



Computational Intelligence in Electrical Engineering  
Vol. 15, No. 2, 2024  
pp. 1-14  
Research Paper

## Joint Radio and Computing Resource Allocation in Cloud Radio Access Networks

Narges Kiani<sup>1</sup>, Naghmeh Sadat Moayedian<sup>2\*</sup>

Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology,  
Isfahan, Iran.

Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology,  
Isfahan, Iran

### Abstract:

In C-RAN architecture, all computational processing is performed in the central baseband unit (BBU) pool, while radio operations are carried out in the remote radio heads (RRHs). The central BBU pool is connected to the RRHs by fronthaul links. Therefore, by separating the processing unit and the radio units, the clustering structure of RRHs can be designed to adapt to network changes. This paper deals with the problem of radio and computation resource allocation to maximize the weighted sum rate. To reduce complexity, we use user-centric clustering and appropriate training resource allocation. Additionally, to lessen channel training overhead, an incomplete model of channel state information is considered, in which only intra-cluster channel state information is estimated. By replacing a sticky lower bound of user data rate in the main problem, the beamforming vectors under the constraints of computational and radio resources are designed in three steps. In the first step, the weighted sum rate maximization problem is solved under maximum radio transmitted power constraints by the weighted minimum mean square error method. Then, in the second step, we propose a greedy algorithm to allocate computational resources to users. In the third step, fronthaul capacity constraints are applied by another greedy algorithm.

**Keywords:** Cloud Radio Access Network, Remote Radio Head, Joint Radio and Computing Resources Allocation, Channel State Information.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/ISEE.2024.136378.1619>

## تخصیص توأمان منابع رادیویی و محاسباتی در شبکه دسترسی رادیویی ابری

نرگس کیانی<sup>۱</sup>، نغمه سادات مؤیدیان<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

n.kiani92@gmail.com

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

moayedian@iut.ac.ir

**چکیده:** شبکه‌های دسترسی رادیویی ابری (C-RAN) دارای بهره‌وری انرژی و طیفی بالا هستند. در C-RAN تمام پردازش محاسباتی در استخر مرکزی واحد باند پایه (BBU) و عملیات رادیویی در رأس‌های رادیویی راه دور (RRH) صورت می‌گیرد. استخر مرکزی BBU توسط خطوط روبنا به RRHها متصل است. با جداسازی بخش پردازش BBU و توسعه RRHهای پراکنده، ساختار خوشه‌بندی RRHها را سازگار با تغییرات شبکه می‌توان طراحی کرد. در این مقاله برای کاهش پیچیدگی در C RAN فراچگال، خوشه‌بندی به صورت کاربرمحور و تخصیص منابع آموزش کانال متناسب با آن استفاده می‌شود. همچنین، برای کاهش سربار آموزش، مدل اطلاعات جزئی حالت کانال استفاده می‌شود. سپس مسئله طراحی بردارهای شکل‌دهی پرتو با هدف حداکثرسازی نرخ مجموع وزن‌دهی شده (WSR) با محدودیت حداکثر توان RRHها و ظرفیت خطوط روبنا و ظرفیت محاسباتی منابع استخر BBU ارائه می‌شود. به دلیل NP-hard بودن مسئله اصلی، سه زیرمسئله برای حل آن پیشنهاد می‌شود. ابتدا مسئله طراحی بردار شکل‌دهی پرتو برای بیشینه‌سازی WSR و محدودیت توان RRHها و سپس مسئله تخصیص پویای منابع محاسباتی و درنهایت، اعمال محدودیت ظرفیت خطوط روبنا با هدف کمترین تأثیر بر WSR حل می‌شوند. تخصیص هم‌زمان منابع رادیویی و محاسباتی با هدف کاهش پیچیدگی محاسباتی و تعداد پایلوت مورد نیاز برای آموزش کانال با کمترین تعداد BBU صورت می‌گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** اطلاعات جزئی حالت کانال، تخصیص همکارانه منابع رادیویی و محاسباتی، رأس رادیویی راه دور، شبکه دسترسی رادیویی ابری، شبکه‌های فراچگال.

### ۱- مقدمه

تراکم نقاط دسترسی در شبکه‌های فراچگال بسیار بالاست. در UDN میانگین فاصله بین کاربران و BSهای سلولی کوچک به طور چشمگیری کاهش می‌یابد؛ از این رو، کیفیت پیوند و در نتیجه ظرفیت شبکه به طور چشمگیری بهبود می‌یابد [1]. همچنین، سلول‌های بیشتر با ابعاد کوچک‌تر باعث افزایش تداخل ناشی از سلول‌های کوچک همسایه و افزایش هزینه عملیات و مدیریت زیرساخت می‌شود؛ تا حدی که ممکن است نرخ قابل دستیابی شبکه به دلیل تداخل کاهش یابد [1]. برای کاهش تداخل، الگوریتم‌های همکاری متفاوتی مانند CoMP<sup>۲</sup> وجود دارند [3] که به علت تأخیر بالای شبکه‌های دسترسی رادیویی سنتی و پهنای باند

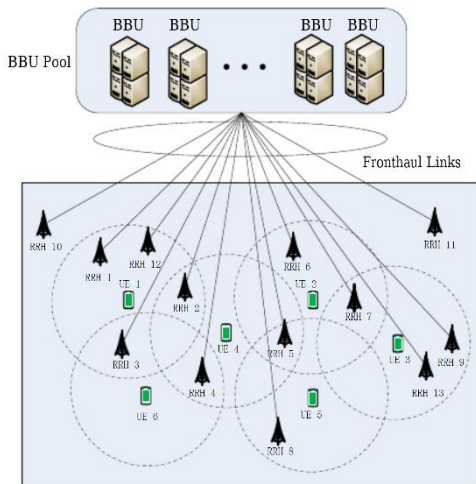
با افزایش فرکانس کار نسل‌های جدید موبایل، میزان پوشش‌دهی ایستگاه‌های پایه کاهش می‌یابد که به دنبال آن تعداد سلول‌ها و ایستگاه‌های پایه مورد نیاز افزایش می‌یابد. بدین صورت شبکه‌های فراچگال (UDN)<sup>۱</sup> معرفی شدند.

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱

نام نویسنده مسئول: نغمه سادات مؤیدیان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - ۸۴۱۵۶-۸۳۱۱۱ - دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر



شکل (۱): یک C-RAN با خوشه‌بندی کاربر محور [6]

در TDD-CRAN<sup>۸</sup> برای تخمین کانال، دنباله‌های پایلوت آموزشی متعامد به کاربران متفاوت یک RRH تخصیص داده می‌شود تا RRH بتواند بردار کانال هر کاربر را تشخیص دهد؛ بنابراین، تعداد پایلوت‌های مورد نیاز به طور خطی با تعداد کاربران متناسب است؛ این تعداد برای C-RANهای فراچگال غیرمطلوب خواهد بود. یک راه‌حل استفاده مجدد از پایلوت هاست؛ به طوری که هیچ‌یک از کاربران از پایلوت و RRH یکسانی استفاده نکنند [10]. همچنین، طرح استفاده مجدد از پایلوت باعث آلودگی پایلوت و در نتیجه خطای تخمین کانال قابل ملاحظه‌ای می‌شود [8].

به دلیل ارتباطات گسترده کاربران و تأخیر ناشی از آن و الزامات تأخیر مورد نیاز، چالش‌های جدیدی در تأمین نیازهای محاسباتی به وجود می‌آید. در [11] از حداکثر تعداد کاربران پشتیبانی شده توسط هر واحد BBU برای تعیین ظرفیت پردازش محدود استخر BBU استفاده می‌شود. بیشتر روش‌های تخصیص منابع C-RAN، منابع را در هر زمان تخصیص می‌دهد و مزایای BBU مرکزی، مانند مدیریت مرکزی اشغال منابع توسط RRHها و بار ترافیکی کل شبکه را به طور کامل در نظر نمی‌گیرند [8].

