

تخصیص عادلانه‌ی منابع در سیستم چندپخش‌ی مبتنی بر MIMO-OFDM با استفاده از الگوریتم GA/PSO

علیرضا غلامرضائی^۱ حمید فرخی^۲ جواد زراعتکارمقدم^۳

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران

alireza.gholamrezaee@birjand.ac.ir

۲- دانشیار - دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران

h.farrokhi@birjand.ac.ir

۳- استادیار- دانشجوی دکتری- دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران

javad.zeraatkar.m@birjand.ac.ir

چکیده: در این مقاله، تخصیص توان و زیرحامل در یکسیستم چندپخش‌ی مبتنی بر MIMO-OFDM به منظور افزایش ظرفیت کلی سیستم پیشنهاد می‌گردد. همچنین موضوع تخصیص عادلانه‌ی منابع بین گروه‌های چندپخش‌ی نیز مطرح می‌شود. برای رسیدن به این اهداف، یک الگوریتم تخصیص منابع زیربهرینه پیشنهاد شده است. الگوریتم پیشنهادی، علاوه بر اینکه پیچیدگی محاسباتی کمی دارد، سطح مطلوبی از منابع را به تمامی کاربران موجود در گروه‌های چندپخش‌ی تخصیص می‌دهد. علاوه بر این، یک الگوریتم ترکیبی ژنتیک و ازدحام ذرات برای تخصیص توان و زیرحامل بین گروه‌های چندپخش‌ی پیشنهاد داده می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش‌های ارائه شده، ظرفیت کلی سیستم را نسبت به روش‌های پیشین افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم‌های ابتکاری، تخصیص عادلانه‌ی منابع، سیستم چندپخش‌ی، سیستم MIMO-OFDM، ظرفیت

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۰۳

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۱۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر جواد زراعتکارمقدم

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - بیرجند- شوکت آباد- دانشگاه بیرجند- دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

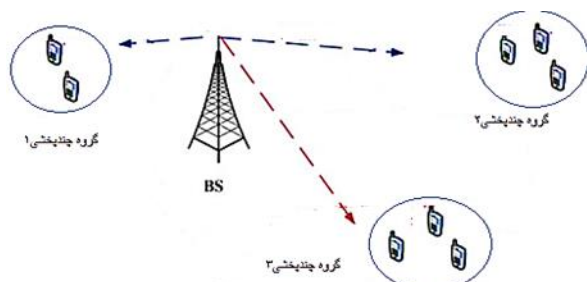
با توجه به لزوم پشتیبانی شبکه‌های بی‌سیم نسل آینده از خدمات گوناگون چندرسانه‌ای با درجه‌ی کیفی متفاوت^۱، شبکه‌های-MIMO^۲ OFDM^۳ معرفی شده‌اند. این شبکه‌ها به خاطر بهره‌وری طیفی بالا و انعطاف‌پذیری در مدیریت منابع، یک فناوری امیدبخش محسوب می‌شوند [۱،۲].

ارسال چندپخش^۴، یکی دیگر از فناوری‌هایی است که در سیستم‌های مخابرات بی‌سیم مورد استفاده قرار می‌گیرد و در نسل سوم مخابرات سیار نیز بیان شده است. بسیاری از خدمات چندرسانه‌ای نظیر ویدئو کنفرانس توسط ارسال چندپخش پیاده‌سازی می‌شوند [۳ و ۴]. برخلاف ارسال تک‌پخش^۵ که در هر برش زمانی^۶ اطلاعات تنها به یک کاربر تحویل داده می‌شود [۵]، در ارسال چندپخش^۷، زمانی که چندین کاربر محتوای یکسانی درخواست کنند، سیستم چندپخش^۸ به آن کاربران اجازه تشکیل گروه و به اشتراک گذاشتن منابع تخصیصی را می‌دهد. بنابراین، هر زیرحامل بجای اختصاص به یک کاربر، به یک گروه اختصاص می‌یابد. در نتیجه، بهره‌وری پهنای باند افزایش یافته و توان ارسال نیز بطور قابل ملاحظه‌ای نسبت به فرایند تک‌پخش کاهش می‌یابد. در این روش، یک درخت چندپخش^۹ از طریق الگوریتم‌های مسیریابی تشکیل می‌گردد؛ که یک اتصال قابل اطمینان بین گره منبع و اعضای گروه را از طریق میزبان‌های قابل اعتماد فراهم می‌آورد. در اکثر الگوریتم‌های مسیریابی، از یک خوشه مرکزی به تقریباً فاصله مساوی با اعضای گروه دارد، جهت ساخت یک درخت چندپخش^{۱۰} با کوتاهترین مسیر استفاده می‌شود. سپس منبع تنها یک کپی از بسته‌ی داده را به آدرس گروه چندپخش^{۱۱} ارسال می‌کند. زیرساخت شبکه، این بسته‌ها را در یک مسیر هوشمند تکرار می‌کند. هدایت داده‌ها با توجه به توپولوژی گیرنده‌های خواهان داده، در بخشی از اطلاعات قرار داده می‌شود [۶].

نمونه‌ای از یک سیستم چندپخش^{۱۲} در شکل (۱) نشان داده شده است. در این شکل، سه گروه چندپخش^{۱۳} به نمایش گذاشته شده است که هر یک از این گروه‌ها محتوای یکسانی را درخواست می‌کنند. در این سیستم‌ها ممکن است کاربرانی که محتوای یکسانی را درخواست می‌کنند از لحاظ جغرافیای در موقعیت‌های متفاوتی باشند. با توجه به حضور چندین کاربر با موقعیت مکانی متفاوت در هر یک از گروه‌های چندپخش^{۱۴}، تعیین نرخ ارسال به این گروه‌های یکی از مهم‌ترین چالش‌ها می‌باشد. یکی از رایج‌ترین روش‌های تعیین نرخ ارسال به این گروه‌ها، ارسال با نرخ^{۱۵} است که بدترین کاربر حاضر در آن گروه (یعنی کاربری که بدترین کیفیت کانال را دارد) نیز بتواند اطلاعات ارسال شده را رمزگشایی^{۱۶} کند [۷]. با انتخاب این روش می‌توان اطمینان داشت که تمام کاربران یک گروه می‌توانند اطلاعات ارسال شده را بدون مشکل دریافت کنند.

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه تخصیص منابع صورت گرفته است که اکثر آن‌ها سیستم‌های با ارسال تک‌پخش^{۱۷} را در نظر گرفته‌اند [۸-۱۰] و مواردی که ارسال چندپخش^{۱۸} را مدنظر قرار داده‌اند نیز بر سیستم‌های مبتنی بر OFDM تمرکز داشته‌اند [۱۱-۱۳]. در [۱۴] به منظور افزایش ظرفیت سیستم‌های چندپخش^{۱۹} مبتنی بر MIMO-OFDM یک الگوریتم حریصانه ارائه شده است؛ که در آن هر زیرحامل به گروهی که بهترین موقعیت کانال و تعداد بیشتری کاربر دارد اختصاص می‌یابد.

