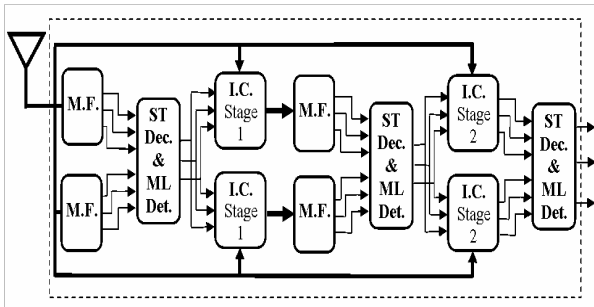
در این حالت برخلاف حالت الف از دایورسیتی ارسال استفاده می‌شود. برای استفاده از دایورسیتی ارسال از کدینگ فضا-زمان بلوکی معرفی شده توسط Alamouti استفاده می‌کنیم [۵].

روش پیشنهادی Alamouti یک کدینگ فضا-زمان ساده برای بهره‌گیری از دایورسیتی ارسال در روی کانالهای فیدینگ تخت و برای یک سیستم تک‌کاربره است. در یک سیستم CDMA که از کدینگ فضا-زمان Alamouti استفاده می‌کند، برای هر کاربر  $k$ ، جفت سمبول‌های  $(b_{k,m}, b_{k,m})$  در طول دو شیار زمانی (دوره بیت)

$$\begin{cases} \mathbf{MAI}_{1,k} = \sum_{i=1, i \neq k}^K (A_i \hat{b}_{i,1} h_{i,1} + A_i \hat{b}_{i,2} h_{i,2}) C_i \\ \mathbf{MAI}_{2,k} = \sum_{i=1, i \neq k}^K (-A_i \hat{b}_{i,2} h_{i,1} + A_i \hat{b}_{i,1} h_{i,2}) C_i \end{cases} \quad (31)$$

و این بردارهای MAI های تخمینی از سیگنالهای دریافتی در دو شیار زمانی کم شده تا سیگنالهایی با تداخل کمتر دست آید که آن سیگنالها به طبقات بعدی فرستاده می شود:

$$\tilde{\mathbf{r}}_{m,k} = (\mathbf{r}_m - \mathbf{MAI}_{m,k}) \quad m = 1, 2 \quad (32)$$



شکل ۴. ساختار گیرنده با استفاده از دو آنتن در فرستنده و آشکار ساز چندکاربره غیر خطی

برای طبقات بعدی این مراحل بصورت مشابه تکرار می شود. در مرحله آخر نیز عمل آشکار سازی با کمک یک گیرنده متعارف (بخش ۱-۲-۲) انجام میگیرد.

#### ۲-۲-۵. آشکار ساز چندکاربره غیر خطی SIC

در آشکار ساز SIC، سیگنالهای دو شیار زمانی مربوط به کاربر اول یعنی قویترین کاربر توسط دو آشکار ساز متعارف آشکار شده و سپس این دیتا به همراه اطلاعات کانال برای تخمین MAI های ناشی از کاربر اول در دو شیار زمانی بکار رفته و آنگاه این MAI ها از سیگنالهای دریافتی کاسته شده تا سیگنالهایی با تداخل کمتر برای طبقه بعدی که وظیفه آشکار سازی کاربر دوم را دارد فراهم شود.

$$\mathbf{t}_{m,k} = \mathbf{r}_m \mathbf{C}_k^T \quad m = 1, 2 \quad (33)$$

$$\begin{cases} u_{k,1} = h_{k,1}^* t_{k,1} + h_{k,2} t_{k,2}^* \\ u_{k,2} = h_{k,2}^* t_{k,1} - h_{k,1} t_{k,2}^* \end{cases} \quad (34)$$

$$b_{k,m} = \text{sign}(\Re[u_{k,m}]) \quad m = 1, 2 \quad (35)$$

$$\begin{cases} \mathbf{MAI}_{k,1} = (A_k h_{k,1} \hat{b}_{k,1} + A_k h_{k,2} \hat{b}_{k,2}) \mathbf{C}_k \\ \mathbf{MAI}_{k,2} = (-A_k h_{k,1} \hat{b}_{k,2} + A_k h_{k,2} \hat{b}_{k,1}) \mathbf{C}_k \end{cases} \quad (36)$$

$$\tilde{\mathbf{r}}_{m,k} = (\mathbf{r}_m - \mathbf{MAI}_{k,m}) \quad m = 1, 2 \quad (37)$$

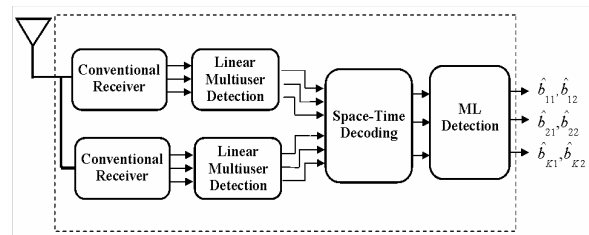
#### ۲-۲-۶. آشکار ساز چندکاربره غیر خطی DF

در آشکار ساز DF دیتای کاربر اول با استفاده از خروجیهای فیلتر منطبق و دیکدینگ فضا-زمان تخمین زده شده و سپس MAI های

ناهمبسته ساز بصورت زیر به خروجی آشکار ساز متعارف اعمال می شود:

$$\mathbf{v}_m = \mathbf{t}_m \mathbf{R}_{lin} \quad , \quad m = 1, 2 \quad (29)$$

که  $\mathbf{v}_m$  خروجی آشکار ساز ناهمبسته ساز در شیار  $m$  با ابعاد  $1 \times K$  و  $\mathbf{R}_{lin}$  ماتریس ناهمبسته ساز با ابعاد  $K \times K$  و برابر معکوس ماتریس همبستگی می باشد.