با توجه به منظور نکردن ظرفیت منابع محاسباتی و ظرفیت خطوط روبنا در تخصیص نرخ ارسالی به کاربران در کارهای پیشین، در این مقاله مسئله طراحی توأم بردارهای شکل‌دهی پرتو با هدف حداکثرسازی نرخ مجموع

کم به بیشینه بهره خود نمی‌رسد [4]. چالش اصلی CoMP وابستگی عملکرد آن به کیفیت اطلاعات حالت کانال (CSI) و همزمان‌سازی دقیق است. امروزه می‌توان از پردازنده‌های چند هسته‌ای بسیار قدرتمند و رایانش ابری بهره جست. در راه‌حل شبکه دسترسی رادیویی ابری (C-RAN)، واحد عملیات رادیویی در رأس‌های رادیویی راه دور (RRH) و واحد عملیات دیجیتال در استخر واحدهای باند پایه (BBU) به طور جدا انجام می‌شوند. در این معماری، سیگنال‌های رادیویی توسط RRHها از آنتن‌های توزیع شده در منطقه، جمع‌آوری و از طریق خطوط پرسرعت روبنا<sup>۷</sup> به محل ابر برای انجام محاسبات و پردازش منتقل می‌شوند. این جداسازی، افزایش بهره‌وری طیف و اشتراک زیرساخت در C-RAN را تسهیل می‌کند و موجب کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی می‌شود. وجود تمام اطلاعات شبکه به شکل متمرکز در استخر BBU، تخصیص پویای منابع رادیویی و محاسباتی را با اطلاع از وضعیت کلی شبکه و تقاضای ترافیک موجود ممکن می‌کند و می‌تواند عملکرد شبکه را بهبود بخشد [3].

در روش CSI، CoMP کامل باید در استخر BBU موجود باشد که برای C-RAN فراچگال، سربار بالایی برای تخمین کامل کانال دارد [5]. برای کاهش سربار، از CSI جزئی با بهره‌گیری از روش‌های خوشه‌بندی و همکاری رادیویی استفاده می‌شود که در آن فقط CSI خطوط RRHهای سرویس‌دهنده به هر کاربر محاسبه می‌شود (به عنوان CSI درون خوشه‌ای) و برای RRHهای بیرون از خوشه آن کاربر، CSI برابر صفر در نظر گرفته می‌شود یا فقط تلفات مسیر و اثر سایه منظور می‌شود (به نام CSI بیرون خوشه‌ای) و به استخر BBU فرستاده می‌شود؛ بنابراین، نرخ تخصیص داده شده به کاربران باید در نظر گرفتن خطای تخمین کانال در حالت CSI جزئی محاسبه شود [6][7][8].

یک راه مدیریت RRHها خوشه‌بندی کاربر محور است که هر کاربر بنا بر بهره کانال کاربر و بارگیری RRHها مشخص می‌کند کدام RRHها برایش داده ارسال کنند [6][9].

دارد؛ بنابراین، آرایش خوشه‌ها ثابت فرض می‌شود. مجموعه RRH‌های سرویس‌دهنده به کاربر  $k$  با  $J_k \subseteq J$  و کاربران سرویس‌گیرنده از RRH  $i$  با  $U_i \subseteq U$  نشان داده می‌شود. خوشه‌های RRH مربوط به کاربران می‌توانند با یکدیگر همپوشانی داشته باشند؛ به بیان دیگر، هر RRH هم‌زمان می‌تواند به چندین کاربر سرویس دهد. بردار کانال و بردار شکل‌دهی پرتو از RRH  $i$  به کاربر  $k$  به ترتیب با  $h_{i,k} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  و  $w_{i,k} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  نشان داده شده است.

RRH‌های درون خوشه هر کاربر به‌طور هماهنگ سیگنال یکسانی را به آن کاربر ارسال می‌کنند. سمبل اطلاعات کاربر  $k$  است و سیگنال باند پایه دریافتی توسط کاربر  $k$  برابر است با

$$y_k = \sum_{i \in J_k} h_{i,k}^H w_{i,k} s_k + \sum_{\substack{i=k \\ i \in U}} \sum_{i \in J_i} h_{i,k}^H w_{i,i} s_i + z_k \quad (1)$$

که  $z_k$  نویز سفید گوسی مختلط جمع‌شونده (AWGN) با توزیع  $\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$  است. فرض می‌شود برای هر کاربر  $k$   $\mathbb{E}\{s_k\} = 0$  و  $\mathbb{E}\{|s_k|^2\} = 1$  است و جریان‌های داده کاربران متفاوت مستقل از یکدیگر هستند.

## ۱-۲- تخمین CSI درون خوشه‌ای

در شبکه‌های C-RAN فراچگال با وجود تعداد زیاد RRH‌ها و کاربران و تعداد منابع آموزشی محدود، دسترسی به CSI کل شبکه در استخر BBU غیرممکن است؛ بنابراین، استخر BBU برای هر کاربر فقط CSI مربوط به RRH‌های درون خوشه‌ای آن کاربر را تخمین می‌زند و برای RRH‌های بیرون از خوشه هر کاربر فقط از بهره کانال بزرگ‌مقیاس  $\{\alpha_{i,k}, \forall k \in U, i \in J/J_k\}$  آگاه است. به‌علت سرعت تغییرات پایین بهره کانال بزرگ‌مقیاس و امکان ردیابی دقیق آن، پیاده‌سازی این روش برای C-RAN‌های فراچگال امکان‌پذیر است.

در این مقاله کانال با محوشدگی تخت با فاصله هم‌دوسی  $T$  شیار زمانی در نظر گرفته شده‌اند.  $\tau$  شیار زمانی برای تخمین کانال و  $T - \tau$  شیار زمانی باقی‌مانده برای انتقال داده استفاده می‌شود.

وزن‌دهی شده (WSR) تحت محدودیت‌های حداکثر توان RRH‌ها و ظرفیت خطوط روبنا و ظرفیت محاسباتی منابع استخر BBU نوشته شده است. در ادامه، الگوریتمی ابتکاری برای حل مسئله تخصیص هم‌زمان منابع رادیویی و محاسباتی با هدف کاهش پیچیدگی محاسباتی و کاهش تعداد پایلوت مورد نیاز برای آموزش کانال، کاهش تعداد BBU مورد نیاز در C-RAN فراچگال با استفاده از CSI جزئی و خوشه‌بندی کاربرمحور RRH‌ها در سه قدم پیشنهاد شده است: در قدم اول، مسئله حداکثر کردن مجموع نرخ وزن‌دهی شده تحت محدودیت حداکثر توان ارسال رادیویی توسط روش حداقل مربع میانگین خطای وزن‌دهی شده حل می‌شود. در قدم دوم، با استفاده از یک الگوریتم حریصانه پیشنهادی برای مسئله کوله‌پشتی، تخصیص منابع محاسباتی به کاربران صورت می‌گیرد و در قدم سوم، محدودیت حداکثر ظرفیت روبنا توسط یک الگوریتم پیشنهادی اعمال می‌شود.

در ادامه این مقاله، در بخش دوم، مدل سیستم ارتباطی در C-RAN بیان شده است. در بخش سوم، مسئله تخصیص منابع حل می‌شود. در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌شوند و در نهایت، در بخش پنجم نتیجه‌گیری انجام گرفته است.

## ۲- مدل‌سازی سیستم

در این مقاله ارتباط فرسود در یک شبکه TDD C-RAN فراچگال بررسی می‌شود. طبق شکل (۱)، این شبکه  $L$  RRH و  $K$  کاربر دارد که طبق تعریف C-RAN‌های فراچگال،  $L > K$  است. فرض می‌شود هر RRH  $M$  آنتن فرستنده دارد و هر کاربر فقط یک آنتن گیرنده دارد.  $J = \{1, 2, \dots, L\}$  مجموعه RRH‌ها و  $U = \{1, 2, \dots, K\}$  مجموعه کاربران است. هر RRH توسط خطوط روبنا به استخر BBU متصل است.

با فرض ثابت بودن کاربران، برای کاهش پیچیدگی محاسباتی، خوشه‌های کاربرمحور تشکیل می‌شوند. معیار تعیین خوشه RRH‌های سرویس‌دهنده به هر کاربر، اطلاعات حالت کانال مانند محوشدگی بزرگ‌مقیاس یا همان افت مسیر ناشی از مسافت است که سرعت تغییرات کمی

### ۱-۱-۲- تخصیص پایلوت به کاربران

به یکدیگر متصل هستند؛ بنابراین، یک مسئله رنگ‌آمیزی گراف با کمترین رنگ داریم که هر رنگ معادل یک پایلوت است. شرط C2 نیز می‌خواهد مقدار استفاده از هر رنگ محدود باشد. بدین منظور می‌توان از الگوریتم Dsaturation تئوری رنگ‌آمیزی گراف استفاده کرد [8]:

بدین منظور، ابتدا کاربران براساس تعداد همسایه‌هایشان به ترتیب نزولی صف می‌شوند. به اولین کاربر، یک پایلوت اختصاص داده و از صف کاربران خارج می‌شود. در هر قدم: (۱) پایلوت‌های استفاده‌شده براساس دفعات استفاده به ترتیب صعودی مرتب می‌شوند. (۲) به اولین کاربر صف کاربران، اولین پایلوت موجود در صف پایلوت‌ها اختصاص داده می‌شود. (۳) اگر پایلوت مدنظر با پایلوت اختصاص داده شده به هریک از همسایه‌های کاربر برابر بود، پایلوت بعدی، بررسی و این مرحله تکرار می‌شود تا شرط C1 برقرار شود. (۴) اگر پایلوت‌های صف به اتمام رسید از یک پایلوت جدید استفاده می‌شود. (۵) اگر تعداد استفاده از پایلوت به حد مجاز رسید از صف پایلوت‌ها خارج می‌شود.