در اکثر تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌ی سیستم‌های چندپخش^{۲۰}، بحث عدالت^{۲۱} در توزیع منابع رادیویی مطرح نشده و مورد بررسی قرار نگرفته است. موضوع عدالت در توزیع منابع رادیویی، نقش مهمی را در دنیای تجاری واقعی ایفا می‌کند. در [۱۵] با در نظر گرفتن کمترین زیرحامل درخواستی از طرف هر گروه، با هدف افزایش ظرفیت کلی سیستم به تخصیص زیرحامل در سیستم‌های چندپخش^{۲۲} مبتنی بر MIMO-OFDM پرداخته شده است.



شکل (۱): نمونه‌ای از یک سیستم چندپخش^{۲۳} با ۳ گروه

الگوریتم‌های فراابتکاری جهت تخصیص منابع در برخی از پژوهش‌ها بکار گرفته شده‌اند [۱۶-۱۸]. در [۱۹] با هدف افزایش ظرفیت کلی سیستم، یک الگوریتم دو مرحله‌ای ارائه گردیده است؛ که در مرحله‌ی اول با استفاده از الگوریتم ژنتیک به تخصیص زیرحامل در یک سیستم چندپخش^{۲۴} مبتنی بر OFDM پرداخته می‌شود و سپس در مرحله دوم تخصیص توان بررسی می‌گردد.

در این مقاله، یک سیستم چندپخش^{۲۵} مبتنی بر MIMO-OFDM معرفی می‌گردد. سپس، به منظور توزیع بهینه و عادلانه‌ی منابع رادیویی و با هدف افزایش ظرفیت کلی سیستم، توان و زیرحامل‌ها به دو روش پیشنهادی به گروه‌های چندپخش^{۲۶} تخصیص داده می‌شوند.

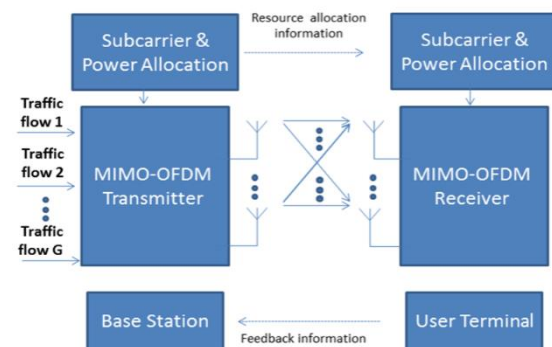
ادامه مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده است:

در بخش ۲، مدل سیستم پیشنهادی معرفی و تجزیه و تحلیل می‌گردد. سپس به بیان ریاضی و فرمول‌بندی مدل پیشنهادی پرداخته می‌شود. در بخش ۳، به معرفی روش‌های پیشنهادی تخصیص منابع رادیویی پرداخته خواهد شد. شبیه‌سازی مدل پیشنهادی به همراه روش‌های تخصیص منابع پیشنهادی در بخش ۴ نشان داده شده است.

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نیز بیان شده است. در نهایت، نتیجه‌گیری حاصل از این پژوهش در بخش ۵ ارائه می‌گردد.

۲- مدل سیستم

مدل سیستم چندپخش مبتنی بر MIMO-OFDM که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است، در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۲)، یک ایستگاه پایه^۱ (BS) در نظر گرفته می‌شود که به K کاربر بی‌سیم و بر روی N زیرحامل سرویس می‌دهد. فرض می‌شود که اطلاعات حالت کانال^۱ (CSI) تمام کاربران به طور کامل در اختیار BS قرار دارد. علاوه بر این، فرض می‌گردد که سیگنال‌های ارسالی، محوشدگی آهسته^{۱۱} را تجربه می‌کنند. در نتیجه ضرایب کانال در طول فرآیند تخصیص منابع ثابت است.



شکل (۲): مدل سیستم چندپخش مبتنی بر MIMO-OFDM

تعداد N_t آنتن در BS و N_r آنتن برای هر کاربر در نظر گرفته می‌شود. ماتریس کانال کاربر k ام بر روی زیرحامل n ام دارای ابعاد $N_r \times N_t$ است که به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\mathbf{H}_{kn} = \begin{bmatrix} h_{1,1}^{kn} & h_{1,2}^{kn} & \dots & h_{1,N_t}^{kn} \\ h_{2,1}^{kn} & h_{2,2}^{kn} & \dots & h_{2,N_t}^{kn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r,1}^{kn} & h_{N_r,2}^{kn} & \dots & h_{N_r,N_t}^{kn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن h_{N_r,N_t}^{kn} بهره‌ی کانال بین آنتن فرستنده و آنتن گیرنده، مربوط به کاربر k ام و بر روی زیرحامل n ام است. مقادیر ویژه‌ی ماتریس $\mathbf{H}_{kn} \mathbf{H}_{kn}^T$ به صورت $\{\lambda_{kn}^i\}_{i=1}^M$ فرض شده است که در آن $M = \min\{N_r, N_t\}$ می‌باشد. همچنین فرض شده است که $\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{kn} = P_t$ که P_t توان تخصیص داده شده به کاربر k ام و بر روی زیرحامل n ام است و P_t کل توان ارسالی در BS است. با فرض استفاده از مدولاسیون QAM مرتبه‌ی M ، می‌توان نرخ خطای بیت^{۱۲} (BER) را از رابطه زیر تقریب زد [20]:

$$BER_{kn}^i \approx \frac{1}{5} \exp \left(\frac{-1.5 p_{kn} \lambda_{kn}^i}{N_0 (2^{b_{kn}^i} - 1)} \right) \quad (2)$$

$$b_{kn}^i = \log_2 \left(1 + \frac{p_{kn} \lambda_{kn}^i}{N_0 \tau_{kn}^i} \right); \quad \tau_{kn}^i = -\frac{2}{3} \ln(5 BER_{kn}^i) \quad (3)$$

برای سادگی در نوشتار، BER_{kn}^i را با BER و τ_{kn}^i را با τ نشان می‌دهیم؛ یعنی $BER_{kn}^i = BER$ ، $\tau_{kn}^i = \tau$.

