



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)  
دانشکده برق

پایان نامه کارشناسی ارشد  
گرایش مخابرات سیستم

بهبود عملکرد شبکه های دسترسی رادیویی ابری با  
مشارکت توزیع شده

نگارش  
مژده کربلایی مطلب

استاد راهنما  
دکتر محمد جواد عمادی

استاد مشاور  
دکتر عباس محمدی

شهریور ۹۶

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## صفحه فرم ارزیابی و تصویب پایان نامه - فرم تأیید اعضاء کمیته دفاع

در این صفحه فرم دفاع یا تأیید و تصویب پایان نامه موسوم به فرم کمیته دفاع - موجود در پرونده آموزشی - را قرار دهید.

### نکات مهم:

- نگارش پایان نامه/رساله باید به **زبان فارسی** و بر اساس آخرین نسخه دستورالعمل و راهنمای تدوین پایان نامه های دانشگاه صنعتی امیرکبیر باشد.(دستورالعمل و راهنمای حاضر)
- رنگ جلد پایان نامه/رساله چاپی کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترا باید به ترتیب مشکی، طوسی و سفید رنگ باشد.
- چاپ و صحافی پایان نامه/رساله بصورت **پشت و رو(دورو)** بلامانع است و انجام آن توصیه می شود.



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

به نام خدا

## تعهدنامه اصالت اثر

تاریخ: شهریور ۹۶

اینجانب **مژده کربلایی مطلب** متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است. در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت.

کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان‌نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مآخذ بلامانع است.

مژده کربلایی مطلب

امضا

از استاد گرامیم جناب آقای دکتر عمادی بسیار سپاسگزارم چرا که بدون  
راهنمایی ایشان تأمین این پایان نامه بسیار مشکل می نمود. این پایان نامه  
را به پدر و مادرم، اساتید عزیز و خواهر و برادر مهربانم تقدیم میکنم امیدوارم  
قادر به درک زیایهای وجودشان باشم با تشکر

# سپاسگزاری

از استاد گران قدر جناب آقای دکتر عمادی کمال سپاس را دارم و از همه دوستانی که مرا یاری نمودند  
تشکر می کنم.

مژده کریمایی مطلب  
شهریور ۹۶

## چکیده

به دلیل نیاز به افزایش نرخ داده و سرعت انتقال داده، ایجاد نسل جدید در مخابرات مورد توجه قرار گرفته شده است. نسل پنجم مخابرات مفاهیم جدیدی را بیان می کند که نیازها را برآورده خواهد کرد. این مفاهیم شامل mm wave<sup>۱</sup>، MIMO<sup>۲</sup> و CRAN<sup>۳</sup> و ... می باشد.

امروزه شبکه های دسترسی رادیویی ابری<sup>۴</sup> به عنوان شبکه های سلولی نسل آینده 5G توجه بسیاری را به خود جلب کرده اند. در این نوع شبکه ها پردازش های باند پایه از ایستگاههای باند پایه به مرکز کنترل واقع در ابر<sup>۵</sup> منتقل می شوند. اطلاعات دریافتی در ایستگاههای باند پایه که به شکل inphase و quadrature می باشند [۱]، توسط لینک های fronthaul به ابر منتقل شده و پردازش های لازم بر روی آنها صورت می گیرد. همچنین لینک fronthaul دارای محدودیت در ظرفیت می باشد.

در ابتدا ساختار شبکه های C-RAN<sup>۵</sup>، مورد نقد و بررسی قرار می گیرد، سپس مزایای این ساختار جدید و چالش های آن عنوان می شود. در این پروژه، هدف تخصیص توان برای ساختار CRAN در حالات مختلف لینک فراسو و فروسو می باشد. بنابراین برای لینک فراسو و فروسو، سیستم مدل های مختلف از جمله خوشه بندی کاربران و واحدهای رادیویی، اعمال محدودیت ظرفیت لینک fronthaul و در نهایت شبکه های D2D مورد بررسی قرار گرفته است و در رابطه با تخصیص توان در این سیستم مدل ها صحبت می شود.

همچنین سیستم مدلی برای لینک فراسو و فروسو به طور مجزا بیان می گردد که شامل چندین خوشه می باشد و فرض محدودیت لینک fronthaul در نظر گرفته می شود.

در آخر نیز سیستم مدلی که به صورت همزمان لینک فراسو و فروسو را باهم بهینه می کند بیان نمودیم. فرض بر این است که چندین خوشه در لینک فراسو و چندین خوشه در لینک فروسو عمل می کنند و بر یکدیگر تداخل اعمال می نمایند. تخصیص توان بر روی این خوشه ها صورت گرفته است.