### ۲-۱-۲- تخمین کانال

برای تخمین کانال در طول فاز آموزش کانال، هر کاربر یک پایلوت به RRH‌های درون خوشه‌ای می‌فرستد. سیگنال پایلوت دریافتی در RRH  $i$ ام برابر است با

$$Y_i = \sum_{k \in \mathcal{U}} \sqrt{p_t} h_{ik} q_{\pi_k}^H + N_i \quad (2)$$

که  $p_t$  توان ارسالی پایلوت هر کاربر است و  $N_i \in \mathcal{C}^{M \times T}$  ماتریس نویز گوسی با اعضای مستقل و توزیع  $\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$  است. اگر مجموعه کاربرانی که از پایلوت  $\pi_k$  (پایلوت مربوط به کاربر  $k$ ) استفاده می‌کنند را با  $\mathcal{K}_{\pi_k}$  نشان دهیم، استخر BBU با استفاده از تخمین کمترین میانگین مربع خطا (MMSE) کانال تخمینی بین کاربر  $k$  و RRH  $i$ ام را به صورت زیر به دست می‌آورد [6]:

$$\hat{h}_{i,k} = \frac{\alpha_{i,k}}{\sum_{l \in \mathcal{K}_{\pi_k}} \alpha_{i,l} + \hat{\sigma}^2} \frac{1}{\sqrt{p_t}} Y_i q_{\pi_k} \quad (3)$$

که  $\hat{\sigma}^2 = \sigma^2/p_t$  است. براساس ویژگی تخمین MMSE،  $\tilde{h}_{i,k} = h_{i,k} - \hat{h}_{i,k}$  خطای تخمین کانال مستقل

در سیستم‌های مخابراتی TDD برای جلوگیری از تداخل و شناسایی دقیق کاربران، به کاربران سرویس‌گیرنده از یک RRH دنباله‌های پایلوت متعامد متفاوتی تخصیص داده می‌شوند و از شیارهای زمانی متفاوتی برای آموزش و تخمین کانال استفاده می‌شود؛ بنابراین، تعداد دنباله پایلوت متعامد در دسترس حداکثر برابر  $T$  است [12]. در طرح تخصیص پایلوت متعامد حداکثر تعداد کاربران که به‌طور هم‌زمان می‌توان به آنها سرویس داد برابر این تعداد است؛ اما در C-RAN‌های فراچگال تعداد کاربران بسیار بیشتر از این تعداد است؛ بنابراین، برای افزایش تعداد مجاز کاربران از پایلوت‌ها استفاده مجدد می‌شود. برای این کار از تئوری رنگ‌آمیزی گراف کمک گرفته می‌شود.

برای قابل تشخیص بودن کانال‌های کاربران متفاوت از پایلوت‌های متعامد استفاده می‌کنیم. اگر تعداد پایلوت‌ها  $T$  باشد و پایلوت  $m$ ام،  $q_m$  باشد، دنباله‌های پایلوت متعامد  $Q = [q_1, \dots, q_T]$  شرط  $Q^H Q = I$  را دارند.

• اگر دنباله پایلوت اختصاص داده شده به کاربر  $k$ - $\pi_k$  باشد، باید به کاربران سرویس‌گیرنده از یک RRH دنباله‌های پایلوت متفاوتی تخصیص داده شود:

$$C1: q_{\pi_k}^H q_{\pi_{k'}} = 0, \forall k, k' \in \mathcal{U}_i, k \neq k', \forall i \in \mathcal{J}$$

برای جلوگیری از استفاده یک پایلوت به دفعات زیاد و استفاده نکردن از پایلوت‌های دیگر و همچنین تخصیص متوازن پایلوت‌ها و کنترل میزان خطای تخمین، تعداد دفعات استفاده مجدد پایلوت  $q_m$  باید کمتر از یک مقدار از قبل تعیین شده  $n_{max}$  باشد:

$$C2: n_{q_m} \leq n_{max}, \forall q_m \in Q$$

هدف ما یافتن کمترین تعداد پایلوت مورد نیاز با در نظر گرفتن محدودیت‌های گفته‌شده است. برای حل این مسئله شرط C1 را می‌توان با یک ماتریس باینری همسایگی  $B$  برای تمام کاربران نشان داد. اگر دو کاربر  $k$  و  $k'$  حداقل یک RRH مشترک داشته باشند، این دو کاربر همسایه هستند. براساس این، یک گراف بدون جهت از کاربران تشکیل می‌شود که در آن کاربران همسایه با یک یال

به علت عوامل غیرقطعی زیاد ذکر شده، به دست آوردن عبارت فرم دقیق و بسته نرخ داده هر کاربر بسیار مشکل است؛ به همین علت با استفاده از معادله جنسن از یک کران پایین برای SINR مؤثر استفاده می‌شود. یک کران پایین چسبیده برای نرخ داده کاربر  $k$  به صورت زیر است [8]:

$$\tilde{\eta}_k = \frac{T - \tau}{T} \times \log_2 \left( 1 + \frac{|\hat{g}_{k,k}^H w_k|^2}{w_k^H E_{k,k} w_k + \sum_{l \in \mathcal{U}, l \neq k} w_l^H A_{l,k} w_l + \sigma^2} \right) \quad (V)$$

که در آن،  $A_{l,k} = E\{g_{l,k}^H g_{l,k}\}$  و  $E_{k,k} = \text{blkdiag}\{\beta_{i,k} I_{M \times M}, i \in \mathcal{J}_k\}$  هستند.

### ۲-۲-۲- محدودیت منابع رادیویی روبنا

مجموع نرخ ارسال برای کاربرانی که از RRH  $i$ م سرویس می‌گیرند از حداکثر ظرفیت روبنا از استخر BBU به RRH  $i$ م،  $C_{F,i,\max}$ ، کمتر است:

$$\sum_{k \in \mathcal{U}_i} \varepsilon(|w_{i,k}|) \eta_k \leq C_{F,i,\max} \quad \forall i \in \mathcal{J} \quad (A)$$

که  $|\cdot|$  تابع اندازه و  $\varepsilon(x)$  تابع مشخصه است. اگر  $x \neq 0$  باشد،  $\varepsilon(x) = 1$  است؛ اگر نه  $\varepsilon(x) = 0$  است.

### ۲-۲-۳- محدودیت منابع محاسباتی

در بسیاری از کارها برای سادگی ظرفیت منابع محاسباتی براساس تعداد کاربران سرویس داده شده با استخر BBU سنجیده می‌شود [11]. براساس نتایج کارهای [13][14][15] مصرف منابع محاسباتی متناسب با ترافیک است و تابعی از نرخ کاربران سرویس داده شده است. در این مقاله منابع محاسباتی مورد نیاز در استخر BBU برای پشتیبانی از انتقال همکارانه برای همه کاربران شامل دو بخش اصلی است [16]:

۱- میزان منابع محاسباتی مورد نیاز برای پردازش باند پایه سیگنال مربوط به کاربر  $k$  نسبت خطی با نرخ داده ارسالی دارد.

از تخمین کانال  $\hat{h}_{i,k}$  و دارای توزیع  $\mathcal{CN}(0, \beta_{i,k} I)$  با  $\beta_{i,k} = \frac{\alpha_{i,k} (\sum_{l \in \mathcal{U}, l \neq k} \alpha_{l,i} + \sigma^2)}{\sum_{l \in \mathcal{U}, l \neq k} \alpha_{l,i} + \sigma^2}$  است.

### ۲-۲- فرمول‌بندی مسئله

هدف ما بیشینه‌سازی مجموع نرخ وزن‌دهی شده کاربران از طریق طراحی بردارهای شکل‌دهی پرتو است.