با توجه به اینکه هر یک از کاربران موجود در یک گروه، محوشدگی متفاوتی را تجربه می‌کند؛ معمولاً، نرخ ارسال داده‌ها توسط بدترین کاربر از لحاظ وضعیت کانال تعیین می‌شود. با استفاده از این روش، می‌توان تضمین کرد که تمام کاربران یک گروه می‌توانند از خدمات ارسالی استفاده کنند. بنابراین، BS می‌تواند داده‌ها را با نرخ r_{gn} از طریق زیرحامل شماره‌ی n به گروه g ام ارسال کند. نرخ ارسال r_{gn} از رابطه‌ی (۴) قابل محاسبه است.

$$r_{gn} = \arg \min_{k \in k_g} \frac{B}{N} \sum_{i=1}^M \log_2 \left(1 + \frac{p_{kn} \lambda_{kn}^i}{N_0 \tau} \right) \quad (4)$$

که N_0 توان نویز و k_g مجموعه‌ای شامل کاربران گروه g و B پهنای باند کلی سیستم را نشان می‌دهد. از این رو، مجموع نرخ داده‌ی گروه g روی زیرحامل n را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (۴) بصورت زیر نوشت:

$$R_{gn} = |k_g| r_{gn} \quad (5)$$

که منظور از $|k_g|$ ، تعداد کاربران گروه g می‌باشد.

جهت افزایش بهره‌وری سیستم، مجموع نرخ داده‌ی هر یک از گروه‌های چندپخش باید بیشینه گردد. با توجه به فرضیات گفته شده، می‌توان مسئله‌ی بهینه‌سازی مربوطه را به صورت زیر بیان کرد:

$$\max_{x_{gn}, R_{gn}} \sum_{g=1}^G \sum_{n=1}^N x_{gn} R_{gn} \quad (6)$$

که متغیر باینری x_{gn} تخصیص زیر حامل n به گروه g را نشان می‌دهد. در صورتیکه زیرحامل به آن گروه تخصیص یابد مقدار آن ۱ و در غیر این صورت مقدارش برابر با ۰ خواهد بود. در مسئله بهینه‌سازی معرفی شده در رابطه‌ی (۶) محدودیت‌های زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\sum_{g=1}^G x_{gn} = 1; \quad \forall n \quad (7)$$

$$x_{gn} \in \{0, 1\}; \quad \forall g, n \quad (8)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{gn} \geq Q_g; \quad \forall g \quad (9)$$

$$\sum_{g=1}^G Q_g < N; \quad Q_g \in \mathbb{Z}_+ \quad (10)$$

$$\sum_{n=1}^N \max_k p_{kn} \leq P_t \quad (11)$$

$$p_{kn} \geq 0; \quad \forall k, n \quad (12)$$

قیود رابطه‌ی (۷) و رابطه‌ی (۸) بیان می‌کند که هر زیرحامل تنها به یک گروه می‌تواند اختصاص یابد. با رعایت این دو قید، تداخل درون سلولی بوجود نمی‌آید. قید رابطه‌ی (۹) اختصاص حداقل زیرحامل درخواستی Q_g توسط هر گروه را تضمین می‌کند. در قید رابطه‌ی (۱۰) برخلاف الگوریتم معرفی شده در مرجع [۱۵]، تمام زیرحامل‌ها بصورت

کاربران داخل هر گروه ($|k_g|$)، توان کل سیستم (P_t)، تعداد زیرحامل درخواستی توسط هر گروه (Q_g) با رعایت رابطه‌ی (۱۰)، همچنین، مقادیر توان و زیرحامل‌ها به ازای تمام g ها و n ها برابر صفر قرار داده می‌شود. مراحل اجرای الگوریتم در ادامه بیان می‌شود. مرحله اول:

- مادامیکه $\{Q \neq \emptyset\}$ (مجموعه‌ی QoS موردنیاز گروه‌ها است)

- پیدا کن $\bar{g} \in g$ و $\bar{n} \in n$ که $R_{g\bar{n}} \geq R_{gn}$

- اگر $\sum_{n=1}^N x_{g\bar{n}} \geq Q_{\bar{g}}$

- گروه $\bar{g}$ و مجموعه زیرحامل درخواستی $Q_{\bar{g}}$ را از لیست گروه‌ها و زیرحامل‌های مورد نیاز حذف کن

- در غیر اینصورت:

- زیرحامل $\bar{n}$ را به گروه $\bar{g}$ تخصیص بده و زیرحامل $\bar{n}$ را از مجموعه زیرحامل‌های موجود N حذف کن. (با رعایت رابطه (۷))

- چون هنوز مجموعه N دارای زیرحامل است: $\{N \neq \emptyset\}$

- گروه و زیرحاملی را پیداکن که به ازای $\forall g, n$ داشته باشیم $R_{g\bar{n}} \geq R_{gn}$

- سپس زیرحامل $\bar{n}$ را به گروه $\bar{g}$ تخصیص می‌دهیم و زیرحامل $\bar{n}$ را از مجموعه N حذف می‌کنیم. (با توجه به رابطه (۷))

- با توجه به عوض شدن ضرایب و رابطه (۶) برگشت به اول

مرحله دوم:

الگوریتم تخصیص زیرحامل در مرحله اول بهینه نیست؛ زیرا در آن توزیع یکسان توان اعمال شده است. در این مرحله، با توجه به زیرحامل‌های تخصیصی در مرحله قبل، یک الگوریتم تخصیص توان بهینه ارائه می‌شود. بهره‌ی کانال ضعیف‌ترین کاربر مورد استفاده قرار می‌گیرد و از روش واترفیلینگ برای بدست آوردن توان بهینه استفاده می‌شود. توزیع توان بر روی زیرحامل‌ها به صورت $p_n^* = \max\{0, p_n\}$ می‌باشد. منظور از p_n توان تخصیص داده شده به هر آنتن زیرحامل n می‌باشد که از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\sum_{i=1}^{M_{k_n, n}} \frac{\lambda_{k_n, n}^{(i)}}{\lambda_{k_n, n}^{(i)} p_n + N_0} + \alpha = 0 \quad ; \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

در رابطه فوق، k_n کاربر مورد نظر بر روی زیرحامل n و α سطح واترفیلینگ می‌باشد. شرط $\sum_{n=1}^N M_{k_n, n} p_n^* = P_t$ در طول فرایند الگوریتم باید برقرار باشد. الگوریتم واترفیلینگ مورد استفاده، یک روش تکرارشونده می‌باشد که با استفاده از آن می‌توان توزیع بهینه‌ی توان را برای رسیدن به حداکثر ظرفیت پیدا کرد. ظرفیت کل سیستم نیز از رابطه زیر بدست می‌آید.

آزاد در اختیار گروه‌ها قرار نمی‌گیرند و تنها بخشی از زیرحامل‌ها در اختیار گروه‌ها گذاشته می‌شود تا حداقل زیرحامل برای هر گروه تضمین شود و هیچ گروهی از داشتن منبع محروم نباشد. سپس، بقیه‌ی زیرحامل‌ها به رقابت گذاشته می‌شود و گروه‌هایی که وضعیت کانال بهتری دارند، زیرحامل‌ها را به خود اختصاص می‌دهند. با این روش هم تمام گروه‌ها یک مقدار حداقل زیرحامل دریافت می‌کنند و هم گروه‌های با وضعیت بهتر می‌توانند زیرحامل‌های بیشتری را بخود تخصیص دهند. قیود (۱۱) و (۱۲) نیز تضمین می‌کنند که مجموع توان اختصاصی بر روی زیرحامل‌ها از کل توان موجود در سیستم بیشتر نشود و همین‌طور توان منفی در روابط استفاده نشود.

برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی مذکور، باید توان و زیرحامل بطور همزمان تخصیص یابند. اما با توجه به اینکه در این مسئله متغیرهای پیوسته و باینری بطور همزمان درگیر هستند و چون قیود مسئله، محدب و خطی نیستند، این مسئله در روش کلاسیک به یک مسئله‌ی NP-hard مبدل شده که حل بهینه‌ی آن بسیار پیچیده است. بنابراین، برای حل این مسئله در روش کلاسیک از الگوریتم‌های زیربهینه^{۱۴} کمک گرفته می‌شود. برای الگوریتم زیربهینه‌ی مورد استفاده در این مقاله، مسئله‌ی مورد نظر به دو بخش تقسیم و سپس حل می‌گردد. بدین منظور، در مرحله اول با فرض تخصیص توان یکسان بر روی زیرحامل‌ها، زیرحامل‌ها به صورت بهینه به گروه‌ها تخصیص داده می‌شود. در مرحله بعد، با توجه به زیرحامل‌های تخصیص داده شده در مرحله اول، توان به صورت بهینه اختصاص می‌یابد. در این مرحله، به منظور تخصیص بهینه‌ی توان از روش واترفیلینگ^{۱۵} استفاده می‌شود.

همانطور که گفته شد، برای حل بهینه‌ی مسئله‌ی معرفی شده نمی‌توان از روش بهینه‌سازی کلاسیک بهره گرفت. بنابراین، در این مقاله یک روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک و ازدحام ذرات جهت تخصیص همزمان زیرحامل و توان ارائه می‌گردد.

۳- الگوریتم‌های پیشنهادی تخصیص منابع

در این بخش، ابتدا یک روش زیربهینه جهت تخصیص عادلانه‌ی منابع معرفی می‌شود و سپس با استفاده از الگوریتم ترکیبی ژنتیک و ازدحام ذرات، روشی جهت تخصیص همزمان منابع و به منظور افزایش ظرفیت کلی سیستم پیشنهاد می‌گردد.

۳-۱- الگوریتم تخصیص منابع به روش کلاسیک

همان‌طور که گفته شد، در این مقاله از یک روش زیربهینه برای افزایش ظرفیت سیستم استفاده می‌شود؛ بدین‌صورت که حل مسئله مورد نظر در دو مرحله صورت می‌گیرد. مرحله‌ی اول، تخصیص زیرحامل با فرض تخصیص یکسان توان؛ و در مرحله دوم، تخصیص توان با در نظر گرفتن زیرحامل‌های تخصیصی مرحله اول.

ابتدا مقادیر اولیه به‌عنوان ورودی به الگوریتم داده می‌شود؛ که این مقادیر عبارتند از تعداد زیرحامل‌ها (N)، تعداد گروه‌ها (G)، تعداد

$$C = \frac{1}{B} \sum_{g=1}^G \sum_{n=1}^N x_{gn} R_{gn} \quad (14)$$

۳-۱-۱- بررسی پیچیدگی محاسباتی الگوریتم

مسئله توصیف شده توسط روابط (۷) تا (۱۲) یک مسئله ی برنامه ریزی صحیح و دودویی باقی و غیرخطی است و جهت یافتن راه حل بهینه به G^N تخصیص زیر حامل نیاز دارد. در نتیجه، جستجوی جامع با توجه به تعداد زیرحامل ها دارای پیچیدگی نمایی $O(G^N)$ است.

در ابتدا، الگوریتم نیازمند زمانی ثابت برای تشکیل مجموعه های درگیر و بخش توان برای هر زیر حامل است. سپس، گروه و زیرحامل یکه بیشترین R_{gn} را از G گروه چندپخش دریافت می کند، پیدا می شود. در صورتی که گروه چندپخش حداقل زیرحامل درخواستی را به خود اختصاص داده باشد، از عملیات بعدی حذف می شود. در بدترین حالت، برای هر یک از زیرمجموعه های موجود، G مقایسه مورد نیاز است. پس برای N زیرحامل، به $G \times N$ عملیات نیاز می باشد. بنابراین، پیچیدگی این مرحله به $O(G \times N)$ می رسد. سپس، جستجو برای یافتن بهترین گروه چندپخش g^* در میان G گروه چندپخش برای $N - \sum_{g=1}^G Q_g$ زیرحامل تخصیص داده نشده ادامه می یابد. این مرحله حداکثر به $G \times (N - \sum_{g=1}^G Q_g)$ مقایسه نیاز دارد؛ از این رو مرتبه پیچیدگی برابر با $O(G \times (N - \sum_{g=1}^G Q_g))$ می باشد.

پس پیچیدگی کلی الگوریتم به مرتبه پیچیدگی $O(G \times N)$ محدود می شود و الگوریتم ارائه شده در مقایسه با تعداد G^N عملیات برای جستجوی کامل بسیار مقرون به صرفه تر می باشد. همچنین در فرمول بندی مسئله، پیچیدگی از تعداد آنتن های دریافت و ارسال مستقل می باشد و این یکی از ویژگی های مهم است؛ چراکه پیچیدگی محاسباتی سیستم های MIMO-OFDMA با توجه به تعداد آنتن ها به مقدار قابل توجهی افزایش می یابد [۲۱].

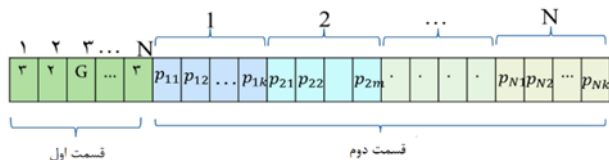
۳-۲- الگوریتم GA/PSO پیشنهادی برای تخصیص منابع

همان طور که گفته شد، مسئله ی بهینه سازی موجود در این مقاله یک مسئله ی غیرخطی و بسیار پیچیده می باشد که حل بهینه ی آن با روش های کلاسیک بسیار دشوار و زمان بر و یا حتی غیرممکن می باشد. استفاده از الگوریتم های فراابتکاری برای حل مسائل جستجوی بزرگ و پیچیده، روش مناسبی است [۱۸]. در این مقاله یک روش پیشنهادی برای یافتن جواب بهینه با استفاده از الگوریتم GA و PSO به طور همزمان ارائه می گردد که در ادامه توضیح داده می شود.