شکل ۳. ساختار گیرنده با استفاده از دو آنتن در فرستنده و آشکار ساز چندکاربره خطی

آنگاه دیکدینگ فضا-زمان در روی خروجی بالا اعمال می شود. متریکهای تصمیم گیری بصورت زیر خواهند بود:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_1 = \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{h}_1^* + \mathbf{v}_2 \cdot \mathbf{h}_2 \\ \mathbf{u}_2 = \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{h}_2^* - \mathbf{v}_2 \cdot \mathbf{h}_1 \end{cases} \quad (30)$$

نهایتاً تصمیم گیری ML بر اساس متریک فوق انجام می گیرد. ساختار گیرنده در این حالت در شکل (۳) آورده شده است.

#### ۲-۲-۳. آشکار ساز چندکاربره MMSE

در مورد آشکار ساز MMSE هم میتوان از ساختاری مشابه شکل (۳) و روابط قسمت قبل استفاده کرد. تنها تفاوت در این حالت ماتریس ناهمبسته ساز مورد استفاده است که بصورت رابطه (۸) تعریف می شود.

#### ۲-۲-۴. آشکار ساز چندکاربره PIC

این حالت هم مشابه حالت دایورسیتی دریافت با دو آنتن می باشد. تنها تفاوت اینست که سیگنالها بجای دو آنتن از دو شیار زمانی گرفته شده و نحوه ترکیب دو سیگنال هم بجای MRC براساس دیکدینگ فضا-زمان رابطه (۲۸) می باشد. ساختار گیرنده در این حالت در شکل (۴) نشان داده شده است.

در طبقه اول این آشکار ساز گیرنده متعارف یا فیلتر منطبق (بخش ۱-۲-۲) قرار دارد. سپس خروجی دو فیلتر در دو شیار زمانی مطابق رابطه (۲۸) با هم ترکیب شده و دیتای تخمینی از کاربرها بدست می آید. آنگاه بردار MAI مربوط به هر کاربر در دو شیار زمانی مطابق روابط زیر و با کمک دیتای تخمینی کاربران و اطلاعات کانال بصورت زیر بدست می آید:

کاربر  $k$ ام در شیار زمانی  $m$ ام و  $\mathbf{n}_{pm}$  نویز دریافتی در آنتن  $p$ ام و شیار زمانی  $m$ ام می‌باشند. اکنون به بررسی ساختار گیرنده‌های مختلف برای این سیگنالها با کمک روشهای مختلف آشکارسازی چندکاربره می‌پردازیم.

#### ۱-۴-۲. گیرنده متعارف CDMA

در گیرنده متعارف چهار سیگنال دریافتی از چهار آشکارساز متعارف عبور داده می‌شوند. یعنی:

$$\mathbf{t}_{pm} = \mathbf{r}_{pm} \mathbf{C}^T, \quad p, m = 1, 2 \quad (42)$$

که بردار خروجی آشکارساز متعارف در آنتن  $p$ ام و شیار زمانی  $m$ ام با ابعاد  $1 \times K$  میباشد. این خروجی‌ها طبق الگوریتم دیکدینگ فضا-زمان با هم ترکیب شده تا متریک مناسب برای تصمیم‌گیری بدست آید. دیکدینگ فضا-زمان در این حالت نیز بصورت زیر می‌باشد که تعمیمی چندکاربره از روش Alamouti است:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_1 = \mathbf{t}_{11} \cdot \mathbf{h}_{11}^* + \mathbf{t}_{12}^* \cdot \mathbf{h}_{21} + \mathbf{t}_{21} \cdot \mathbf{h}_{12}^* + \mathbf{t}_{22}^* \cdot \mathbf{h}_{22} \\ \mathbf{u}_2 = \mathbf{t}_{11} \cdot \mathbf{h}_{21}^* - \mathbf{t}_{12}^* \cdot \mathbf{h}_{11} + \mathbf{t}_{21} \cdot \mathbf{h}_{22}^* + \mathbf{t}_{22}^* \cdot \mathbf{h}_{12} \end{cases} \quad (43)$$

#### ۲-۴-۲. آشکارساز چندکاربره خطی ناهمبسته‌ساز

در این حالت از چهار آشکارساز چندکاربره ناهمبسته ساز در خروجی چهار آشکارساز متعارف مربوط به سیگنالهای دو آنتن در دو شیار زمانی استفاده می‌شود. در اینصورت ماتریس ناهمبسته‌ساز بصورت زیر اعمال می‌شود:

$$\mathbf{v}_{pm} = \mathbf{t}_{pm} \mathbf{R}_{im}, \quad p, m = 1, 2 \quad (44)$$

که ماتریس ناهمبسته ساز معکوس ماتریس هم‌بستگی کاربران یعنی  $\mathbf{R}_{im} = \mathbf{R}^{-1}$  می‌باشد. آنگاه دیکدینگ فضا-زمان در روی خروجی بالا اعمال می‌شود. در اینصورت متریک‌های تصمیم‌گیری بصورت زیر خواهند بود:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_1 = \mathbf{v}_{11} \cdot \mathbf{h}_{11}^* + \mathbf{v}_{12}^* \cdot \mathbf{h}_{21} + \mathbf{v}_{21} \cdot \mathbf{h}_{12}^* + \mathbf{v}_{22}^* \cdot \mathbf{h}_{22} \\ \mathbf{u}_2 = \mathbf{v}_{11} \cdot \mathbf{h}_{21}^* - \mathbf{v}_{12}^* \cdot \mathbf{h}_{11} + \mathbf{v}_{21} \cdot \mathbf{h}_{22}^* + \mathbf{v}_{22}^* \cdot \mathbf{h}_{12} \end{cases} \quad (45)$$

ابعاد  $\mathbf{u}_m$ ها در رابطه بالا  $1 \times K$  است. سپس با استفاده از این متریک‌ها بردار دیتای کاربران در دو شیار زمانی آشکار می‌گردد. شکل (۵) ساختار گیرنده را در اینحالت نشان می‌دهد.