#### ۲-۲-۱- نرخ داده هر کاربر

برای هر کاربر  $k$ ،  $w_k = [w_{i,k}^H, \forall i \in \mathcal{J}_k]^H$  بردار شکل‌دهی پرتوی RRH‌های درون خوشه‌ای آن است. همچنین،  $g_{i,k} = [h_{i,k}^H, \forall i \in \mathcal{J}_i]^H$  CSI کامل تمام RRH‌های درون خوشه کاربر  $k$ ام به سمت کاربر  $k$ ام و  $\tilde{g}_{i,k}$  نیز به ترتیب خطای تخمین CSI و CSI تخمینی از تمام RRH‌های درون خوشه‌ای کاربر  $k$ ام به سمت کاربر  $k$ ام است.  $(\hat{g}_{i,k}, \tilde{g}_{i,k}, g_{i,k}, w_k \in \mathbb{C}^{M|J_i| \times 1})$  با توجه به اینکه  $\tilde{g}_{i,k} = g_{i,k} - \hat{g}_{i,k}$ ، رابطه (۱) برابر است با:

$$y_k = \underbrace{\hat{g}_{k,k}^H w_k s_k}_{\text{سیگنال مطلوب تخمینی}} + \underbrace{\tilde{g}_{k,k}^H w_k s_k}_{\text{خطای تخمین}} + \sum_{l \in \mathcal{U}, l \neq k} g_{l,k}^H w_l s_l + z_k, \quad \forall k \in \mathcal{U} \quad (E)$$

تداخل ناشی از دیگر کاربران

سیس SINR مؤثر و نرخ داده قابل دستیابی برای هر کاربر  $k$  با در نظر گرفتن جزئی و خطای تخمین محاسبه می‌شود که در آن خطای تخمین همچون نویز سفید در نظر گرفته می‌شود:

$$\eta_k = \frac{T - \tau}{T} \mathbb{E}\{\log_2(1 + \eta_k)\}, \quad \forall k \in \mathcal{U} \quad (5)$$

که در آن، میانگین روی تمام عوامل غیرقطعی همچون خطاهای تخمین کانال و CSI کوچک مقیاس برون خوشه‌ای است و

$$\eta_k = \frac{|\hat{g}_{k,k}^H w_k|^2}{|\tilde{g}_{k,k}^H w_k|^2 + \sum_{l \in \mathcal{U}, l \neq k} |g_{l,k}^H w_l|^2 + \sigma^2} \quad (6)$$

تخصیص توأمان منابع رادیویی و محاسباتی در شبکه دسترسی رادیویی ابری

$$\begin{aligned} \sum_{k \in \mathcal{U}} t_{m,k} \bar{L}_k &\leq b_m C_{B_m, \max}, \quad \forall m \in \mathcal{M}, \quad (d) \\ \sum_{m \in \mathcal{M}} t_{m,k} &= 1, \quad \forall k \in \mathcal{U}, \quad (e) \\ t_{m,k} &\leq b_m, \quad \forall m \in \mathcal{M}, \forall k \in \mathcal{U}, \quad (f) \\ t_{m,k}, b_m &\in \{0,1\}, \quad \forall k \in \mathcal{U}, \forall m \in \mathcal{M}, \quad (g) \end{aligned}$$

شرط  $b$  محدودیت توان ارسالی هر RRH است و  $P_{i, \max}$  حداکثر توان RRH  $i$ ام است. شرط  $c$  بیان می‌کند مجموع نرخ عبوری از RRH  $i$ ام در روبنا نباید از حداکثر ظرفیت روبنا بیشتر باشد. در شرط  $d$  مصرف منابع محاسباتی اختصاص داده شده به BBU  $m$ ام نباید از حداکثر ظرفیت آن بیشتر باشد. در این شرط  $\bar{L}_k$  از جایگذاری  $\bar{r}_k$  به جای  $r_k$  در (9) به دست می‌آید. شرط  $e$  بیان می‌کند کاربر  $k$  حتماً توسط یک BBU سرویس داده می‌شود.

### ۳- حل مسئله تخصیص منابع رادیویی و محاسباتی در C-RAN

طراحی همکارانه شکل‌دهی پرتو و همچنین تخصیص پویای منابع محاسباتی یک مسئله JLP، NP-hard و غیرمحدب است. در ادامه، یک الگوریتم ساده سه مرحله‌ای برای حل این مسئله پیشنهاد می‌شود. در قدم اول مسئله طراحی بردار شکل‌دهی پرتو فقط با محدودیت توان RRHها حل می‌شود. در ادامه، مسئله تخصیص پویای منابع محاسباتی تحت محدودیت حداکثر ظرفیت محاسباتی سرورها حل می‌شود. سپس محدودیت منابع روبنا اعمال می‌شود. مسئله تخصیص منابع محاسباتی به شکلی است که تعداد BBUهای اختصاص داده شده حداقل شود.

#### ۳-۱- مسئله همکاری رادیویی

در مرحله نخست، تنها محدودیت مربوط به توان ارسالی RRHها در مسئله طراحی همکارانه بردار شکل‌دهی پرتوی فروسو برای هر RRH با هدف بیشینه‌سازی WSR اعمال می‌شود و محدودیت ظرفیت خطوط روبنا و منابع محاسباتی از مسئله حذف می‌شود:

۲- برای محاسبه بردارهای شکل‌دهی پرتو، میزان منبع محاسباتی مورد نیاز متناسب با تعداد بردارهای شکل‌دهی پرتو است.

بنابراین، مجموع میزان مصرف منابع محاسباتی برای هر کاربر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$L_k = \theta r_k + \omega \sum_{i=1}^L \varepsilon(|w_{i,k}|) + L_B \quad (9)$$

که  $L_B$  یک مقدار ثابت مربوط به محاسبات FFT است.  $\theta$  و  $\omega$  پارامترهای تجربی مثبت هستند. بنابراین، اگر  $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, B\}$  مجموعه BBUها در استخر و کاربران سرویس‌گیرنده از  $m$ مین BBU با  $UB_m \subseteq \mathcal{U}$  نشان داده شوند، محدودیت ظرفیت  $m$ مین BBU به صورت زیر است:

$$\sum_{k \in UB_m} L_k \leq C_{B_m, \max}, \quad \forall m \in \mathcal{M}, \quad (10)$$

که  $C_{B_m, \max}$  حداکثر ظرفیت محاسباتی  $m$ مین BBU است.

#### ۳-۲- مسئله اصلی تخصیص منابع رادیویی و محاسباتی

مسئله بیشینه‌سازی مجموع نرخ وزن‌دهی شده با جایگزینی نرخ دقیق داده کاربران با کران پایین آن،  $\bar{r}_k$  و ترجیحاً استفاده از حداقل تعداد BBUها است.  $\mathbf{W}$  ماتریس متناظر با مجموعه بردارهای شکل‌دهی پرتو و  $\mu_k$  وزن اولویت کاربر  $k$ ام است. ماتریس باینری  $\mathbf{T}$  ارتباط بین کاربر و استخر BBU است؛ اگر منابع محاسباتی کاربر  $k$  توسط  $m$ مین BBU تأمین شود،  $t_{m,k} = 1$  است. اگر BBU  $m$ ام فعال باشد، درایه  $m$ ام بردار باینری  $\mathbf{b}$  برابر یک است. مسئله طراحی بردار شکل‌دهی پرتو به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{W}, \mathbf{T}, \mathbf{b}} \sum_{k \in \mathcal{U}} \mu_k \bar{r}_k & \quad (a) \\ \text{s.t.} \sum_{k \in \mathcal{U}_i} \|w_{i,k}\|^2 &\leq P_{i, \max}, \quad \forall i \in \mathcal{J}, \quad (b) \\ \sum_{k \in \mathcal{U}_i} u(|w_{i,k}|) \bar{r}_k &\leq C_{F_i, \max}, \quad \forall i \in \mathcal{J}, \quad (c) \end{aligned}$$



$$\sum_{m \in \mathcal{M}} t_{m,k} = 1, \quad \forall k \in \mathcal{U}, \quad (c)$$

$$t_{m,k}, b_m \in \{0,1\}, \forall k \in \mathcal{U}, \forall m \in \mathcal{M} \quad (d)$$

$$\max_W \sum_{k \in \mathcal{U}} \mu_k \bar{r}_k, \quad (a(12))$$

$$\sum_{k \in \mathcal{U}_i} \|w_{i,k}\|^2 \leq P_{i,max} \quad \forall i \in \mathcal{J} \quad (b)$$

که معادل یک مسئله کوله‌پشتی چندگانه است و پیچیدگی NP-complete دارد [18]; بنابراین، جواب مسئله در یک زمان چندجمله‌ای به دست نمی‌آید و به علت زمان محاسبه و الزامات حافظه غیرعملی است. برای حل این مسئله یک الگوریتم حریصانه پیشنهاد می‌شود. هرگاه مسئله CCRA با نرخ به دست آمده از حل مسئله CBD نشدنی باشد، نرخ کاربران توسط الگوریتم کاهش نرخ هوشمند پیشنهادی (SRR) به طور مطلوبی کاهش می‌یابد تا مسئله امکان‌پذیر شود.