۳-۲-۱- کروموزوم^{۱۶} / ذره^{۱۷} و تابع برازندگی^{۱۸}

همان طور که در بخش دو ذکر شد، در سیستم مورد بررسی N زیرحامل و G گروه وجود دارد و تعداد کاربران در هر گروه متفاوت می باشد و تعداد کل کاربران در سیستم K می باشد. حال با توجه به

اینکه زیرحامل تخصیص داده شده به هر گروه یک عدد گسسته است و توان تخصیص داده شده به هر زیرحامل می تواند یک عدد پیوسته باشد، برای تخصیص زیرحامل از الگوریتم ژنتیک که ماهیتی گسسته دارد و برای تخصیص توان از الگوریتم PSO که ماهیتی پیوسته دارد بهره گرفته شده است. در ابتدا، فضای جستجو که ترکیبی از کروموزوم و ذره می باشد تعریف می شود، که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل (۳): یک کروموزوم/ذره جهت تخصیص توان و زیرحامل

در شکل ۳، قسمت اول، همان کروموزوم در GA می باشد که برای تخصیص زیرحامل ها به هر گروه و قسمت دوم، همان ذرات در PSO است که جهت تخصیص توان برای هر گروه بکار گرفته می شود. بخش اول به N قسمت و بخش دوم به $N \times K$ قسمت، تقسیم می شود. یک کروموزوم/ذره، یک جواب ممکن مسئله را نشان می دهد که از $\{N + N \times K\}$ قسمت تشکیل شده است. مطابق با شکل ۳، بخش اول شامل N ژن^{۱۹} است که هر ژن نشان دهنده ی زیرحامل تخصیص داده شده به یک گروه خاص می باشد و بخش دوم شامل $N \times K$ ذره، که هر ذره نشان دهنده توان تخصیص داده شده به کاربر k ام گروه g ام بر روی زیر حامل n ام می باشد.

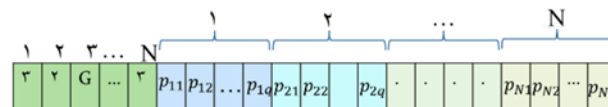
همان طور که در بخش قبل ذکر شد، رویکرد این پژوهش، تخصیص توان و زیرحامل به گروه ها با هدف بیشینه سازی نرخ ارسال سیستم می باشد. از این رو می توان رابطه ۶ را به عنوان تابع برازندگی الگوریتم ژنتیک/PSO در نظر گرفت.

۳-۲-۲- مقداردهی کروموزوم/ذره

برای مقداردهی اولیه قسمت اول (کروموزوم)، اعداد صحیح بین ۱ تا G (تعداد گروه ها) به طور تصادفی در داخل ژن ها قرار می گیرند که نشان دهنده آن است که هر زیرحامل به کدام گروه تخصیص یافته است. به عنوان مثال، در شکل (۳) زیرحامل اول به گروه سوم، زیرحامل دوم به گروه دوم، زیرحامل سوم به گروه G ام و ... تخصیص پیدا کرده است؛ که با این روش تخصیص، قید اول مسئله برقرار است، و امکان تداخل رفع می شود. در قسمت دوم اعداد پیوسته بصورت تصادفی داخل ذرات قرار می گیرند که این اعداد بین ۰ تا P_1 می باشند. پس از قرار گرفتن اعداد داخل ذرات، این اعداد طوری نرمالیزه می شوند که مجموع آنها از P_1 بیشتر نشود؛ که با این عمل قیود مربوط به توان رعایت می شود. در قسمت دوم با فرض تعداد k کاربر در گروه سوم، تعداد k بخش اول قسمت دوم، توان های تخصیصی به کاربران گروه سوم محسوب می شود. با فرض m کاربر در گروه دوم، تعداد m تای بعدی به توان های تخصیصی به گروه دوم محسوب می شود و اینکار تا

آخر ادامه دارد. در این حالت، با توجه متفاوت بودن تعداد کاربران در هر گروه و با توجه به تغییر مقدار ژن‌ها در نسل‌های بعد، شکل فضای جستجو باید اصلاح شود. کروموزوم/ذره اصلاح شده در شکل (۴) نشان داده شده است.

بنابراین، قسمت دوم به تعداد $N \times q$ ذره تقسیم می‌شود، که q برابر است با تعداد کاربران گروهی که نسبت به سایر گروه‌ها بیشترین کاربر را دارا می‌باشد. لازم به ذکر است برای گروه‌های با تعداد کاربر کمتر از q ، مثلاً گروهی با تعداد u کاربر که $u < q$ می‌باشد، با توجه به عدم وجود ضرایب کانال (صفر بودن ضرایب کانال) برای تعداد $(q-u)$ ذره، آن ذرات مقدار صفر می‌گیرند، بنابراین مشکلی برای تخصیص توان پیش نمی‌آید.



شکل (۴): کروموزوم/ذره اصلاح شده

حال برای یافتن جواب بهینه، نیازمند به‌روزرسانی مقادیر کروموزوم‌ها و ذرات می‌باشد. بدین منظور برای قسمت اول و جهت تولید مثل، از عملگرهای موجود در الگوریتم ژنتیک و جهت ذرات از روابط موجود در الگوریتم PSO بهره گرفته می‌شود که در ادامه توضیح داده می‌شوند.

۳-۲-۳- به‌روزرسانی مقادیر کروموزوم‌ها/ذرات

برای قسمت اول نیاز به یک جمعیت اولیه می‌باشد؛ که این جمعیت اولیه از تعدادی کروموزوم تشکیل شده است و با تأثیر عملگرها بر روی هر جمعیت، جمعیت جدیدی تشکیل می‌گردد. عملگرهایی که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است عبارتند از: عملگر آمیزش^{۲۰}، جهش^{۲۱} و انتخاب^{۲۲}. با استفاده از عملگر انتخاب، کروموزوم‌های برانده‌تر جهت انتخاب شدن برای تولید مثل از شانس بیشتری برخوردار هستند. روش انتخاب در این پژوهش نیز روش چرخ رولت^{۲۳} می‌باشد. همچنین با استفاده از روش انتخاب نخبگان، بهترین کروموزوم در هر نسل نگه داشته می‌شود؛ که این امر کارایی الگوریتم ژنتیک را بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. عملگر آمیزش مورد استفاده نیز آمیزش تک نقطه‌ای می‌باشد که در آن یک موقعیت تصادفی بین دو ژن در نظر گرفته می‌شود. سپس تمامی ژن‌های طرف راست یا طرف چپ این موقعیت در کروموزوم‌های والد با یکدیگر جابجا می‌شوند تا کروموزوم‌های جدید بدست آیند. پس از اتمام عمل آمیزش، عملگر جهش بر روی کروموزوم‌ها اثر داده می‌شود. این عملگر، یک ژن از یک کروموزوم را به طور تصادفی انتخاب نموده و سپس محتوای آن ژن را تغییر می‌دهد. عملگر جهش برای یافتن راه حل بهینه و جلوگیری از انتخاب یک راه حل زیربینه لازم است. تمام این عملگرها در هر مرتبه از الگوریتم باید تکرار شوند. لازم به ذکر است که پس از هر مرتبه اجرای عملگرها بر روی کروموزوم‌ها، باید در قسمت دوم با توجه به الگوریتم PSO یک سرعت ابتدایی به ذرات که در اینجا