## واژه های کلیدی:

شبکه های دسترسی رادیویی ابری، لینک fronthaul، MIMO، خوشه بندی، بازدهی انرژی

<sup>۱</sup>Multiple Input Multiple Output

<sup>۲</sup>Cloud Radio Access Network

<sup>۳</sup>CRAN

<sup>۴</sup>Cloud

<sup>۵</sup>Cloud Radio Access Network

# فهرست مطالب

عنوان

صفحه

۱	۱ مقدمه ای بر C-RAN
۲	۱-۱ مقدمه ای بر ساختار رادیویی دسترسی ابری
۲	۱-۱-۱ مقدمه ای بر 5G
۲	۱-۱-۲ تاریخچه مخابرات
۳	۱-۱-۳ مقدمه ای بر C-RAN
۳	۲-۱ ساختار شبکه های مختلف
۴	۱-۲-۱ پیش زمینه ها
۶	۲-۲-۱ تعریف مسئله
۷	۳-۱ مزایای شبکه ی C-RAN
۷	۱-۳-۱ توانایی تطبیق پذیری با ترافیک غیر یکنواخت
۸	۲-۳-۱ صرفه جویی در هزینه و مصرف انرژی
۸	۳-۳-۱ سهولت در ارتقا دادن و نگهداری از شبکه
۸	۴-۳-۱ کاهش چشمگیر تداخل از طریق پردازش واحد باند پایه
۹	۵-۳-۱ افزایش توان و کاهش تاخیر
۹	۴-۱ چالشها و مشکلات در برخورد با ساختار C-RAN
۹	۱-۴-۱ دو چالش مهم مربوط به fronthaul
۱۰	۲-۴-۱ نحوه ی مشارکت BBU ها نحوه ی اتصال و خوشه بندی
۱۰	۳-۴-۱ نیاز به پهنای باند وسیعتر و تاخیر دقیق و کمتر
۱۱	۴-۴-۱ محدودیت ظرفیت در backhaul
۱۱	۵-۴-۱ نیاز به شبکه های انتقال ازران
۱۱	۵-۱ شبکه های دسترسی رادیویی ابری نا متجانس (H-CRAN)
۱۲	۱-۵-۱ ساختار شبکه ی H-CRAN
۱۲	۲-۵-۱ چالشهای پیش روی H-CRAN
۱۳	۶-۱ H-CRAN و C-RAN
۱۳	۱-۶-۱ تفاوت و شباهت های این دو ساختار
۱۳	۲-۶-۱ مشکلات پیش روی این دو ساختار
۱۳	۷-۱ ارائه ی پیشنهاد سیستم جایگزین (F-RAN)
۱۴	۱-۷-۱ ساختار سیستمهای F-RAN
۱۵	۸-۱ برخی از کاربردهای شبکه ی C-RAN
۱۵	۱-۸-۱ تخصیص منابع مبتنی بر مدولاسیون OFDM
۱۶	۹-۱ تخصیص توان و خوشه بندی شبکه های رادیویی ابری
۱۶	۱۰-۱ نتیجه گیری
۱۸	۱۱-۱ خلاصه ای از فصلهای آتی



۱۹	۲	در ساختار دسترسی رادیویی ابری ادبیات و پیشینه ی تحقیق
۲۰	۱-۲	مقدمه
۲۰	۲-۲	لینک فروسو
۲۰	۱-۲-۲	مدل سیستم اول
۲۲	۲-۲-۲	مدل سیستم دوم
۲۶	۳-۲-۲	مدل سیستم سوم
۲۷	۴-۲-۲	مقایسه ی روش های بیان شده
۲۸	۵-۲-۲	نتایج عددی
۳۳	۳-۲	لینک فراسو
۳۳	۱-۳-۲	مدل سیستم اول
۳۶	۲-۳-۲	مدل سیستم دوم
۳۸	۳-۳-۲	نتایج عددی
۴۲	۴-۳-۲	مقایسه ی روش های بیان شده
۴۳	۴-۲	سیستم مخابراتی D2D
۴۳	۱-۴-۲	مقدمه
۴۳	۲-۴-۲	مدل سیستم
۴۵	۵-۲	نتیجه گیری

## ۳ تخصیص منابع در شبکه های دسترسی رادیویی ابری دارای ظرفیت محدود در لینک

۴۶	fronthaul
۴۷	۱-۳ مقدمه
۴۸	۲-۳ لینک فروسو
۴۸	۱-۲-۳ مدل سیستم
۴۹	۲-۲-۳ آنالیز نرخ قابل دسترس
۵۱	۳-۲-۳ بهینه سازی تخصیص توان
۵۲	۴-۲-۳ روش مورد استفاده
۵۴	۵-۲-۳ نتایج عددی
۵۸	۶-۲-۳ نتیجه گیری
۵۹	۳-۳ لینک فراسو
۵۹	۱-۳-۳ مدل سیستم
۶۰	۲-۳-۳ آنالیز نرخ قابل دسترس
۶۲	۳-۳-۳ بهینه سازی تخصیص توان
۶۳	۴-۳-۳ روش مورد استفاده
۶۴	۵-۳-۳ نتایج عددی
۶۷	۶-۳-۳ نتیجه گیری

۶۸	۴	تخصیص منابع در حالت تقسیم زمانی دینامیکی در شبکه دسترسی رادیویی
۶۹	۱-۴	مقدمه
۶۹	۲-۴	مدل سیستم
۶۹	۱-۲-۴	آنالیز نرخ قابل دسترس در خوشه های فروسو
۷۱	۲-۲-۴	آنالیز نرخ قابل دسترس در خوشه های فراسو
۷۳	۳-۲-۴	شرح مسئله
۷۳	۴-۲-۴	روش مورد استفاده
۷۴	۵-۲-۴	الگوریتم لینک فروسو
۷۵	۶-۲-۴	الگوریتم لینک فراسو
۷۶	۷-۲-۴	نتایج عددی
۷۹	۳-۴	نتیجه گیری
۸۰	۵	نتیجه گیری و پیشنهادات
۸۱	۱-۵	مروری بر کارهای صورت گرفته
۸۱	۲-۵	نتیجه گیری
۸۱	۳-۵	پیشنهادهای
۸۳		کتابنامه