### ۱-۲-۳- حل مسئله CCRA به صورت حریصانه

ابتدا BBUها براساس ظرفیت محاسباتی به ترتیب نزولی صف می‌شوند. با فرض  $\bar{W}$  و  $\bar{r}$  به دست آمده از مرحله قبل میزان منابع محاسباتی مورد نیاز کاربران،  $\bar{L}_k$  از رابطه (۹)، محاسبه می‌شود. کاربران براساس  $\bar{L}_k$  به ترتیب نزولی مرتب می‌شوند. در هر قدم نیازهای محاسباتی از بزرگ به کوچک سرویس داده می‌شوند. در قدم اول BBU با بیشترین ظرفیت فعال می‌شود و بزرگ‌ترین نیاز محاسباتی توسط آن سرویس داده و از صف BBUهای غیرفعال خارج می‌شود. در هر قدم BBU فعال با بزرگ‌ترین میزان منبع محاسباتی استفاده نشده مشخص می‌شود و آن را با  $BBU_p$  و میزان ظرفیت محاسباتی استفاده نشده آن را با  $C_p$  نشان می‌دهیم:

$$p = \operatorname{argmax}_m \left( b_m \left( C_{B_m,max} - \sum_{k \in \mathcal{U}} t_{m,k} \bar{L}_k \right) \right) \quad (14)$$

اگر میزان نیاز محاسباتی کاربر بیش از  $C_p$  بود، توسط BBU فعال نشده بعدی در صف BBU سرویس داده می‌شود و آن BBU نیز از صف خارج می‌شود. در غیر این صورت، کاربر توسط  $BBU_p$  سرویس داده می‌شود؛ اما اگر میزان نیاز محاسباتی کاربر هم بیش از  $C_p$  و هم بیش از ظرفیت محاسباتی BBU فعال نشده بعدی در صف BBU

مسئله (۱۲)، مسئله طراحی همکارانه بردار شکل دهی پرتو (CBD) از طریق دو الگوریتم OPA و WMMSE حل می‌شود که در میزان عملکرد و پیچیدگی متفاوت‌اند. برای حل مسئله CBD، از یک الگوریتم تکرارشونده براساس الگوریتم WMMSE تغییر یافته [6] استفاده می‌کنیم. این الگوریتم با پیچیدگی بسیار کمتر نتایج نزدیک به الگوریتم بهینه سراسری OPA دارد.

الگوریتم WMMSE تغییر یافته، CSI جزئی را در نظر می‌گیرد که هر کاربر اثرات خطای تخمین و تداخل ناشی از خوشه‌بندی و نداشتن تمام CSIها را متحمل می‌شود. این مسئله با استفاده از CVX [17] حل می‌شود. استفاده از CVX برای برنامه‌نویسی‌های عملی در DSP یا FPGA مناسب نیست؛ بنابراین، از روش تجزیه دوگان لاگرانژ برای پیاده‌سازی می‌توان استفاده کرد [6].

در ادامه، محدودیت منابع محاسباتی و محدودیت ظرفیت روبنا بر مسئله CBD اعمال می‌شود تا حل مسئله نهایی به دست آید. کاهش نرخ کاربران در این مرحله موجب کاهش مصرف پهنای باند خطوط روبنا می‌شود؛ بنابراین، ابتدا مسئله تخصیص منابع محاسباتی، بررسی و سپس محدودیت منابع روبنا اعمال می‌شود.

### ۲-۳- تخصیص منابع محاسباتی

هدف اصلی مسئله تخصیص همکارانه منابع محاسباتی (CCRA) کمینه‌سازی تعداد BBUهای فعال براساس بیشترین میزان نرخ کاربران در پاسخ مسئله CBD قسمت قبل است. با ثابت در نظر گرفتن خوشه‌بندی RRHها برای کاربران در مسئله (۱۱) و همچنین، با مقداردهی اولیه بردار  $\bar{r}$  و  $\bar{W}$  براساس حل مسئله CBD در قسمت قبل، مسئله CCRA به صورت زیر خواهد بود:

$$\min_{T,b} \sum_{m \in \mathcal{M}} b_m, \quad (a(13))$$

$$\sum_{k \in \mathcal{U}} t_{m,k} \bar{L}_k \leq b_m C_{B_m,max}, \forall m \in \mathcal{M}, \quad (b)$$



• اگر  $c_{i_0}$  بیشتر از  $C_{F_{i,max}}$  و  $L_0$  بیشتر از  $B_{rem}^{max}$  بود،  $w_{i,k}$  برابر صفر می‌شود.

• اگر  $L_0$  کمتر از  $B_{rem}^{max}$  و  $c_{i_0}$  بیشتر از  $C_{F_{i,max}}$  بود،  $w_{i,k}$  با روش دویخیسی<sup>۱۴</sup> آنقدر کاهش می‌یابد که بار محاسباتی کاربر  $k$  برابر  $B_{rem}^{max}$  شود و الگوریتم SRR برای کاربر بررسی شده خاتمه می‌یابد.

• اگر  $L_0$  بیشتر از  $B_{rem}^{max}$  و  $c_{i_0}$  کمتر از  $C_{F_{i,max}}$  بود،  $w_{i,k}$  آنقدر کاهش می‌یابد که میزان ترافیک RRH  $i$ م برابر  $C_{F_{i,max}}$  شود.

• اگر  $c_{i_0}$  کمتر از  $C_{F_{i,max}}$  و  $L_0$  کمتر از  $B_{rem}^{max}$  بود، نرخ کاربر به‌زای بار محاسباتی  $B_{rem}^{max}$  برابر  $\tilde{r}_k$  و نرخ کاربر به‌زای برقراری  $C_{F_{i,max}}$  برابر  $\tilde{r}_k$  محاسبه می‌شود.

○ اگر  $\tilde{r}_k$  کمتر از  $\tilde{r}_k$  بود،  $w_{i,k}$  آنقدر کاهش می‌یابد که ترافیک RRH  $i$ م برابر  $C_{F_{i,max}}$  شود.

○ اگر  $\tilde{r}_k$  بیش از  $\tilde{r}_k$  بود،  $w_{i,k}$  آنقدر کاهش می‌یابد که بار محاسباتی کاربر  $k$  برابر  $B_{rem}^{max}$  شود و الگوریتم SRR برای کاربر بررسی شده خاتمه می‌یابد.

اگر همچنان بار محاسباتی کاربر  $k$  قابل سرویس‌دهی نبود، در قدم دوم کاهش  $w_{i,k}$  روی تمام پیوندهای دسترسی اعمال می‌شود. همه خطوط دسترسی کاربر  $k$  براساس معیار  $\delta_{ik}$  به ترتیب صعودی مرتب می‌شوند و کاهش وزن مانند قدم اول به ترتیب بر آنها اعمال می‌شود؛ با این تفاوت که شرط محدودیت ظرفیت روبنا برای آنها در این قدم بررسی نمی‌شود.

با کاهش  $w_{i,k}$  نرخ کاربر متصل به آن کاهش می‌یابد؛ اما به‌علت کاهش تداخل ناشی از این پیوند، نرخ کاربران دیگر و در نتیجه نرخ عبوری از دیگر RRHها افزایش می‌یابد. معمولاً این افزایش نرخ ناچیز است؛ اما زمان‌هایی نیز اثر کاهش تداخل غیرقابل چشم‌پوشی است. پس در انتهای هر تکرار نرخ کاربران و همچنین، ترافیک هر RRH و بار محاسباتی کاربران به‌روزرسانی می‌شود.

### ۳-۳- اعمال محدودیت ظرفیت خطوط روبنا

در این مرحله محدودیت ظرفیت خطوط روبنا بر بردارهای شکل‌دهی پرتوی به‌دست‌آمده از مراحل قبل،  $\bar{w}$  اعمال می‌شود. این امر می‌تواند توسط یک الگوریتم

بود، باید کاهش نرخ به قدری صورت گیرد تا کاربر بتواند توسط یکی از این دو BBU سرویس داده شود که ظرفیت باقی‌مانده بیشتری ( $B_{rem}^{max}$ ) دارند.

### ۲-۲-۳- الگوریتم کاهش نرخ هوشمند (SRR)

اگر الگوریتم CCRA با بن‌بست مواجه شود، کاهش نرخ کاربران به‌صورت هوشمندانه‌ای صورت می‌گیرد؛ به‌طوری‌که نخست، کمترین تأثیر را بر تابع هدف WSR در پی داشته باشد. دوم، تا حد امکان نرخ ارسال در خطوط روبنایی با ترافیک بیشتر از ظرفیتشان کاهش یابد.