#### ۳-۴-۲. آشکارساز چندکاربره خطی MMSE

در مورد آشکارساز MMSE هم میتوان از ساختاری مشابه شکل (۵) و روابط قسمت قبل استفاده کرد. تنها تفاوت در این حالت ماتریس ناهمبسته ساز مورد استفاده است که مطابق رابطه (۸) تعریف می‌شود.

#### ۴-۴-۲. آشکارساز چندکاربره غیرخطی PIC

ساختار گیرنده در اینحالت در شکل (۶) نشان داده شده است. در طبقه اول این آشکارساز گیرنده متعارف یا فیلتر منطبق (بخش ۲-

مربوط به این کاربر در دو شیار زمانی محاسبه شده و از خروجی‌های فیلتر منطبق مربوط به کاربر دوم کم می‌شود.

آنگاه دیتای کاربر دوم با عملیاتی مشابه آشکار می‌شود. سپس MAIهای مربوط به کاربر دوم در دو شیار زمانی محاسبه شده و از خروجی‌های فیلتر منطبق مربوط به کاربر سوم کم می‌شود. این عملیات برای بقیه کاربرها به صورت زیر تکرار می‌شود.

$$\begin{cases} MAI_{k,1} = \sum_{m=1}^{k-1} (A_m \hat{b}_{m,1} h_{m,1} + A_m \hat{b}_{m,2} h_{m,2}) F_{k,m} \\ MAI_{k,2} = \sum_{m=1}^{k-1} (-A_m \hat{b}_{m,2} h_{m,1} + A_m \hat{b}_{m,1} h_{m,2}) F_{k,m} \end{cases} \quad (38)$$

و از سیگنال مربوط به آن کاربر کاسته می‌شود:

$$v_{k,m} = v_{k,m} - MAI_{k,m}, \quad m = 1, 2 \quad (39)$$

و آنگاه دیکدینگ فضا-زمان و آشکارسازی بصورت زیر انجام می‌شود:

$$\begin{cases} u_{1,1} = h_{1,1}^* \cdot v_{1,1} + h_{1,2}^* \cdot v_{1,2} \\ u_{1,2} = h_{1,2}^* \cdot v_{1,1} - h_{1,1}^* \cdot v_{1,2} \end{cases} \quad (40)$$

#### ۳-۲. یک آنتن در فرستنده، چهار آنتن در گیرنده

در این حالت فرمولها دقیقا مشابه حالت دایورسیتی با دو آنتن در جهت دریافت می‌باشند فقط تعداد آنتنهای دریافت برابر چهار است.

#### ۴-۲. دو آنتن در فرستنده، دو آنتن در گیرنده

در این حالت هر یک از کاربرها به دو آنتن فرستنده و ایستگاه ثابت هم به دو آنتن گیرنده مجهز می‌باشد. در اینحالت می‌توان از هر دو نوع دایورسیتی در ارسال و دریافت بهره گرفت.

هر یک از کاربرها دیتای خود را از طریق دو آنتن ارسال می‌کند و در دو شیار زمانی متوالی مطابق روش Alamouti ارسال می‌کنند.

در گیرنده سیگنالهای دریافتی از دو آنتن و دو شیار زمانی متوالی دریافت می‌شوند. پس درگیرنده جمعاً چهار سیگنال دریافتی خواهیم داشت.

آنگاه ترکیبی از روشهای دیکدینگ فضا-زمان، ترکیب MRC و تکنیک‌های آشکارسازی چندکاربره در گیرنده برای آشکارسازی دیتای کاربرهای مختلف بکار می‌رود. چهار سیگنال دریافتی در گیرنده عبارتند از [۵]:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{11} = (\mathbf{b}_1 \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{h}_{11} + \mathbf{b}_2 \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{h}_{21}) \cdot \mathbf{C} + \mathbf{n}_{11} \\ \mathbf{r}_{12} = (-\mathbf{b}_2 \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{h}_{11} + \mathbf{b}_1 \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{h}_{21}) \cdot \mathbf{C} + \mathbf{n}_{12} \\ \mathbf{r}_{21} = (\mathbf{b}_1 \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{h}_{12} + \mathbf{b}_2 \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{h}_{22}) \cdot \mathbf{C} + \mathbf{n}_{21} \\ \mathbf{r}_{22} = (-\mathbf{b}_2 \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{h}_{12} + \mathbf{b}_1 \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{h}_{22}) \cdot \mathbf{C} + \mathbf{n}_{22} \end{cases} \quad (41)$$

که  $\mathbf{r}_{pm}$  سیگنال دریافتی در آنتن  $p$ ام و شیار زمانی  $m$ ام با ابعاد  $1 \times N$ ، ضریب کانال بین آنتن  $m$ ام کاربر  $k$ ام و آنتن  $p$ ام گیرنده و  $\mathbf{h}_{mp,k} = \text{diag}(h_{mp,1}, h_{mp,2}, \dots, h_{mp,K})$ ،  $\mathbf{h}_{mp} = \text{diag}(h_{mp,1}, h_{mp,2}, \dots, h_{mp,K})$  دیتای مربوط به

متوالی انجام می‌گیرد. بجز این تفاوت، بقیه عملیات و روابط دقیقاً مشابه آشکارساز PIC در قسمت قبل است. البته در اینجا هم سیگنالها باید در ابتدا به ترتیب توانی مرتب شوند که روش آن در بخش ۲-الف-۵ بیان شد.