## فهرست اشکال

شکل	فهرست اشکال	صفحه
۱-۱	ساختار سنتی ایستگاه پایه [۲]	۴
۲-۱	ساختار ایستگاه پایه و واحد رادیویی [۲]	۵
۳-۱	ساختار C-RAN [۲]	۵
۴-۱	ساختار شبکه ی C-RAN [۲]	۶
۵-۱	تغییرات حجم ترافیک در ایستگاههای پایه بنا به مکان قرارگیری آنها [۲]	۷
۶-۱	تداخل در LTE و C-RAN [۳]	۸
۷-۱	محدودیت در اثر تاخیر [۴]	۱۰
۸-۱	ساختار شبکه های دسترسی ابری نامتجانس [۵]	۱۱
۹-۱	سیر تحولات شبکه های رادیویی ابری [۶]	۱۴
۱۰-۱	مدل سیستم F-RAN [۶]	۱۴
۱۱-۱	توان عملیاتی تمام کاربران سلول [۷]	۱۶
۱۲-۱	بهره وری انرژی در حضور ترافیک معمول [۷]	۱۷
۱۳-۱	بهره وری انرژی در حضور ترافیک محدود [۷]	۱۷
۱۴-۱	نسبت خطا به تعداد RRH در هر خوشه [۷]	۱۸
۱-۲	مسیر انتقال پیام در لینک فروسو [۸]	۲۱
۲-۲	ساختار MIMO C-RAN [۹]	۲۳
۳-۲	بازدهی انرژی برحسب تعداد واحد های رادیویی تک آنتنه برای واریانس های نویز کوانتیزاسیون متفاوت با فرض وجود ۳ کاربر و $P_{max} = 23dBm$	۲۹
۴-۲	بازدهی انرژی برحسب تعداد واحدهای رادیویی برای یک خوشه برای تعداد کاربر متفاوت	۳۰
۵-۲	بازدهی انرژی برحسب تعداد واحدهای رادیویی برای یک خوشه برای تعداد کاربر متفاوت	۳۱
۶-۲	بازدهی انرژی برحسب تعداد واحدهای رادیویی برای ۳ کاربر در دو حالت با پیش کدگذاری متفاوت.	۳۲
۷-۲	بازدهی انرژی بر حسب تعداد واحدهای رادیویی با وجود ۳ خوشه.	۳۳
۸-۲	مسیر انتقال پیام در لینک فراسو [۸]	۳۴
۹-۲	بازدهی انرژی برحسب تعداد واحدهای رادیویی برای یک خوشه برای ۲ کاربر متفاوت	۳۹
۱۰-۲	بازدهی انرژی برحسب تعداد واحدهای رادیویی برای ۲ کاربر در دو حالت با پرتو دهی متفاوت	۴۰
۱۱-۲	بازدهی انرژی برحسب تعداد کاربران برای یک خوشه برای ۳ مقدار متفاوت واحد های رادیویی	۴۱
۱۲-۲	بازدهی انرژی برحسب تعداد واحدهای رادیویی برای ۲ کاربر در دو حالت با نویز کوانتیزاسیون متفاوت	۴۲
۱-۳	ساختار C-RAN در لینک فروسو.	۴۷
۲-۳	بازدهی انرژی با توجه به تغییرات تعداد واحدهای رادیویی در هر خوشه برای توان بهینه برای دو کاربر مختلف و پارامترهای جدول ۳-۱	۵۵

۳-۳	بازدهی انرژی با توجه به تغییرات تعداد کاربران در هر خوشه برای توان بهینه برای
۵۶	سه واحد رادیویی مختلف و پارامترهای جدول ۳-۱ و $P_c = 9\text{dbm}$ . . . . .
۴-۳	بازدهی انرژی با توجه به تغییرات $C^{th}$ ، در حالت $S = 2$ ، Number of RRHs per Cluster =
۵۷	Number of UE per Cluster = 2, 10, 5 . . . . .
۵-۳	بازدهی انرژی بر حسب تعداد کاربران در ۳ خوشه برای دو مقدار $\sigma_q = 1e-4, 1e-6$
۵۸	۱۰۰ واحد رادیویی در هر خوشه . . . . .
۵۹	۶-۳ ساختار C-RAN در لینک فراسو . . . . .
۷-۳	بازدهی انرژی با توجه به تغییرات تعداد واحدهای رادیویی در هر خوشه برای توان
۶۵	بهینه برای دو کاربر مختلف و پارامترهای جدول ۳-۲ . . . . .
۸-۳	بازدهی انرژی با توجه به تغییرات تعداد کاربران در هر خوشه برای توان بهینه برای
۶۶	دو واحد رادیویی مختلف و پارامترهای جدول ۳-۲ و $S = 2$ . . . . .
۹-۳	بازدهی انرژی با توجه به تغییرات $C^{th}$ ، در حالت $S = 2, 4$ ، Number of RRHs per Cluster =
۶۷	Number of UE per Cluster = 2, 30 . . . . .
۱-۴	بازدهی انرژی با توجه به تغییرات تعداد واحدهای رادیویی در هر خوشه برای توان
۷۷	بهینه برای دو کاربر مختلف و پارامترهای جدول ۴-۱ . . . . .
۲-۴	بازدهی انرژی با توجه به تغییرات تعداد کاربران در هر خوشه برای توان بهینه برای
۷۷	دو واحد رادیویی مختلف و پارامترهای جدول ۴-۱ . . . . .
۳-۴	بازدهی انرژی با توجه به تغییرات ظرفیت پیشینه ی لینک fronthaul در هر خوشه
۷۸	برای توان بهینه برای دو تعدا کاربر مختلف و پارامترهای جدول ۴-۱ . . . . .