توان تخصیص داده شده به هر کاربر می‌باشد اختصاص داده شود. سپس این ذرات در فضای پاسخ حرکت می‌کنند و نتایج حاصل، بر مبنای یک ملاک شایستگی که همان تابع برازندگی است، پس از هر بازه زمانی محاسبه می‌شود. با گذشت زمان، ذرات به سمت ذراتی که دارای ملاک شایستگی بالاتری هستند شتاب می‌گیرند. روابط حاکم بر این الگوریتم در ادامه بیان شده است. سرعت هر جز (متغیر) در رابطه (۱۵) و موقعیت هر جزء نیز در رابطه (۱۶) تعریف شده است.

$$v_i^t = (v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{id}^t) \quad (15)$$

$$y_i^t = (y_{i1}^t, y_{i2}^t, \dots, y_{id}^t) ; y_i^{t+1} = y_i^t + v_i^t \quad (16)$$

$v_i^{t+1} = c_1 \gamma_1 (y_i^t - p_i^t) + \gamma_2 c_2 (y_i^t - p_g^t) + w_i v_i^t$
در رابطه فوق، p_g^t بهترین موقعیت گروه، p_i^t بهترین موقعیت جزء، برای وزن‌دهی رابطه γ_1 و γ_2 به منظور تصادفی کردن رابطه استفاده می‌شوند.

با توجه مطالب گفته شده و تعریف متغیرهای زیرحامل و توان، الگوریتم تخصیص زیرحامل و توان را به صورت زیر می‌توان ارائه نمود:
۱- وارد کردن ورودی‌ها: تعداد تکرار الگوریتم (L)، تعداد جمعیت ($Popsiz$)، ماتریس ضرایب کانال، توان کل، تعداد کل زیرحامل‌ها، تعداد گروه‌ها، تعداد کاربران داخل هر گروه، تعداد زیرحامل درخواستی توسط هر گروه

۲- مقداردهی اولیه:

۲-۱- برای i از ۰ تا $Popsiz$ مراحل زیر را برای قسمت اول (کروموزوم) انجام بده:

۲-۱-۱- G تا 1 مقداردهی کن

۲-۱-۲- تعداد هر عدد داخل قسمت اول را شمارش کن: اگر تعداد هر عدد که نشان دهنده تعداد زیرحامل به گروه با آن شماره است از QoS مورد نظر آن گروه کمتر باشد به ۲-۱-۲

۱ پرس کن در غیر اینصورت به ۲-۲ برو

۲-۲- قسمت دوم را با اعداد تصادفی بین ۰ تا P_t مقداردهی کن و سپس آن را نرمالیزه کن (برای اینکه مجموع توان‌های تخصیص داده شده از P_t بیشتر نشود)

۲-۳- با توجه به مقادیر قسمت اول و دوم، تابع برازندگی را مطابق رابطه (۶) محاسبه و در نهایت بهترین موقعیت هر ذره و بهترین موقعیت کل گروه قسمت دوم را انتخاب کن

۳- تکرار: برای L از صفر تا L مراحل زیر انجام بده:

۳-۱- عملگر آمیزش، جهش و انتخاب را روی قسمت اول انجام بده

۳-۲- تعداد هر عدد داخل قسمت یک را شمارش کن: اگر تعداد هر عدد که نشان دهنده تعداد زیرحامل به گروه با آن

شماره است از QoS مورد نظر آن گروه کمتر باشد به ۳-۱
 پرش کن در غیر این صورت به ۳-۳ برو
 ۳-۳ مقدار ذرات را به روز کن
 ۳-۴ اگر $L=1$ پرش به مرحله ۴ در غیر این صورت پرش به ۳-۳
 ۴- کروموزومی که برازندگی بالاتری دارد و آخرین مقدار بدست آمده برای ذرات، جواب مورد نظر می باشد.

۴- مدل سازی و نتایج شبیه سازی

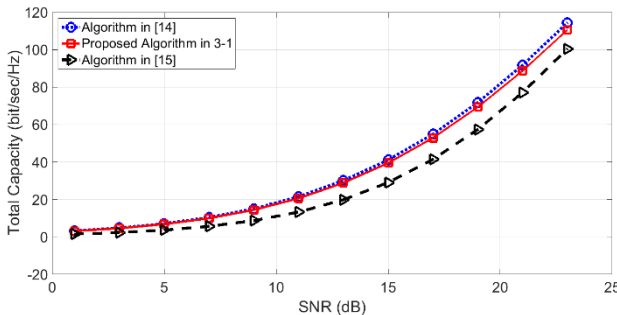
در این بخش، نتایج شبیه سازی برای نشان دادن عملکرد الگوریتم های پیشنهادی در یک سیستم MIMO-OFDM با یک BS، ارائه شده است. در ابتدا الگوریتم پیشنهادی بخش ۳-۱ شبیه سازی شده و با الگوریتم مراجع [۱۵و۱۴] مقایسه می گردد. سپس الگوریتم پیشنهادی بخش ۳-۲ شبیه سازی و با روش ارائه شده در مرجع [۱۷] مقایسه می شود. در شبیه سازی ها، یک کانال فرکانس گزین^{۲۴} در نظر گرفته شده است که شامل ۳ مسیر مستقل رایلی برای هر مسیر ارسال فروسو^{۲۵} (DL) بین هر کدام از N_t آنتن فرستنده و N_r آنتن گیرنده ی هر کاربر چندپخش است، و هر مسیر با مدل محوشدگی تخت کلارک^{۲۶} مدل گردیده است. همچنین فرض شده است که سیستم ضرایب کانال را بطور کامل می داند. زمان نمونه برداری نیز $4-10^{-8}$ در نظر گرفته شده است. سایر پارامترهای استفاده شده در این شبیه سازی در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مقادیر پارامترهای به کار رفته شده در شبیه سازی

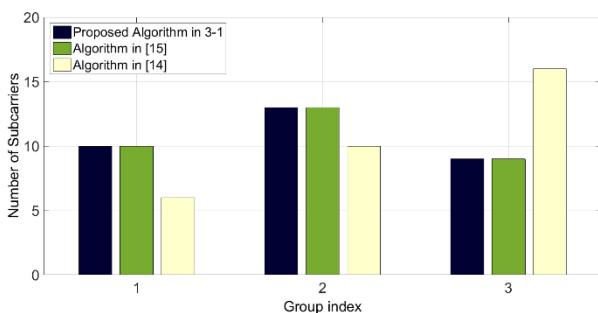
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
1MHz	B (پهنای باند کلی سیستم)	2	N_t (تعداد آنتن فرستنده)
32	N (تعداد زیرحامل ها)	3	تعداد مسیرها
3	G (تعداد گروه های چندپخش)	1W/Hz	توان نویز
4	K_g (تعداد کاربران داخل هر گروه)	60Hz	حداکثر شیفت داپلر
8	Q_g (حداقل تعداد زیرحامل درخواستی هر گروه)	10^{-3}	BER
2	N_r (تعداد آنتن گیرنده)	1W	P_t (توان کلی سیستم)