#### ۴-۶-۲. آشکارساز چندکاربره غیرخطی DF

در این حالت آشکارسازی DF به سیگنالهای مربوط به دو شیوار زمانی و دو آنتن اعمال میشود. در اینصورت دیتای طبقه اول (کاربر اول) یعنی قویترین کاربر) بصورت زیر آشکار می‌شود:

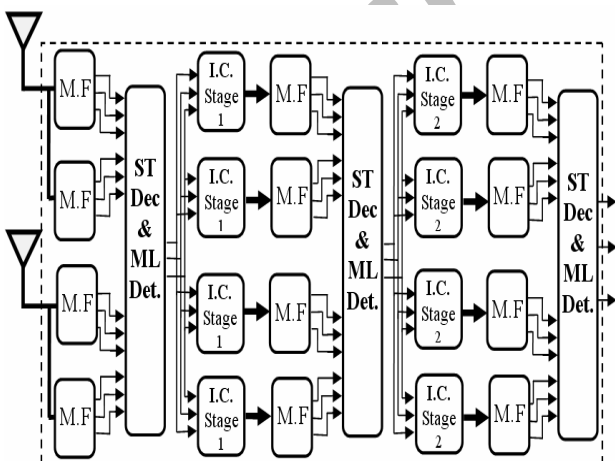
$$\mathbf{v}_{pm} = \mathbf{t}_{pm} (\mathbf{F})^{-1}, \quad p, m = 1, 2 \quad (48)$$

$$\begin{cases} u_{1,1} = h_{11}^* \gamma_{11,1} + h_{21}^* \gamma_{12,1} + h_{12}^* \gamma_{21,1} + h_{22}^* \gamma_{22,1} \\ u_{2,1} = h_{21}^* \gamma_{11,1} - h_{11}^* \gamma_{12,1} + h_{22}^* \gamma_{21,1} + h_{12}^* \gamma_{22,1} \end{cases} \quad (49)$$

آنگاه MAI مربوط به این کاربر با استفاده از دیتای بدست آمده و اطلاعات کانال محاسبه شده و از سیگنال دریافتی کم می‌شود. در حالت کلی MAI مربوط به کاربر  $k$ ام بصورت زیر محاسبه شده:

$$\begin{cases} \mathbf{MAI}_{11,k} = \sum_{i=1}^{k-1} (A_i \hat{b}_{1,i} h_{11,i} + A_i \hat{b}_{2,i} h_{21,i}) F_{ki} \\ \mathbf{MAI}_{12,k} = \sum_{i=1}^{k-1} (-A_i \hat{b}_{2,i} h_{11,i} + A_i \hat{b}_{1,i} h_{21,i}) F_{ki} \\ \mathbf{MAI}_{21,k} = \sum_{i=1}^{k-1} (A_i \hat{b}_{1,i} h_{12,i} + A_i \hat{b}_{2,i} h_{22,i}) F_{ki} \\ \mathbf{MAI}_{22,k} = \sum_{i=1}^{k-1} (-A_i \hat{b}_{2,i} h_{12,i} + A_i \hat{b}_{1,i} h_{22,i}) F_{ki} \end{cases} \quad (50)$$

و اطلاعات مربوط به این کاربر نیز بصورت زیر آشکار می‌شود:



شکل ۶. ساختار گیرنده با استفاده از دو آنتن در فرستنده و دو آنتن در گیرنده و آشکارساز چندکاربره غیرخطی

$$\mathbf{v}_{pm,k} = \mathbf{v}_{pm,k} - \mathbf{MAI}_{pm,k}, \quad p, m = 1, 2 \quad (51)$$

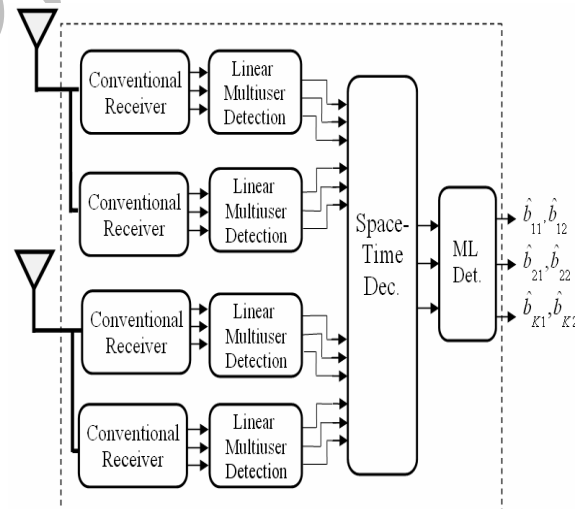
د-۱) قرار دارد. سپس خروجی دو فیلتر در دو شیوار زمانی مطابق رابطه (۴۵) با هم ترکیب شده و دیتای تخمینی از کاربرها بدست می‌آید.

آنگاه بردار MAI مربوط به هر کاربر در هر شیوار زمانی و در دو آنتن با کمک دیتای سایر کاربران و اطلاعات کانال بصورت زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{cases} \mathbf{MAI}_{11,k} = \sum_{i=1, i \neq k}^K (A_i \hat{b}_{1,i} h_{11,i} + A_i \hat{b}_{2,i} h_{21,i}) C_i \\ \mathbf{MAI}_{12,k} = \sum_{i=1, i \neq k}^K (-A_i \hat{b}_{2,i} h_{11,i} + A_i \hat{b}_{1,i} h_{21,i}) C_i \\ \mathbf{MAI}_{21,k} = \sum_{i=1, i \neq k}^K (A_i \hat{b}_{1,i} h_{12,i} + A_i \hat{b}_{2,i} h_{22,i}) C_i \\ \mathbf{MAI}_{22,k} = \sum_{i=1, i \neq k}^K (-A_i \hat{b}_{2,i} h_{12,i} + A_i \hat{b}_{1,i} h_{22,i}) C_i \end{cases} \quad (46)$$