صفحه	فهرست جداول	جدول
۲۸	.....	۲-۱ پارامترهای شبیه سازی
۳۹	.....	۲-۲ پارامترهای شبیه سازی
۵۵	.....	۳-۱ پارامترهای شبیه سازی
۶۴	.....	۳-۲ پارامترهای شبیه سازی
۷۶	.....	۴-۱ پارامترهای شبیه سازی

## فهرست نمادها

نماد	مفهوم
$\Re_{d(s,k)}$	نرخ قابل دسترسی برای $k$ امین کاربر در $s$ امین خوشه
$\gamma_{d(s,k)}$	SINR برای $k$ امین کاربر در $s$ امین خوشه
$B$	پهنای باند سیستم
$N.$	توان نویز گوسی جمع شونده
$W$	ماتریس پیش کدگذاری شده و یا پرتو دهی
$\sigma_q^2$	واریانس نویز کوانتیزاسیون
$\bar{p}_{r(s,i)}$	توان واحد رادیویی $i$ ام در $s$ امین خوشه
$\eta$	بازدهی انرژی
$p_{d(s,k)}$	توان $k$ امین کاربر در $s$ امین خوشه
$C_{r(s,i)}$	ظرفیت لینک fronthaul واحد رادیویی $i$ ام در $s$ امین خوشه
$h$	بردار کانال

## فهرست مخففها

کلمه اصلی	کلمه مخفف
Cloud Radio Access Network	C-RAN
Fog Radio Access Network	F-RAN
Hetrogeneous Cloud Radio Access Network	H-CRAN
Radio Remote Head	RRH
Base Band Unit	BBU
Control Unit	CU
Radio Unit	RU
Base Station	BS
Time Division Duplexing	TDD
High Power Node	HPN
Multiple Input Multiple Output	MIMO
Uplink	UL
Downlink	DL
Bandwidth	BW
Channel State Information	CSIT
Energy Efficiency	EE

## فصل اول

### مقدمه ای بر C-RAN



## ۱-۱ مقدمه ای بر ساختار رادیویی دسترسی ابری

### ۱-۱-۱ مقدمه ای بر 5G

مخابرات نسل پنجم یا 5G، نسل بعدی سیستم های بیسیم<sup>۱</sup> و شبکه های مخابراتی بعد از نسل چهارم می باشد که تکاملی از لایه ی فیزیکی در تکنولوژی شبکه های مخابراتی سیار همانند LTE می باشد که نسبت به 4G سرعت و پوشش بهتری را فراهم خواهد نمود. 5G با سیگنال 5GHz عمل خواهد کرد و امید بر این است که سرعت ۱۰۰ برابر سرعت 4G LTE برای ما فراهم نماید. تکنولوژی سیگنال 5G برای پوشش فراگیرتر و بازدهی بهتر سیگنال ایجاد شده است. این پیشرفت ها منجر به تغییراتی از قبیل IOT<sup>۲</sup> و Pervasive Computing در آینده ی نزدیک خواهد شد. همچنین 5G منجر به توسعه و بهبود سرویس های مخابراتی و اینترنتی سیار و در ورای آن، ایجاد تجربه ی بهتری برای مصرف کنندگان خواهد شد. برای توسعه ی اینترنت سیار و IOT، نیاز داریم تا شبکه های 5G، معنای اولیه برای دسترسی شبکه برای ارتباط انسان ها با یکدیگر و ارتباط ماشین با انسان گردد.

### ۱-۱-۲ تاریخچه مخابرات

در ابتدا می خواهیم بدانیم که چه چیزی منجر به رفتن محققان به سوی 5G شده است. یکی از دلایل مهم، سرعت و نرخ انتقال بیشتری است که در ادامه به آن می پردازیم. در ابتدا نیاز بشریت به ارتباط تلفنی (انتقال بدون سیم به صورت زمان حقیقی<sup>۳</sup> بشریت را به سمت نسل اول ارتباطات 1G سوق داده است. نسل دوم ارتباطات 2G با سرویس های انتقال پیام کوتاه ایجاد شد. همچنین با موفقیت تکنولوژی شبکه های منطقه ای بیسیم، اتصال به داده های اینترنتی مورد توجه عموم مردم قرار گرفت که پلی به سوی نسل سوم ارتباطات 3G را فراهم نمود. به طور منطقی پله ی بعدی گام برداشتن در راستای کوچک شدن لپ تاپ و در آمیختن آن با تلفن که امروزه به صورت تلفن هوشمند<sup>۴</sup> است و دسترسی به اینترنت، پهنای باند بالا و داده ها در نقاط مختلف جهان بوده است که 4G یا نسل چهارم را به همراه داشته است. با توجه به افزایش تعداد کاربران تلفن های هوشمند و تبلت ها و افزایش نرخ ارسال اطلاعات و داده ها در طی سال های اخیر طبق پیش بینی های سیسکو میزان ترافیک IP طی سالهای اخیر چندین برابر افزایش خواهد یافت. در نتیجه اپراتورها برای حل این مشکل و خدمات دهی بهتر ناچار به افزایش ظرفیت شبکه می باشند. با توجه به این که نرخ داده و ظرفیت در سیستم های نسل چهارم به ظرفیت شانون نزدیک شده است، در نتیجه روش هایی که برای افزایش ظرفیت شبکه مورد استفاده می گیرند که به شرح زیر است:

- استفاده از تکنیک Massive MIMO

- استفاده از روش های پردازش های ابری

- Software Defined Networking

<sup>۱</sup> Wireless

<sup>۲</sup> Internet of Things

<sup>۳</sup> Real Time

<sup>۴</sup> smart phone

## • Extreme Densification

## • mm Wave

### ۳-۱-۱ مقدمه ای بر C-RAN

شبکه های دسترسی ابری منجر به افزایش پوشش ارسالی می گردد. با توجه به ساختار شبکه C-RAN که معماری جدیدی را برای شبکه های نسل آینده ارائه می دهد، نه تنها ظرفیت شبکه افزایش می یابد بلکه مشکلاتی که در روش های دیگر وجود دارد را نیز هموار می سازد. مفهوم شبکه دسترسی رادیو ابر C-RAN، به مجازی سازی کارکردهای ایستگاه پایه<sup>۵</sup> با استفاده از تکنولوژی رایانش ابری<sup>۶</sup> اشاره می نماید. این مفهوم به ایجاد یک ساختار سلولی جدید منجر می شود که در آن، نقاط دسترسی بیسیم کم هزینه که با عنوان واحدهای رادیویی<sup>۷</sup> و یا رادیو هد های راه دور<sup>۸</sup> شناخته می شوند- با استفاده از یک ابر متمرکز با قابلیت پیکربندی مجدد و یا واحد مرکزی<sup>۹</sup> مدیریت می شوند. شبکه امکان کاهش هزینه های سرمایه گذاری و عملیاتی مورد نیاز برای اپراتور ها به منظور توسعه و نگهداری شبکه های ناهمگن متراکم را فراهم می آورد. این مزیت مهم در کنار بازده طیفی، تسهیم آماری<sup>۱۰</sup>، و مزیت های متعادل سازی بار باعث می شود تا شبکه C-RAN به عنوان یکی از تکنولوژی های کلیدی در توسعه سیستم های 5G در جایگاه بسیار مناسبی قرار بگیرد. در ادامه، یک بررسی کلی و مختصر از تحقیقات جدید در مورد ساختار C-RAN ارائه می شود و موضوعات مورد تاکید عبارتند از فشرده سازی لینک fronthaul پردازش باند پایه، کنترل دسترسی به محیط واسط، تخصیص منابع، ملاحظات سطح سیستم، و تلاش های انجام شده در راستای ارائه استاندارد ها.

### ۲-۱ ساختار شبکه های مختلف

با توجه به مقاله ی [۲]، هر ایستگاه پایه دو نوع پردازش انجام می دهد : پردازش رادیویی که توسط واحد رادیویی<sup>۱۱</sup> انجام می شود و شامل پردازش دیجیتال، فیلترینگ فرکانسی، تقویت توان و ... می باشد و پردازش باند پایه که توسط واحد باند پایه<sup>۱۲</sup> که همان واحد کنترل است<sup>۱۳</sup> انجام شده و از جمله مهمترین وظایف آن می توان به کدینگ، مدولاسیون و تبدیل فوریه ی سریع اشاره کرد. در ساختار جدیدی که تحت عنوان C-RAN معرفی خواهیم نمود نحوه ی ارتباط پردازشگرهای رادیویی و باند پایه متحول شده و در نتیجه مزایایی برای شبکه حاصل خواهد شد. در ادامه ، انواع ساختارها را بیان خواهد شد.

<sup>۵</sup>Base Station-BS

<sup>۶</sup>Cloud Computing

<sup>۷</sup>Radio Units

<sup>۸</sup>Radio Remote Heads

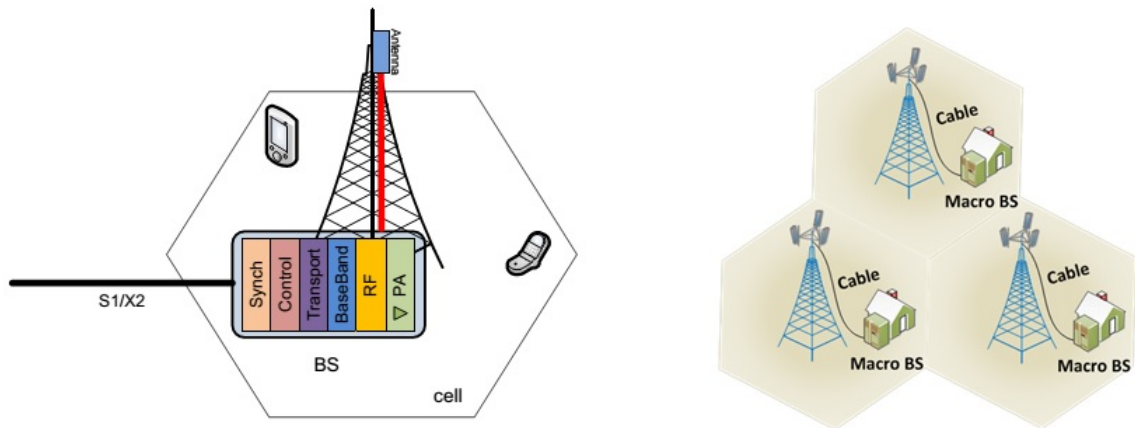
<sup>۹</sup>Control Unit

<sup>۱۰</sup>Statistical Multiplexing

<sup>۱۱</sup>RRH

<sup>۱۲</sup>BBU

<sup>۱۳</sup>CU



شکل ۱-۱: ساختار سنتی ایستگاه پایه [۲]