در هر قدم چند پیوند دسترسی نامزد کاهش وزن هستند. ابتدا کاهش وزن روی پیوند دسترسی اعمال می‌شود که نسبت به بقیه پیوندهای دسترسی اثر کمتری بر تابع هدف WSR دارد. برای تعیین ارزش خطوط دسترسی معیار زیر پیشنهاد می‌شود؛ این معیار ترکیب SINR حاصل از پیوند دسترسی RRH  $i$ م نسبت به کل SINR کاربر  $k$  [19] و با در نظر گرفتن اولویت کاربران [9] است. به بیان دیگر، این معیار نشان‌دهنده کیفیت مشارکت پیوند دسترسی از RRH  $i$ م به کاربر  $k$ م در تابع هدف WSR است:

$$\delta_{ik} = \left( \frac{|h_{ik}^* w_{ik}|^2}{w_{ik}^* \beta_{ik} I_{RRH} w_{ik} + \sum_{l \neq k, l \in u} w_{il}^* A_{il} w_l + \sigma^2} \right)^{\mu_k} \quad (15)$$

حال فرض می‌کنیم نرخ کاربر  $k$ م باید کاهش یابد. هر کاربر با چند RRH مرتبط است. در قدم نخست، کاهش نرخ کاربر  $k$  با کاهش  $w_{i,k}$  مربوط به RRHهایی اعمال می‌شود که ترافیکی بیش از محدودیت ظرفیت خط روبنای خود دارند. این RRHها براساس  $\delta_{ik}$  به ترتیب صعودی مرتب می‌شوند و کاهش  $w_{i,k}$  به ترتیب بر آنها به شکل زیر اعمال می‌شود:

فرض کنیم RRH  $i$ م کاربر  $k$ م برای کاهش وزن انتخاب شود.

• با فرض صفرشدن  $w_{i,k}$  نرخ گذرنده از RRH  $i$ م و بار محاسباتی کاربر  $k$  را به ترتیب  $c_{i_0}$  و  $L_0$  می‌نامیم.

که  $d_{ik}$  فاصله کاربر  $k$  از RRH نام به متر است [20].  
۲- محوشدگی سایه لگاریتمی نرمال ( $SF_{ik}$ ) با میانگین صفر و واریانس استاندارد 8 dB. پس بهره کانال مقیاس بزرگ ( $\alpha_{ik}$ ) شامل افت مسیر و اثر سایه برابر است با:

$$\alpha_{ik} = PL_{ik} + SF_{ik}$$

۳- محوشدگزی مقیاس کوچک رایلی ( $\bar{h}_{ik}$ ) با توزیع  $\mathcal{CN}(0, I)$ : بنابراین، بردار کانال را می توان اینگونه نوشت:  
[6]:

$$h_{ik} = \sqrt{\alpha_{ik}} \bar{h}_{ik}$$

برای ساده سازی فاکتورهای وزندهی هر کاربر یکسان در نظر گرفته می شود؛ یعنی  $\mu_k = 1, \forall k \in \mathcal{U}$ . همچنین، فرض می شود هر کاربر  $N$  تا از نزدیک ترین RRH ها به خود را برای سرویس دهی انتخاب می کند؛ یعنی  $|J_k| = N, \forall k \in \mathcal{U}$

جدول (۱): پارامترهای شبیه سازی

M=2	تعداد آنتن های فرستنده هر RRH
B=20 MHz	پهنای باند سیستم
$\sigma^2 = -174$ dBm/Hz	چگالی طیف توان نویز
$p_t = 50$ mW	توان پایلوت
$n_{max} = 3$	بیشینه دفعات استفاده هر پایلوت
$\mu_k = 1, \forall k \in \mathcal{U}$	فاکتورهای وزندهی هر کاربر
T=80	تعداد کل شیارهای زمانی
$ J_k  = N = 2$	اندازه هر خوشه کاربرمحور
K=8	تعداد کاربران
L=12	تعداد RRH ها
$CBBU_{mean} = 9$ MOPTS	میانگین مقدار ظرفیت CBBU ها
$CF_{max} = 400$ bit/s/Hz	حداکثر مقدار ظرفیت روبناها
$PRRH_{max} = 50$ mW	حداکثر مقدار توان ارسالی RRH ها

در شبکه C-RAN فراچگال ۱۲ عدد RRH و ۸ کاربر به طور تصادفی در یک محوطه مربعی به ابعاد ۴۰۰ متر قرار دارند. چگالی کاربر و چگالی RRH ها به ترتیب برابر است با  $75 \text{ RRH}/\text{Km}^2$  و  $50 \text{ user}/\text{Km}^2$  که این مقادیر برای برآورده کردن الزامات شبکه های فراچگال 5G مناسب هستند

حریصانه کاهش نرخ کاربران صورت گیرد که در هر تکرار به شکل حریصانه ای  $w_{i,k}$  خطوط دسترسی کاربران با هدف کمترین تأثیر بر تابع هدف WSR کاهش می یابد.

برای تعیین پیوند دسترسی کاربری که چنین ویژگی را داشته باشد، مانند مرحله قبل، از معیار  $\delta_{ik}$  استفاده می شود. ابتدا براساس نرخ ارسال کاربران به دست آمده از مرحله قبل،  $\bar{r}_k$  نرخ گذرنده از هر روبنا  $\bar{r}_k = \sum_{k \in \mathcal{U}_i} \bar{r}_k$  به دست می آید. سپس خطوط روبنا براساس  $c_{f_i}$  به ترتیب نزولی مرتب می شود. از بزرگترین  $c_{f_i}$  شروع می کنیم. برای هر خط روبنای نام، اگر  $c_{f_i} > C_{F_i, max}$  باشد، نرخ ارسال کاربران این RRH باید کاهش یابد. براساس معیار  $\delta_{ik}$  برای RRH نام، کاربران متصل به RRH نام به ترتیب صعودی مرتب می شوند و عملیات زیر به ترتیب برای کاربران انجام می شود:

۱- نرخ گذرنده از RRH نام را با فرض صفرشدن  $w_{i,k}$  کاربر مدنظر به دست می آوریم و آن را  $c_{i_0}$  می نامیم.  
۲- اگر  $c_{i_0}$  بیش از  $C_{F_i, max}$  بود،  $w_{i,k}$  صفر می شود.  
۳- اگر نه  $w_{i,k}$  به اندازه ای کاهش می یابد که ترافیک خط روبنای نام برابر  $C_{F_i, max}$  شود.

در این الگوریتم نیز مانند الگوریتم SRR، در انتهای هر تکرار، نرخ ارسال کاربران و میزان ترافیک هر یک از خطوط روبنا به روزرسانی می شوند؛ در نهایت، به علت کاهش نرخ کاربران هم در مرحله SRR و هم در مرحله اعمال محدودیت ظرفیت خطوط روبنا، یک بازنگری در تخصیص منابع محاسباتی انجام خواهد شد تا کمترین تعداد BBU مورد نیاز نهایی به دست آید.

#### ۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش، نتایج شبیه سازی برای ارزیابی عملکرد الگوریتم های پیشنهادی ارائه می شوند. کانال های دسترسی بین کاربران و RRH ها رایلی و بهره کانال شامل سه قسمت زیر است:

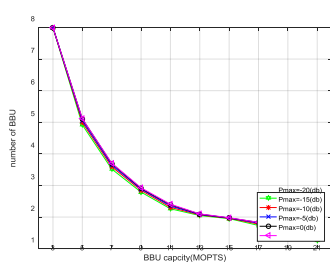
۱- افت مسیر کانال

$$PL_{ik} = 35.3 + 37.6 \log_{10}(d_{ik})$$

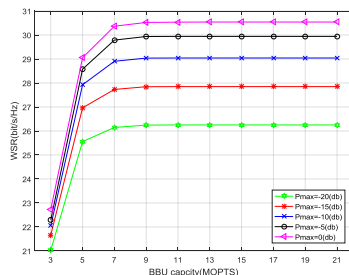
برحسب مقدار میانگین ظرفیت BBUها را نشان می‌دهد. با افزایش ظرفیت BBUها نرخ قابل دسترسی نیز افزایش می‌یابد و برای مقادیر نسبتاً بالای ظرفیت BBUها WSR ثابت می‌ماند؛ زیرا عملکرد سیستم با پارامترهای دیگر مانند توان RRH محدود می‌شود. به همین دلیل، برای سایر شبیه‌سازی‌ها  $CBBU_{mean} = 9MOPTS$  در نظر گرفته می‌شود. در قسمت (۲-ج) تعداد BBUها برحسب ظرفیت میانگین BBUهای مورد نیاز رسم شده است. با افزایش ظرفیت BBUها تعداد BBUهای مورد نیاز کاهش می‌یابد؛ زیرا با افزایش ظرفیت BBUها هر BBU می‌تواند نیاز محاسباتی کاربران بیشتری را برآورده کند. همچنین، بیشترین تعداد BBU برابر ۸ است تا هر کاربر توسط یک BBU سرویس داده شود.