و این MAIها که از بعد  $1 \times N$  می‌باشند، از سیگنالهای دریافتی مربوطه کاسته می‌شود:

$$\tilde{\mathbf{r}}_{pm,k} = (\mathbf{r}_{pm} - \mathbf{MAI}_{pm,k}) \quad m, p = 1, 2 \quad (47)$$



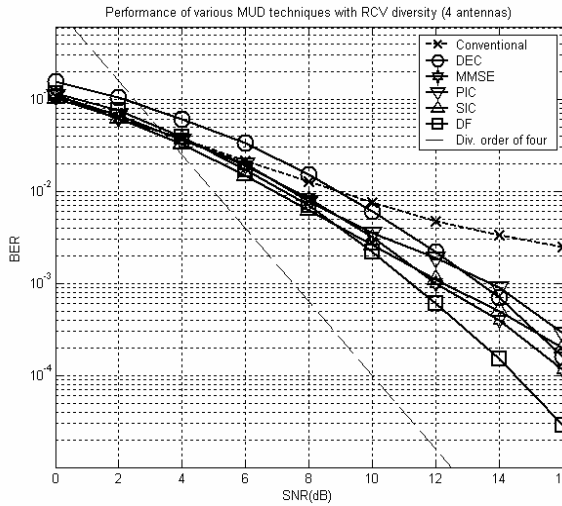
شکل ۵. ساختار گیرنده با استفاده از دو آنتن در فرستنده و دو آنتن در گیرنده و آشکارساز چندکاربره خطی

آنگاه سیگنالهای بدست آمده به طبقه بعدی داده می‌شوند. در طبقات بعدی این مراحل بصورت مشابه تکرار می‌شود. در مرحله آخر نیز عمل آشکارسازی با کمک یک گیرنده متعارف (بخش ۲-د-۱) انجام می‌گیرد.

#### ۴-۵-۲. آشکارساز چندکاربره غیرخطی SIC

همانطور که در قسمت‌های قبلی گفته شد، در آشکارساز SIC عملیات آشکارسازی دیتای کاربرها، تخمین و حذف MAI بصورت



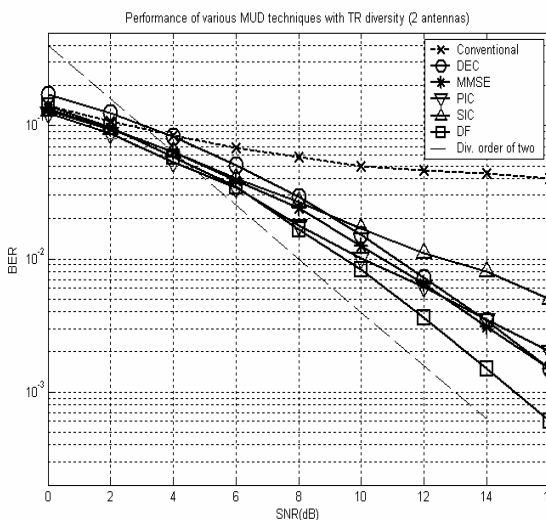


شکل ۸. مقایسه عملکرد آشکارسازهای چندکاربره مختلف در ترکیب با دایورسیتی دریافت با چهار آنتن

آشکارسازهای PIC و SIC اگرچه در سیگنال به نویزهای پایین دارای عملکرد بهتری نسبت به آشکارسازهای خطی هستند، ولی در سیگنال به نویزهای بالا دارای افت عملکرد نسبی می‌باشند. در بین این آشکارسازها، آشکارساز DF همواره و در همه سیگنال به نویزها نسبت به بقیه روشها عملکرد بهتری دارد. در این شکلها همچنین شیب منحنی با بهره دایورسیتی دو چهار نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود بدون استفاده از آشکارساز چندکاربره رسیدن به بهره دایورسیتی امکان‌پذیر نیست. درحالیکه الگوریتمهای ارائه شده همگی قادر به استخراج کل بهره دایورسیتی ممکن هستند.

این بهره در شکل (۷) برابر دو و در شکل (۸) برابر چهار است که متناسب با تعداد آنتنها در گیرنده می‌باشد.

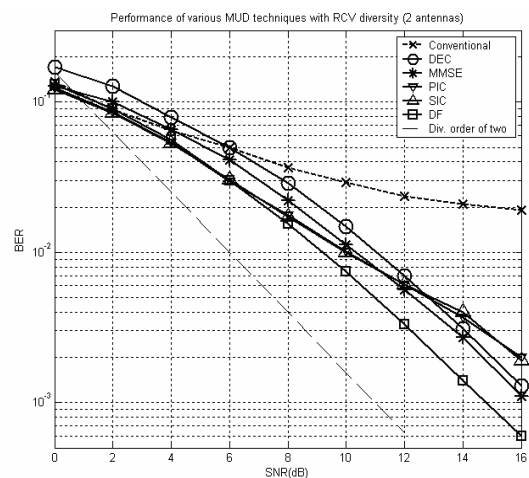


شکل ۹. مقایسه عملکرد آشکارسازهای چندکاربره مختلف در ترکیب با دایورسیتی ارسال با دو آنتن

$$\begin{cases} u_{1,k} = h_{11,k}^* v_{11,k} + h_{21,k}^* v_{12,k} + h_{12,k}^* v_{21,k} + h_{22,k}^* v_{22,k} \\ u_{2,k} = h_{21,k}^* v_{11,k} - h_{11,k}^* v_{12,k} + h_{22,k}^* v_{21,k} + h_{12,k}^* v_{22,k} \end{cases} \quad (52)$$