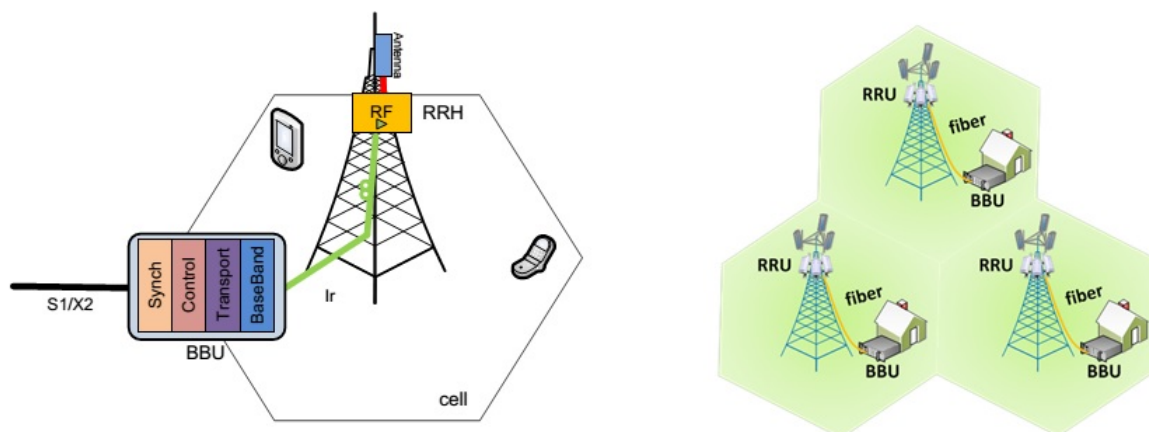
## ۱-۲-۱ پیش زمینه ها

### ساختار سنتی ایستگاه پایه

در ساختارهای سنتی ایستگاه پایه، پردازش های رادیویی و باند پایه در داخل ایستگاه پایه انجام می شود و مدول آنتن نیز در فاصله ی چند متری از مدول رادیویی نصب شده و ارتباط آنها توسط کابل کوکسیال برقرار می شد که همین امر سبب افزایش تلفات در شبکه می باشد. این نوع ساختار در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می کنید ارتباط بین ایستگاههای پایه توسط ارتباط  $X_2$  و ارتباط بین ایستگاه پایه و شبکه ی هسته توسط ارتباط  $S_1$  برقرار می شود. این نوع ساختار در شبکه های 1G و 2G به کار گرفته شده است [۲].