در شکل (۵)، ظرفیت کلی سیستم بر حسب SNR (dB) رسم شده است. همچنین، نتیجه ی مقایسه ی الگوریتم ارائه شده در این پژوهش با روش پیشنهادی مراجع [۱۴و۱۵]، در شکل (۵) نشان داده شده است. شکل (۵) نشان می دهد که الگوریتم ارائه شده در این مقاله نسبت به الگوریتم [۱۵] ظرفیت کل سیستم را افزایش داده است و هر چند این

ظرفیت در [۱۴] نسبت به روش ارائه شده کمی بیشتر است؛ ولی همان طور که در شکل (۶) مشخص است؛ با استفاده از الگوریتم [۱۴] تعداد ۶ زیرحامل به گروه اول تخصیص یافته در صورتی که حداقل زیرحامل درخواستی برای هر گروه حداقل ۸ است. پس روش ارائه شده در این مقاله ضمن ارضاء حداقل زیرحامل درخواستی از طرف هر گروه، ظرفیت کل سیستم را نیز افزایش داده است.

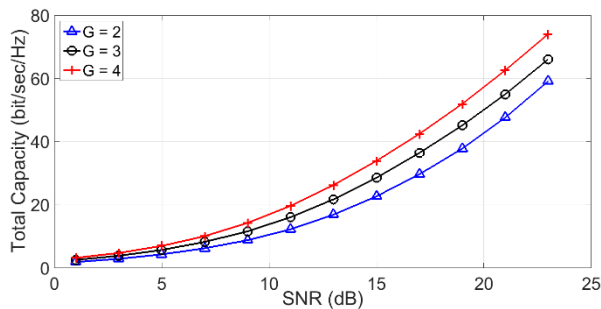


شکل (۵): مقایسه الگوریتم [۱۴و۱۵] با روش پیشنهادی در بخش ۳-۱. (ظرفیت کلی سیستم بر حسب SNR)

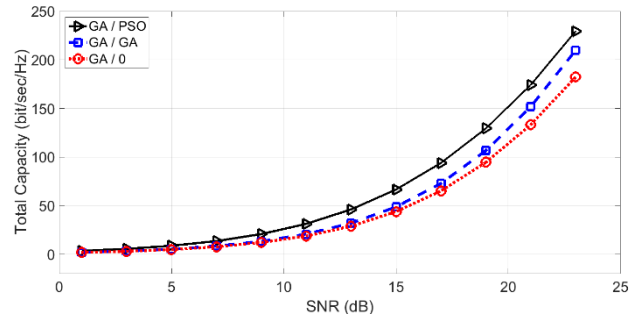


شکل (۶): تعداد زیرحامل های تخصیص داده شده به هر گروه با بکارگیری روش ارائه شده در بخش ۳-۱

نتایج حال از روش ارائه شده در بخش ۳-۲ در شکل (۷) نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۷) مشخص است، ظرفیت کل سیستم با روش GA/PSO که روش ارائه شده در این پژوهش می باشد، نسبت به روش GA/0 که روش ارائه شده در [۱۹] می باشد (البته سیستم مورد بررسی در [۱۹]، OFDM می باشد که در اینجا روش ارائه شده در [۱۹] بر روی سیستم MIMO-OFDM پیاده شده است) بیشتر است. همچنین، ظرفیت کل سیستم با استفاده از GA/PSO نسبت به روش GA/GA که در آن زیرحامل و توان با روش الگوریتم ژنتیک تخصیص پیدا می کند، افزایش می یابد. همان طور که گفته شد، با توجه به ماهیت پیوسته بودن توان و پیوسته بودن الگوریتم PSO، استفاده از آن در تخصیص توان بهتر می باشد. شکل (۸) نیز تعداد زیرحامل تخصیص داده شده به هر گروه را با توجه به بکار بردن هر روش نشان می دهد. همان طور که در شکل (۸) مشخص است، حداقل زیرحامل برای تمام گروه ها در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۰): مقایسه الگوریتم کلاسیک به ازای تعداد گروه های مختلف (ظرفیت کلی سیستم بر حسب SNR)



شکل (۷): مقایسه روش ارائه شده در بخش ۳-۲ (ظرفیت کلی سیستم بر حسب SNR)

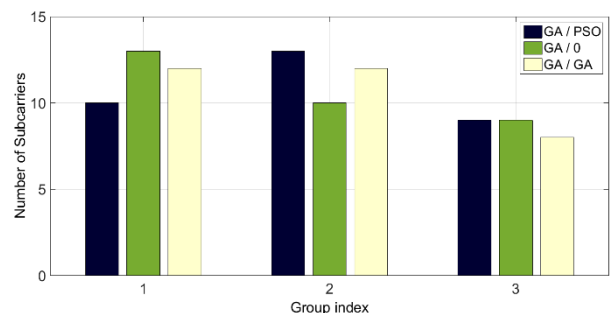
۵- نتیجه گیری

در این مقاله دو روش پیشنهادی در زمینه تخصیص زیرحامل و توان، برای بهبود و افزایش ظرفیت سیستم های چندبخشی مبتنی بر MIMO-OFDM ارائه شد. در روش پیشنهادی اول، با تخصیص بهینه توان و با استفاده از روش واترفیلینگ و استفاده از یک تعریف جدید در بحث تخصیص عادلانه منابع، ظرفیت کلی سیستم نسبت به روش های موجود بهبود یافت. در روش پیشنهادی دوم، با تخصیص همزمان توان و زیرحامل با استفاده از روش ترکیبی الگوریتم ژنتیک و PSO ظرفیت کلی سیستم افزایش داده شد و نسبت به روش ارائه شده در [۱۹] بهره‌وری سیستم بهبود یافت. نتایج شبیه سازی ها نیز افزایش عملکرد سیستم را با استفاده از این روش ها نشان می دهد.

مراجع

- [۱] زراعتکار مقدم، جواد، فرخی، حمید، ندا، ناصر، " بررسی تاثیر فاصله بین آنتن ها در فرستنده و گیرنده بر روی ظرفیت کانال MIMO " نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال سیزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۵.
- [۲] زراعتکار مقدم، جواد، ندا، ناصر، قاضی زاده، رضا، " مدل سازی دو بعدی کانال های چند ورودی-چند خروجی با آرایه های قطبی شده "، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال یازدهم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۳۹۳.