### ۳. نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی انجام شده برای بررسی عملکرد ساختارهای پیشنهادی ارائه شده است. در شبیه‌سازی‌ها یک سیستم CDMA با  $K=4$  کاربر در نظر گرفته شده است. کاربرها همزمان بوده و توان ارسالی آنها نیز یکسان می‌باشد. اطلاعات کاربران توسط کدهای گسترده‌ساز تصادفی با طول  $N=8$  گسترده شده‌اند (یعنی باردهی سیستم ۵۰٪ می‌باشد). به علت استفاده از چند آنتن در فرستنده و یا گیرنده، توان کاربرها طوری مقیاس دهی می‌شود که کل توان ارسالی و یا دریافتی همواره ثابت باقی بماند. در شبیه‌سازی این مساله در توان نویز جمع‌شونده لحاظ شده است. همانطور که در بخش قبل گفته شد هر کاربر دیشای خود را از طریق یک و یا دو آنتن ارسال کرده و ایستگاه ثابت هم این اطلاعات را از طریق یک یا دو آنتن دریافت می‌کند. کانال انتقالی یک کانال فیدینگ رابلی آرام و تخت در نظر گرفته می‌شود. این فیدینگ را می‌توان توسط یک فرآیند گوسی مختلط با واریانس ۰/۵ مدلسازی کرد. نتایج بررسی عملکرد ساختارهای ارائه شده در شکل‌های (۷) تا (۱۰) آمده است. شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب نتایج مقایسه روشهای مختلف آشکارسازی چندکاربره را در سیستم CDMA با بهره‌گیری از دایورسیتی در جهت دریافت بادو آنتن در گیرنده و یک آنتن در فرستنده و یا چهار آنتن در گیرنده و یک آنتن در فرستنده نشان میدهند. همانطور که در این شکلها مشاهده می‌شود و انتظار هم می‌رود، آشکارساز MMSE دارای عملکرد بهتری نسبت به آشکارساز ناهمبسته ساز است. البته در سیگنال به نویزهای بالا این اختلاف کم می‌شود.



شکل ۷. مقایسه عملکرد آشکارسازهای چندکاربره مختلف در ترکیب با دایورسیتی دریافت با دو آنتن

#### ۴. پیچیدگی محاسباتی ساختارهای گیرنده

در این بخش به منظور مقایسه ساختارهای پیشنهادی در بخش‌های قبلی و ارائه یک معیار دیگر برای انتخاب سیستم مناسب از میان ساختارهای قبلی، به محاسبه پیچیدگی ساختارهای ارائه شده می‌پردازیم. مقایسه بین تکنیک‌های MUD در سیستم CDMA تک‌آنتنی در [۲۱] ارائه شده است.

##### جدول ۱. پیچیدگی محاسباتی گیرنده‌های متفاوت برای

###### حالت دایورسیتی دریافت با دو آنتن

تعداد مقایسه‌ها	تعداد جمع و ضرب‌های مختلط مورد نیاز	نوع گیرنده	حالت الف
2K	$4KN + K$	M.F.	یک آنتن فرستنده و دو آنتن گیرنده
2K	$2/3 K^3 + 4K^2 + 4KN - K$	Dec.	
2K	$2/3 K^3 + 4K^2 + 4KN + K$	MMSE	
6K	$2K^2 + 4K^2N + 8KN - 13K + 4N$	PIC	
2K	$8KN + 5K - 4N - 4$	SIC	
2K	$1/3 K^3 + 8K^2 + 4KN - 5K$	DF	

##### جدول ۲. پیچیدگی محاسباتی گیرنده‌های متفاوت برای

###### حالت دایورسیتی ارسال با دو آنتن

تعداد مقایسه‌ها	تعداد جمع و ضرب‌های مختلط مورد نیاز	نوع گیرنده	حالت ب
2K	$2KN + 2K$	M.F.	دو آنتن فرستنده و یک آنتن گیرنده
2K	$2/3 K^3 + 2K^2 + 2KN + K$	Dec.	
2K	$2K^3 + 2K^2 + 2KN + 3K$	MMSSE	
6K	$10K^2 + 2K^2N + 4KN - 6K + 2N$	PIC	
2K	$4KN + 6K - 2N - 4$	SIC	
2K	$1/3 K^3 + 5K^2 + 2KN - 2K$	DF	

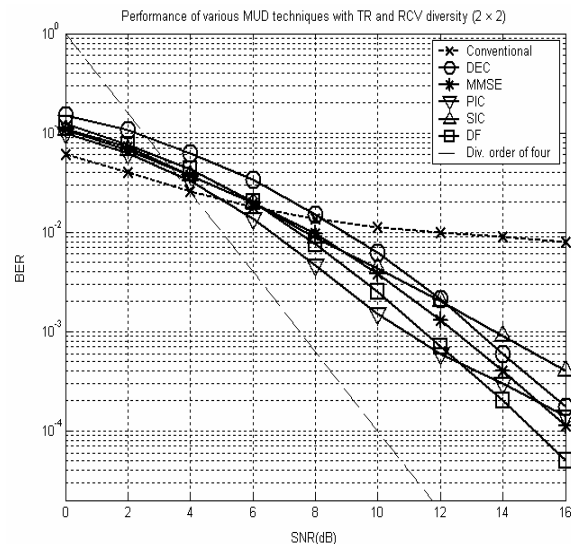
در این مقاله ما به مقایسه این پیچیدگی‌ها در سیستم‌های چندآنتنی می‌پردازیم. در محاسبه پیچیدگی‌های ساختارها، تعداد جمع و ضرب‌های مختلط مورد نیاز در گیرنده‌ها را برحسب تعداد کاربران  $K$  و بهره‌پردازش  $N$  تعیین می‌کنیم.

در محاسبه تعداد عملیات مورد نیاز فرض شده که هیچ پردازش موازی بکار گرفته نشده است [۲۳]. پیچیدگی محاسباتی محاسبه شده برای آشکارسازی هر بیت تعیین شده است.

در عملیاتی نظیر معکوس ماتریس همبستگی و یا تجزیه Cholesky فرض بر این است که این عملیات برای آشکارسازی هر بیت یکبار انجام می‌شود.