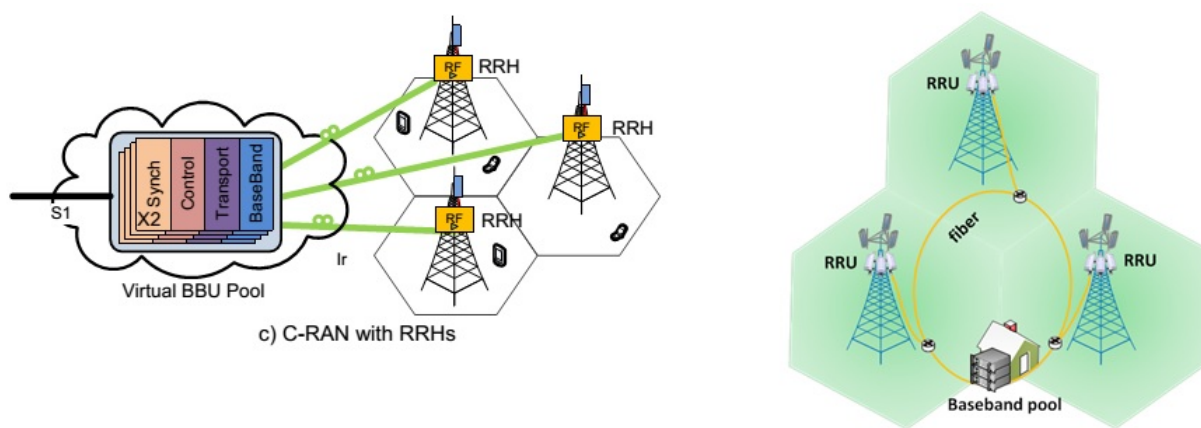
### ساختار ایستگاه پایه و واحد رادیویی

در این ساختار واحد رادیویی و واحد پردازشی سیگنال، از هم مجزا شده و واحد رادیویی که تحت عنوان RRH یا RRU نیز شناخته می شود، توسط فیبر نوری به واحد باند پایه یا BBU اتصال می یابد. همان طور که پیشتر بیان شد واحد رادیویی مسئولیت انجام پردازش های دیجیتالی از جمله تبدیل آنالوگ به دیجیتال، دیجیتال به آنالوگ، تقویت توان و فیلترینگ را بر عهده دارد، که تفکیک وظایف واحد پردازشی و واحد رادیویی در این ساختار در شکل ۲-۱ قابل مشاهده است. این نوع ساختار برای شبکه های نسل سوم معرفی شده و امروزه نیز بیشتر ایستگاههای پایه از همین ساختار بهره می گیرند. از جمله ویژگی های بارز این ساختار امکان ایجاد فاصله بین واحد رادیویی و پردازشی می باشد، که این فاصله به دلیل تاخیر پردازشی و انتشاری نمی تواند از ۴۰ کیلومتر فراتر رود. در این ساختار تجهیزات مرتبط با BBU می توانند به مکانی مناسبتر که قابل دسترس تر بوده و هزینه ی اجاره و نگهداری کمتری را به اپراتورها تحمیل می کنند منتقل شوند و واحد های رادیویی نیز در در پشت بام ساختمان ها و مکان های مرتفع



شکل ۱-۲: ساختار ایستگاه پایه و واحد رادیویی [۲]

نصب می شوند که این خود سبب کاهش هزینه های خنک سازی ادوات موجود می شود. نحوه ی ارتباط بین RRH و BBU مشابه ساختار سنتی بوده و RRH ها نیز توسط معماری زنجیروار با هم در ارتباطند.



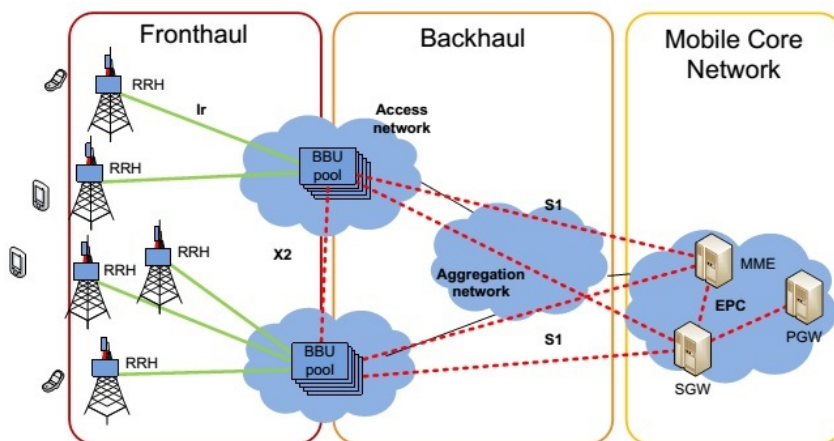
شکل ۱-۳: ساختار C-RAN [۲]

## ۲-۲-۱ تعریف مسئله

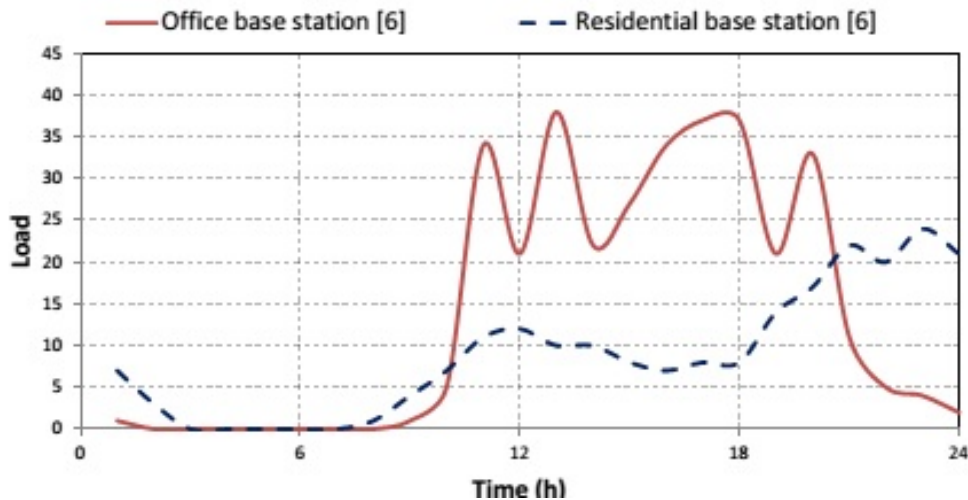
## ساختار C-RAN

این ساختار جدید جزو یکی از ساختارهایی است که در 5G امکان استفاده را دارد. در این ساختار جدید در راستای بهینه سازی عملکرد BBU ها در مواجهه با ایستگاههای پایه پر ترافیک و کم ترافیک، BBU ها به صورت یک مجموعه ی واحد تحت عنوان BBU Pool در آمده اند که این مجموعه بین چندین سلول به اشتراک گزاریده شده و مطابق شکل زیر مجازی سازی می شود. در توضیح بیشتر این ساختار می توان این گونه عنوان کرد که BBU Pool به عنوان یک خوشه ی مجازی در نظر گرفته می شود که شامل پردازش گرهایی می باشد که پردازش های باند پایه را انجام می دهند. ارتباط بین BBU ها در ساختار های فعلی به شکل  $X_2$  برقرار می شود که در این ساختار ارتباط بین خوشه ها از فرم جدید  $X_2+$  تحت عنوان  $X_2+$  برقرار می شود.