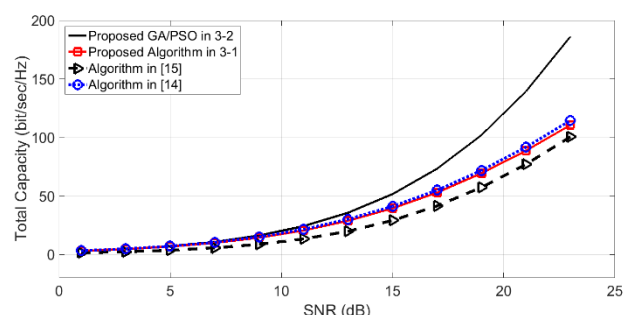
- [3] C. Jie, "Mobile TV - a great opportunity for WiMAX," Communicate, no. 41, pp. 34-36, Jun. 2008
- [4] Alejandro de la Fuente, José Joaquín Escudero-Garzás, Ana García-Armada "Radio Resource Allocation for Multicast Services Based on Multiple Video Layers ", IEEE Transactions on Broadcasting, Vol.: PP, Issue: 99, 2018.
- [5] Louis Christodoulou, Omar Abdul-Hameed, Ahmet M. Kondo, Janko Calic, " Adaptive Subframe Allocation for Next Generation Multimedia Delivery Over Hybrid LTE Unicast Broadcast", IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 62, pp.540-551, 2016.
- [6] Chen Jiang, Wenhao Wu, Zhi Ding, " LTE Multimedia Broadcast Multicast Service Provisioning Based on Robust Header Compression", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.17, pp.1161-1172, 2018.
- [7] Alejandro de la Fuente, Guillem Femenias, Felip Riera-Palou, Ana García Armada, " Subband CQI Feedback-Based Multicast Resource Allocation in MIMO-OFDMA



شکل (۸): تعداد زیرحامل های تخصیص داده شده به هر گروه با به کارگیری روش ارائه شده در بخش ۳-۲

شکل (۹) مقایسه روش ارائه شده در بخش ۳-۱ و ۳-۲ را نشان می دهد. همانطور که در شکل (۹) مشخص است، ظرفیت کل سیستم در روش ارائه شده در ۳-۲ بیشتر از روش ارائه شده در ۳-۱ می باشد، چراکه در آن تخصیص توان و زیرحامل به صورت همزمان صورت پذیرفته است.

شکل (۱۰) ظرفیت کل سیستم را به ازای تعداد گروه های مختلف نشان می دهد، که با استفاده از الگوریتم کلاسیک بدست آمده است. در این شکل، تعداد ۴ کاربر برای هر گروه در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که افزایش ظرفیت سیستم با افزایش تعداد آنتن های فرستنده و گیرنده متناسب می باشد [۲۲].



شکل (۹): مقایسه روش ارائه شده در ۳-۱ و ۳-۲ (ظرفیت کلی سیستم بر حسب SNR)

¹Quality of Service

²Multiple-Input and Multiple-Output

³Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

⁴Multicast

⁵Unicast

⁶Time Slot

⁷Decode

⁸Faire

⁹Base Station

¹⁰Channel State Information

¹¹Slow Fading

¹²Bit Error Rate

¹³Optimal

¹⁴Sub-Optimal

¹⁵Water-filling

¹⁶Chromosome

¹⁷Particle

¹⁸Fitness function

¹⁹Gene

²⁰Crossover

²¹mutation

²²Elitist

²³Roulette

²⁴Frequency selective

²⁵Downlink

²⁶Clarke's flat fading

Networks",IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. PP, 2018.

- [8] Ganesh Venkatraman, Antti Tölli, Markku Juntti, Le-Nam Tran, "Traffic Aware Resource Allocation Schemes for Multi-Cell MIMO-OFDM Systems",IEEE Transactions on Signal Processing ,Vol. 64, pp.2730-2745,2016.
- [9] Changyang She, Chenyang Yang, Lingjia Liu, "Energy-Efficient Resource Allocation for MIMO-OFDM Systems Serving Random Sources With Statistical QoS Requirement",IEEE Transactions on Communications,Vol. 63, pp.4125-4141,2015.
- [10] Mehdi Ghamari Adian, Hassan Aghaeinia, "Resource Allocation in MIMO-OFDM-Based Cooperative Cognitive Radio Networks ",IEEE Transactions on Communications, Vol. 62, pp.2224-2235,2014.
- [11] Ngo, D. T., Tellambura, C., & Nguyen, H. H, "Efficient resource allocation for OFDM multicastsystems With spectrum-sharing control," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.58,pp. 4878–4889,2009.
- [12] Özlem Tuğfe Demir, Temel Engin Tuncer "Max–Min Fair Resource Allocation for SWIPT in Multi-Group Multicast OFDM Systems ",IEEE Communications Letters, Vol.21,pp. 2508 – 2511,2017.
- [13] Giuseppe Araniti, Massimo Condoluci, Antonio Iera, Antonella Molinaro, John Cosmas, Mohammadreza Behjati, "ALow-Complexity Resource Allocation Algorithm for Multicast Service Delivery in OFDMA Networks",IEEE Transactions on Broadcasting , Vol. 60, pp. 358 – 369,2014.
- [14] Xu, J., Lee, S. J., Kang, W. S., & Seo, J. S. "Adaptive resource allocation algorithm for MIMO–OFDM based wireless multicast systems,".IEEE Transactions on Broadcasting, 56(1), 98–102, 2010.
- [15] Fraimis, Ioannis G., and Stavros A. Kotsopoulos. "Fair radio resource allocation for MIMO OFDM-based multicast systems," Wireless Personal Communications Springer .2012
- [16] Lei Xu, Yaping Li, Zhen-min Tang, "Hybrid-genetic-algorithm-based resource allocation for slow adaptive OFDMA system under channel uncertainty",Electronics Letters,Vol.50,pp30-32, 2014.
- [17] Yan Jiao, Inwhae Jo, "Energy-efficient resource allocation for heterogeneous cognitive radio network based on two-tier crossover genetic algorithm",Journal of Communications and Networks, Vol.8, pp.112-122,2016.
- [18] Ren Han; Yang Gao, Chunxue Wu, Dianjie Lu, "An Effective Multi-Objective Optimization Algorithm for Spectrum Allocations in the Cognitive-Radio-Based Internet of Things ",IEEE Access,Year: 2018, Vol. PP, Issue: 99,2018.
- [19] Nitin Sharma, A. S. Madhukumar. "Genetic Algorithm Aided Proportional Fair Resource Allocation in Multicast OFDM Systems,".IEEE Trans On Broadcasting..2015
- [20] Chung, S. T., Goldsmith, A. "Degrees of freedom in adaptive modulation: A unified view, ".IEEE Transactions on Communications, Vol,49(9), 1561–1571, 2001.
- [21] Chan, P. W. C., & Cheng, R. S. "Capacity maximization for zero-forcing MIMO–OFDMA downlink systems with multiuser diversity". IEEE Transactions on Wireless Communications, 6(5),1880–1889,2007.
- [22] David Gesbert, Mansoor Shafi, Fellow, Da-shan Shiu, "From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space–Time Coded Wireless Systems",IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 21, NO. 3, APRIL 2003