بدیهی است که در سیستم‌هایی که از کدهای بلند استفاده می‌کنند و یا اینکه کد در بیت‌های بعدی تغییر نمی‌کند، این بار پردازش بر روی چند بیت تقسیم می‌شود.

جدول ۱ تا ۴ این پیچیدگی‌ها را به ترتیب برای حالات مختلف آرایش آنتنها در فرستنده‌ها و گیرنده‌ها نشان می‌دهند. با مقایسه‌ی جدول ۱ و ۲ مشاهده می‌شود که دایورسیتی در ارسال منجر به



شکل ۱۰. مقایسه عملکرد آشکارسازهای چندکاربره مختلف در ترکیب با دایورسیتی ارسال و دریافت (دو آنتن در فرستنده و دو آنتن در گیرنده)

شکل‌های (۹) و (۱۰) مقایسه آشکارسازها را در حالتی که از دایورسیتی ارسال استفاده می‌شود نشان می‌دهند. این شکل‌ها به ترتیب مربوط به حالات دو آنتن در فرستنده و یک آنتن در گیرنده و یا دو آنتن در فرستنده و دو آنتن در گیرنده می‌باشند.

در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که دایورسیتی ارسال می‌تواند عملکردی مشابه دایورسیتی دریافت داشته باشد. البته مشاهده می‌شود که در حالت استفاده از دایورسیتی ارسال، آشکارساز SIC عملکرد مطلوبی ندارد.

این آشکارساز مشابه آشکارساز PIC اگرچه دارای عملکرد خوبی در سیگنال به نویزهای پایین است، ولی در سیگنال به نویزهای بالا دارای افت در عملکرد و در بهره دایورسیتی است.

لذا این آشکارساز نمیتواند گزینه مناسبی برای استفاده در سیستم‌های CDMA که از چند آنتن در سمت فرستنده بهره می‌برند، باشد. مشابه حالت دایورسیتی دریافت، در بین این آشکارسازها، آشکارساز DF همواره و در همه سیگنال به نویزها نسبت به بقیه روشها عملکرد بهتری را دارا می‌باشد.

در مورد بهره دایورسیتی نیز در شکل‌ها منحنی‌های مربوط به بهره دایورسیتی دو و چهار رسم شده‌اند.

همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد آنتنها، بهره دایورسیتی هم افزایش پیدا می‌کند. یعنی با توجه به شیب منحنی‌ها و مقایسه با شیب منحنی‌های نشان دهنده بهره دایورسیتی مشاهده می‌شود که در حالت استفاده از دو آنتن در فرستنده میزان بهره دایورسیتی برابر دو و در حالت استفاده از دو آنتن در هر دو سمت فرستنده و گیرنده، مشابه حالت دایورسیتی دریافت با چهار آنتن بهره دایورسیتی چهار قابل دستیابی است. البته در بین تمامی روشها آشکارساز DF در میزان سیگنال به نویز پایین تری به این بهره می‌رسد.

دایورسیتی ارسال و دریافت گوناگون پرداخته شده و نشان داده شد که استفاده همزمان از آشکارسازی چندکاربره و کدینگ فضا-زمان می‌تواند عملکرد سیستم CDMA را در کانال فیدینگ به میزان زیاد بهبود ببخشد.

### مراجع

[1] Verdu, S., *Multiuser Detection*, Cambridge University Press, 1998.

[2] Moshavi, S., "Multi-user detection for DS-SS-CDMA communications", IEEE Communications Magazine, Oct. 1996, pp.124-136.

[3] Tarokh, V., Seshadri, N., and Calderbank, A.R., "Space-time Codes for High Data Rates Wireless Communications: Performance criterion and code construction", IEEE Transaction on Information Theory, Vol. 44, No.2, March 1998, pp. 744-765.

[4] Tarokh, V., Jafarkhani, H., and Calderbank, A. R., "Space-time block codes from orthogonal designs", IEEE Transaction on Information Theory, Vol.45, No.5, July 1999, pp. 1456-1467.

[5] Alamouti, S.M., "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications", IEEE Journal on Select Areas in Communications, Vol. 16, No.8, 1998, pp. 1451-1458.

[6] Vucetic, B., and Yuan, J., *Space-Time Coding*, New York: Wiley, 2003.

[7] Wang, X., and Poor, H.V., "Space-Time Multiuser Detection in multipath CDMA channels", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 47, No.7, Sep. 1999, pp: 2356-2374.

[8] Mohamed, N. A., and Dunham, J. G., "A Low-Complexity Combined Antenna Array and Interference Cancellation DS-SS-CDMA Receiver in Multipath Fading Channels" IEEE journal of Selected Area in Communications, Vol. 20, No. 2, Feb. 2002, pp. 248-256.

[9] Dai, H., and Poor, H.V., "Iterative Space-Time Processing for Multiuser Detection in Multipath CDMA Channels", IEEE Transaction on Signal Processing, Vol. 50, No. 9, Sept. 2002, pp. 2116-2127.

[10] Naguib, A.F., Seshadri, N., Tarokh, V., and Alamouti, S., "Combined interference cancellation and ML decoding of block space-time coding", IEEE Global Telecommunication Conf., Australia, Nov. 1998, pp. 7-15.

[11] Naguib, A.F., Seshadri, N., and Calderbank, A.R., "Applications of space-time block codes and interference suppression for high capacity and high data rate wireless systems", Proc. 32nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 1998, pp. 1803-1810.

[12] Lu, B., and Wang, X., "Iterative Receivers for Multiuser Space-Time Coding Systems", IEEE Journal on Select Areas in Communications, Vol. 18, No.11, Nov. 2000.

[13] Damen, M.O., and, Abed-Meraim, K., and Safavi, A., "On CDMA with space-time Codes over multi-path fading channel", in IEEE Transaction on Wireless, Vol. 2, Jan. 2003, pp. 11-19.