[21]. ظرفیت روبناها دارای یک توزیع یکنواخت صحیح با بیشینه میزان  $CF_{max}$  و ظرفیت BBUها دارای یک توزیع نرمال صحیح با میانگین  $CBBU_{mean}$  است. پارامترهای دیگر شبیه‌سازی در جدول ۱ موجود هستند.

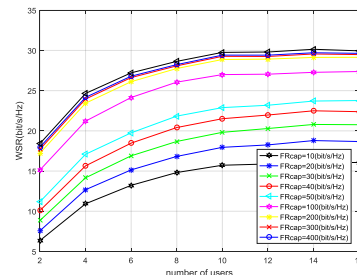
شکل (۲-الف) برای مقدار متفاوت حداکثر ظرفیت روبناها برحسب تعداد کاربران را نشان می‌دهد. با افزایش حداکثر ظرفیت روبناها عملکرد سیستم بهبود می‌یابد و در نتیجه فاصله بین نمودارها کاهش می‌یابد و به حالت ظرفیت نامحدود روبنا نزدیک می‌شود. اگر کاربران کمتر از RRHها باشند، با افزایش تعداد کاربران WSR روند افزایشی دارد. برای کاربران بیشتر از RRHها با افزایش تعداد کاربران WSR ثابت می‌ماند که به علت محدودیت ظرفیت منابع روبنا است. شکل (۲-ب) WSR



(ج)

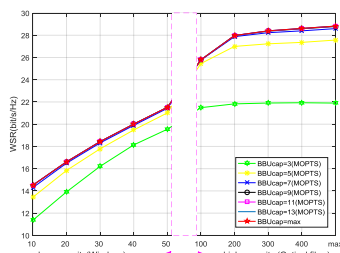


(ب)

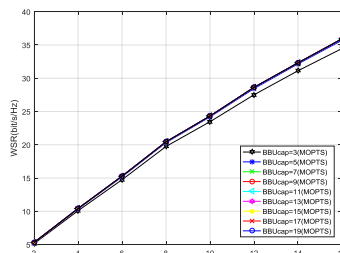


(الف)

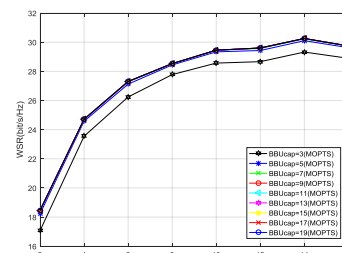
شکل (۲): الف) WSR برحسب تعداد کاربران با تغییر حداکثر ظرفیت روبناها، ب) WSR برحسب ظرفیت متوسط BBUها با تغییر توان ارسالی RRHها، ج) تعداد BBUهای مورد نیاز برحسب ظرفیت متوسط BBUها با تغییر توان ارسالی RRHها



(ج)



(ب)



(الف)

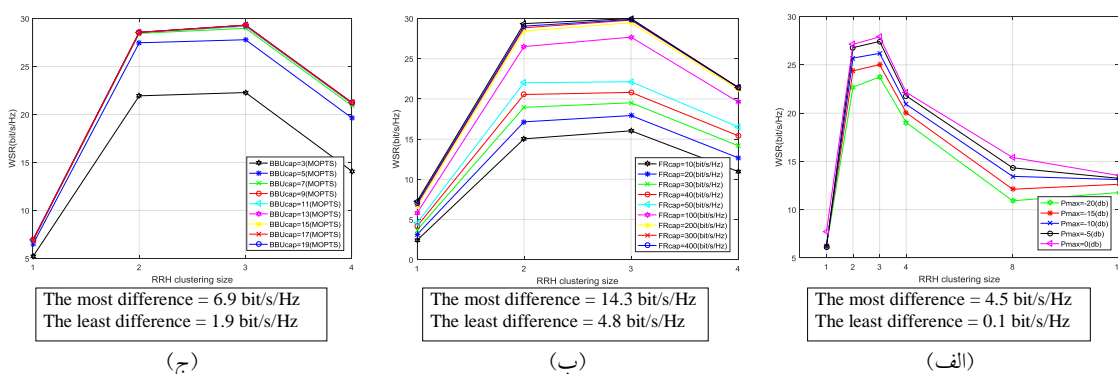
شکل (۳): WSR با تغییر ظرفیت متوسط BBUها برحسب الف) تعداد کاربران، ب) تعداد RRHها، ج) حداکثر ظرفیت روبنا در شکل (۳) WSR به ترتیب برحسب تعداد کاربران، تعداد RRHها و مقادیر متفاوت حداکثر ظرفیت روبناها به‌ازای مقادیر متفاوت میانگین ظرفیت BBUها رسم شده است. برای تمامی مقادیر کاربران و RRHها و  $CF_{max}$  با

در شکل (۳-ج) با افزایش  $CF_{max}$  مجموع نرخ وزندهی شده قابل دسترسی ابتدا افزایش می‌یابد و برای مقادیر بالای حداکثر ظرفیت روبناها WSR تقریباً ثابت است. بنابراین، برای خطوط بی‌سیم روبنا که ظرفیت بسیار کمتری نسبت به خطوط سیمی دارند، این محدودیت حتماً باید در نظر گرفته شود؛ درحالی‌که برای مقادیر بالای ظرفیت روبناها WSR تقریباً ثابت است؛ زیرا درنهایت از خطوط روبنا به اندازه حداکثر ظرفیتشان نرخ عبور خواهد کرد. پس برای خطوط روبنا با ظرفیت بالا می‌توان این محدودیت را منظور نکرد.

در شکل (۴) مجموع نرخ وزندهی شده برحسب اندازه خوشه‌بندی RRHها به ترتیب به‌ازای مقادیر متفاوت حداکثر توان ارسالی RRHها، حداکثر ظرفیت روبناها و میانگین ظرفیت BBUها نمایش داده می‌شود. در تمامی قسمت‌ها، با افزایش اندازه خوشه‌بندی WSR ابتدا روند افزایشی و سپس روند کاهشی دارد. با افزایش  $N$ ، درجه آزادی فضایی در دسترس بیشتر می‌شود، پس WSR افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش  $N$  بیشتر از ۳، برای تخصیص پایلوت، تعداد و طول دنباله پایلوت، بیشتر و طول دنباله داده کمتر می‌شود و WSR روند کاهشی پیدا می‌کند.

در شکل (۳-الف) با افزایش تعداد کاربران WSR روندی افزایشی دارد و در تعداد بالای کاربران WSR ثابت و حتی رو به کاهش است. هنگامی که تعداد کاربران کمتر از تعداد RRHها است، با افزایش تعداد کاربران به‌علت افزایش چندگانگی چندکاربره، WSR روندی افزایشی دارد؛ اما با افزایش تعداد کاربران، اندازه و تعداد دنباله‌های پایلوت، افزایش و بخش‌های زمانی باقی‌مانده برای ارسال داده کاهش می‌یابد. زمانی که تعداد کاربران بیش از تعداد RRHهاست، به‌علت افزایش میزان تداخل کاربران و کاهش اندازه دنباله داده، WSR روند افزایشی بسیار کمی دارد و حتی کاهش می‌یابد. پس گفتنی است با افزایش تعداد کاربران بیشتر از تعداد RRHها، عملکرد سیستم کاهش می‌یابد.

در شکل (۳-ب) نیز با افزایش تعداد RRHها مجموع نرخ وزندهی شده افزایش می‌یابد؛ زیرا نخست، با افزایش تعداد RRHها بهره چندگانگی فضایی افزایش می‌یابد. دوم، با افزایش تعداد RRHها کاربران کمتری از یک RRH مشترک استفاده می‌کنند؛ بنابراین، تعداد و اندازه دنباله آموزشی کانال کمتر و اندازه دنباله داده بیشتر می‌شود.