مقایسه عملکرد و پیچیدگی آشکارسازهای چندکاربره CDMA در ...

گیرنده‌های با پیچیدگی کمتر نسبت به دایورسیتی دریافت می‌گردد. این موضوع را می‌توان در جداول ۳ و ۴ برای تعداد آنتنهای بیشتر هم مشاهده کرد. نتیجه دیگری که می‌توان از جداول ۱ تا ۴ گرفت اینست که با افزایش تعداد آنتن‌ها میزان پیچیدگی هم نسبتاً بطور خطی افزایش پیدا می‌کند.

### جدول ۳. پیچیدگی محاسباتی گیرنده‌های متفاوت برای

#### حالت دایورسیتی دریافت با چهار آنتن

حالت ج	نوع گیرنده	تعداد جمع و ضرب‌های مختلط مورد نیاز	تعداد مقایسه‌ها
یک آنتن فرستنده و چهار آنتن گیرنده	M.F.	$8KN + 3K$	2K
	Dec.	$2/3 K^3 + 8K^2 + 8KN - K$	2K
	MMS E	$2/3 K^3 + 8K^2 + 8KN + K$	2K
	PIC	$24K^2 + 8K^2N + 16KN - 23K + 8N$	6K
	SIC	$16KN + 11K - 8N - 8$	2K
	DF	$1/3 K^3 + 16K^2 + 8KN - 9K$	2K

### جدول ۴. پیچیدگی محاسباتی گیرنده‌های متفاوت برای

#### حالت دایورسیتی دریافت و ارسال

حالت د	نوع گیرنده	تعداد جمع و ضرب‌های مختلط مورد نیاز	تعداد مقایسه‌ها
دو آنتن فرستنده و دو آنتن گیرنده	M.F.	$4KN + 5K$	2K
	Dec.	$2K^3 + 4K^2 + 4KN + 3K$	2K
	MMS E	$2K^3 + 4K^2 + 4KN + 5K$	2K
	PIC	$20K^2 + 4K^2N + 8KN - 9K + 4N$	6K
	SIC	$8KN + 13K - 4N - 8$	2K
	DF	$1/3 K^3 + 10K^2 + 4KN - 3K$	2K

بنابراین می‌توان با توجه به نتایج این بخش و همچنین نتایج شبیه‌سازی‌های مربوط به عملکرد خطای ساختارها نتیجه گرفت که با استفاده از افزایش آنتن‌ها در فرستنده می‌توان به عملکردی مشابه دایورسیتی دریافت ولی با ساختارهای گیرندگی با پیچیدگی کمتر رسید. این نتیجه از جمله مزیت‌های مهم دایورسیتی ارسال و کدینگ‌های فضا-زمان است که آنرا برای استفاده در سیستم‌های موبایل مناسب کرده است.

### ۵. نتیجه گیری

در این مقاله ترکیب دو روش آشکارسازی چندکاربره و کدینگ فضا-زمان در سیستم‌های CDMA مورد بررسی قرار گرفته است. ما آرایش‌های مختلف برای آنتن‌ها در فرستنده و گیرنده از لحاظ تعداد در نظر گرفته و آنگاه به ارائه ساختار گیرنده‌های مختلف برای هر آرایش با استفاده از تکنیک‌های آشکارسازی چندکاربره و کدینگ فضا-زمان پرداختیم.

در این مقاله همچنین به مقایسه تکنیک‌های مختلف آشکارسازی چندکاربره در سیستم‌های CDMA چندآنتنی و تحت روشهای

- [19] Huang, H., and Viswanathan, H., "Multiple Antennas in Cellular CDMA Systems: Transmission, Detection and Spectral Efficiency", IEEE Transactions on Wireless Communications, July 2002.
- [20] Razavizadeh, S.M., Vakili, V.T., Azmi, P., "Comparison of Several Multiple Antenna Multiuser Detectors in Wireless CDMA Systems", Proceeding of the 5th IFIP TC6 Conference on Mobile and Wireless Networks (MWCN2003), 2003.
- [21] Buehrer, R.M., Correal-Mendoza, N.S., and Woerner, B.D., "A Simulation Comparison of Multiuser Receivers for Cellular CDMA", IEEE Transaction on Vehicular Technology, Vol.49 ,No.4 , July 2000.
- [22] Papasakellariou, A., "Overview of Interference Cancellation for CDMA Wireless Systems" IEEE International Symposium on Information Technology (ITCC 2000), Las Vegas, NV, USA, March 2000.
- [23] Cedenotti, E., and Leorcini, M., *Parallel Complexity of Linear System Solution*, World Scientific Publishing, 1991.
- [14] Hochwald, B., Marzetta, T., and Papadias, C., "A Transmit Diversity Scheme for Wideband CDMA Systems Based on Space-Time Spreading", IEEE Journal of Selected Areas in Communications, Vol. 19, No. 1, Jan. 2001, pp. 48-60.
- [15] Huang, H., Viswanathan, H., and Foschini, G.J., "Achieving high data rates in CDMA systems using BLAST. Techniques", IEEE Global Telecommunications conference, Globecom99, 1999, pp. 2316-2320.
- [16] Xu, C., Xu, H., and Sup Kwak, K., "The Application of Space-Time Codes in CDMA Systems", IEEE Vehicular Technology Conference, 2001.
- [17] Yuan, J., Vucetic, B., Xu, B., and Chen, Z., "Design of Space-Time Codes and its Performance in CDMA Systems", in Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference, May, 2001.
- [18] Reynolds, D., Wang, X., and Poor, H.V., "Blind Adaptive Space-Time Multiuser Detection with Multiple Transmitter and Receiver Antennas", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 50, No. 6, June 2002, pp. 1261-1276.

Archive of SID