شکل (۴): WSR برحسب اندازه خوشه‌بندی با تغییر الف) حداکثر توان RRHها، ب) حداکثر ظرفیت روبنا، ج) ظرفیت متوسط

#### BBU

RRHها با استفاده از روش انتقال CoMP با همکاری یکدیگر به تمام کاربران سرویس‌دهی می‌کنند. مزایای استفاده از خوشه‌بندی کاربرمحور نسبت به دو سناریوی انتقال غیرهمکارانه و انتقال همگانی واضح است. همپوشانی خوشه‌ها به دو عامل تعداد RRHها و تعداد کاربران بستگی

سناریو با اندازه خوشه‌بندی برابر یک، همان سناریو انتقال غیرهمکارانه تک فرستنده است که هر RRH به کاربران نزدیک خود سرویس‌دهی می‌کند. سناریو با اندازه خوشه‌بندی برابر با تعداد کل RRHها ( $L = N = 12$ ) سناریو انتقال همکارانه همگانی است که در آن تمام

کانال استفاده شد که در آن تنها از اطلاعات حالت کانال درون خوشه‌ای استفاده می‌شود. همچنین، برای حل مسئله اصلی، سه زیرمسئله طراحی شدند. در مسئله اول، تنها محدودیت توان ارسال  $RRH$ ها برای طراحی همکارانه بردارهای شکل‌دهی پرتو در هر  $RRH$  با هدف بیشینه‌سازی  $WSR$  حل شد. هدف مسئله دوم، تخصیص همکارانه منابع محاسباتی و کمینه‌سازی تعداد  $BBU$ های فعال براساس نرخ ارسال کاربران به دست آمده در قسمت اول بود. در آخر، نرخ ارسال کاربران به صورت هوشمندانه‌ای برای عدم تجاوز از ظرفیت خطوط روبنا و منابع محاسباتی کاهش می‌یابد؛ به طوری که  $WSR$  کمترین کاهش را داشته باشد. نتایج شبیه‌سازی بسیار نزدیک به حالت بهینه و با پیچیدگی کم است.

## مراجع

- [1] H. ElSawy, et al., "Stochastic geometry for modeling, analysis, and design of multi-tier and cognitive cellular wireless networks: A survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 15, No.3, pp. 996-1019, 2013, <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.052213.00000>.
- [2] M. Ding, et al., "Performance impact of LoS and NLoS transmissions in dense cellular networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.15, No.3, pp. 2365-2380, 2016, <https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2503391>
- [3] J. Wu, et al., "Cloud radio access network (C-RAN): a primer", *IEEE Network*, Vol.29, No.1, pp. 35-41, 2015, <https://doi.org/10.1109/MNET.2015.7018201>
- [4] T.Q. Quek, et al., "Cloud radio access networks: Principles, technologies, and applications", Cambridge University Press, 2017, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14661309>.
- [5] G. Caire, et al., "Rethinking network MIMO: Cost of CSIT, performance analysis. and architecture comparisons", *IEEE Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, 2010, <https://doi.org/10.1109/ITA.2010.5454094>.
- [6] C. Pan, et al., "Weighted sum-rate maximization for the ultra-dense user-centric TDD C-RAN downlink relying on imperfect CSI", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.18, No.2, pp. 1182-

دارد و به چگالی آنها بستگی ندارد. در ساختار تصادفی شبکه ما، بیشینه میزان  $WSR$  برای  $N=3$  است؛ اما میزان افزایش  $WSR$  از  $N=2$  تا  $N=3$  بسیار کم است؛ در صورتی که پیچیدگی محاسباتی با افزایش اندازه خوشه‌بندی افزایش می‌یابد؛ بنابراین، در این دادوستد برای دستیابی به یک عملکرد خوب در مقابل پیچیدگی محاسباتی در تمامی شبیه‌سازی‌ها  $N=2$  است. در شکل (۴-الف) با افزایش  $WSR$ ،  $PRR_{max}$  افزایش می‌یابد. در شکل (۴-ب) نیز با افزایش  $WSR$ ،  $CF_{max}$  ابتدا افزایش می‌یابد و برای مقادیر بالای حداکثر ظرفیت روبنا  $WSR$  تقریباً ثابت است. در شکل (۴-ج) نیز با افزایش ظرفیت  $BBU$ ها نرخ قابل دسترسی افزایش می‌یابد و برای مقادیر نسبتاً بالا  $WSR$  ثابت می‌ماند.

در هیچ‌یک از مقالات بررسی شده مسئله توأمان حل نشده بود. در بیشتر کارهای موجود، ظرفیت پیوندهای روبنا نامحدود در نظر گرفته شده بودند؛ اما در C-RAN فراچگال به علت سربار آموزشی بالا و حجم داده‌ی ارسال بالا نمی‌توان چنین محدودیتی را نادیده گرفت. شکل‌های (۲) و (۳) نشان می‌دهند با اعمال محدودیت برای ظرفیت روبنا و ظرفیت پردازش، عملکرد شبکه کاهش می‌یابد؛ زیرا ممکن است با اعمال این محدودیت‌ها برخی از کاربران با  $RRH$ ها ارتباط نداشته باشند یا شاهد کاهش نرخ قابل ارسال برای کاربران باشیم. به همین علت امکان مقایسه با کار دیگری نبود.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله در معماری C-RAN کاربرمحور برای شبکه‌های فراچگال به حل مسئله تخصیص هم‌زمان منابع محاسباتی و منابع رادیویی، مانند منابع آموزشی کانال، توان ارسال  $RRH$ ها، منابع روبنا و طراحی وزن بردارهای شکل‌دهی پرتو پرداخته شد. مسئله توأم طراحی شده از نوع NP-hard است. برای کاهش پیچیدگی، خوشه‌بندی کاربرمحور و تخصیص منابع آموزش متناسب با آن استفاده شد. همچنین، برای کاهش سربار بالای آموزش کانال با اطلاعات حالت کانال کامل، از مدل اطلاعات جزئی حالت

- international conference on Mobile computing and networking, 2012, <https://doi.org/10.1145/2348543.2348561>.
- [14] I. Alyafawi, et al., "Critical issues of centralized and cloudified LTE-FDD radio access networks", IEEE International Conference on Communications (ICC), 2015, <https://doi.org/10.1109/ICC.2015.7249202>.
- [15] K. Sundaresan, et al., "FluidNet: A flexible cloud-based radio access network for small cells", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 24, No. 2, pp. 915-928, 2016, <https://doi.org/10.1109/TNET.2015.2419979>.
- [16] Y. Liao, et al., "How much computing capability is enough to run a cloud radio access network?", IEEE Communications Letters, Vol. 21, No. 1, pp. 104-107, 2017, <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2615612>.
- [17] M. Grant, and S. Boyd, "CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.1", 2014, <http://cvxr.com/cv>.
- [18] S. Martello, and P. Toth, "Knapsack problems: algorithms and computer implementations", John Wiley & Sons, 1990.
- [19] V.N. Ha, et al., "Cooperative transmission in cloud RAN considering fronthaul capacity and cloud processing constraints", IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014, <https://doi.org/10.1109/WCNC.2014.6952553>.
- [20] E.U.T.R. Access, "Further advancements for E-UTRA physical layer aspects", 3GPP TR 36.814, Tech. Rep., 2010.
- [21] X. Ge, et al., "5G ultra-dense cellular networks", IEEE Wireless Communications, Vol. 23, No. 1, pp. 72-79, 2016, <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7422408>.
- 1198, 2019, <https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2890474>.
- [7] Y. Shi, J. Zhang, and K.B. Letaief, "CSI overhead reduction with stochastic beamforming for cloud radio access networks", IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 5154–5159, 2014, <https://doi.org/10.1109/ICC.2014.6884139>.
- [8] C. Pan, et al., "Joint pilot allocation and robust transmission design for ultra-dense user-centric TDD C-RAN with imperfect CSI", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 17, No. 3, pp. 2038-2053, 2018, <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2788001>.
- [9] T.X. Tran, and D. Pompili, "Dynamic radio cooperation for user-centric cloud-RAN with computing resource sharing", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 16, No. 4, pp. 2379-2393, 2017, <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2664823>.
- [10] H. Xu, et al., "Robust beamforming with pilot reuse scheduling in a heterogeneous cloud radio access network", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 67, No. 8, pp. 7242-7256, 2018, <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2830699>.
- [11] S. Luo, et al., "Downlink and uplink energy minimization through user association and beamforming in C-RAN", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.14, No.1, pp. 494-508, 2015, <https://doi.org/10.1109/TWC.2014.2352619>.
- [12] Z. Chen, et al., "Training resource allocation for user-centric base station cooperation networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 65, No. 4, pp. 2729-2735, 2016, <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2420114>.
- [13] S. Bhaumik, et al., "CloudIQ: A framework for processing base stations in a data center", ACM Proceedings of the 18th annual

---

<sup>1</sup> Ultra dense network

<sup>2</sup> Coordinated multipoint

<sup>3</sup> Channel state information

<sup>4</sup> Cloud radio access network

<sup>5</sup> Remote radio head

<sup>6</sup> Base band unit

<sup>7</sup> Fronthaul



- <sup>8</sup> Time-division duplex
- <sup>9</sup> Weighted sum rate
- <sup>10</sup> Cooperative beam forming design
- <sup>11</sup> Outer poly-block approximation
- <sup>12</sup> Cooperative computation resource allocation
- <sup>13</sup> Smart rate reduction
- <sup>14</sup> Bisection method