در شکل ۳-۱ ساختار کلی شبکه ی C-RAN در سیستم های LTE نمایش داده شده است. همان طور که در شکل قابل مشاهده می باشد ساختار کلی شبکه C-RAN به دو بخش backhaul و fronthaul تقسیم بندی شده است. بخش fronthaul شبکه به مرحله ی اتصال سایت های RRH به BBU Pool به اتصال backhaul و بخش BBU Pool هسته ی شبکه ی سیار اطلاق می شود. همان گونه که قبلا ذکر شد RRH ها در نزدیکی انتن نصب شده و از طریق لینک های انتقالی نوری با پهنای باند وسیع و تاخیر کم به پردازشگرهای قوی در BBU متصل می شوند. توسط این لینک های انتقالی است که سیگنال های دیجیتالی باند پایه از نوع IQ بین RRH و BBU انتقال می یابند [۲].



شکل ۳-۱: ساختار شبکه ی C-RAN [۲]



شکل ۵-۱: تغییرات حجم ترافیک در ایستگاههای پایه بنا به مکان قرارگیری آنها [۲]

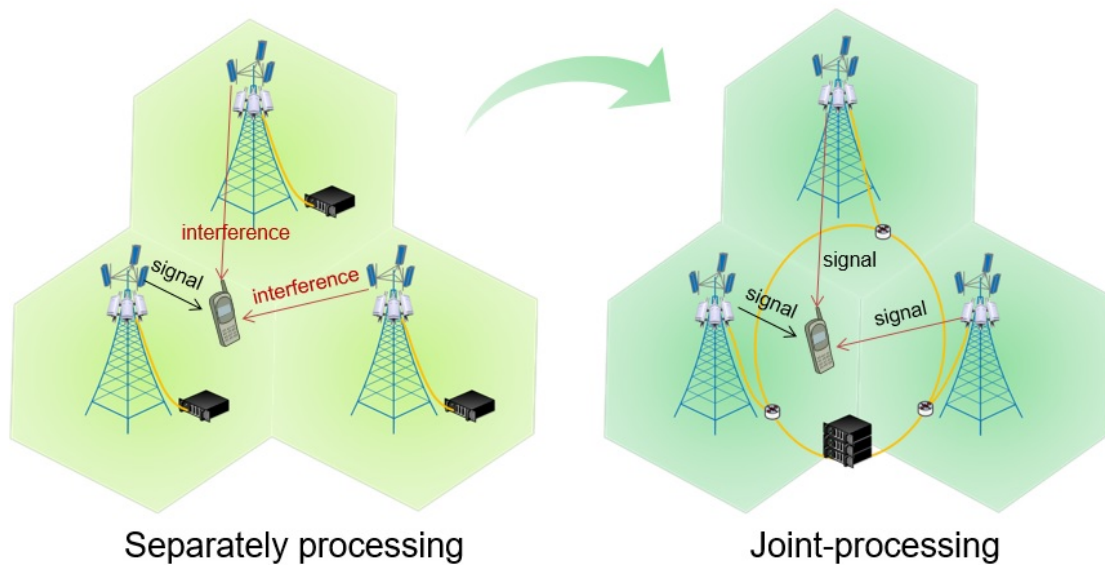
### ۳-۱ مزایای شبکه ی C-RAN

در این بخش قصد داریم مزایای شبکه ی C-RAN و هدف از استفاده ی آن در 5G را بیان کنیم. در هر دو نوع سلولهای ماکرو و میکرو، می توان از ساختار C-RAN بهره برد. در حالت ماکرو، متمرکز کردن BBU ها به صورت BBU Pool، منجر به استفاده ی بهینه از BBU ها و کاهش هزینه ی ایستگاه پایه<sup>۱۴</sup> می شود. همچنین منجر به کاهش مصرف توان و فراهم کردن انعطاف پذیری بیشتر در شبکه و تطبیق آن با ترافیک غیر یکسان می شود. علاوه بر این، باعث تبدیل سیگنال تداخل به سیگنال مفید تبدیل می شود. در ادامه این مزایا به صورت گسترده تر بیان می گردد. [۲، ۱۰]

#### ۱-۳-۱ توانایی تطبیق پذیری با ترافیک غیر یکنواخت

کاربران شبکه های رادیویی در طول روز بین مناطق مختلف (مسکونی و اداری) جابه جا شده و در نتیجه ترافیک هر منطقه نیز بنا به نوع منطقه در طول ساعات شبانه روز متغیر می باشد. نمودار مربوط به این تغییرات در شکل ۳-۴ قابل مشاهده است. نکته ی قابل توجه برای اپراتور ها در این بخش، هدر رفت توان پردازشی در اثر جا به جایی کاربران می باشد. بدین شکل که به طور مثال بعد از اتمام ساعات کاری کاربران شبکه از مناطق اداری به مناطق مسکونی نقل مکان می کنند حال آنکه ایستگاههای پایه برای خدمات رسانی در اوج ترافیک تعبیه شده و با کاهش تعداد کاربران در حقیقت توان پردازشی هدر می رود. تحقیقات نشان داده است که میزان پیک ترافیک شبکه حدود ۱۰ برابر بیشتر از ترافیک در ساعات غیر اوج می باشد و در هر سلول بنا به نوع منطقه ساعات اوج ترافیک متغیر است. با توجه به متغیر بودن ساعات اوج ترافیک در سلول های مختلف و با استفاده از ویژگی شبکه های C-RAN می توان راهکاری ارائه نمود که از هدر رفت توان پردازشی جلوگیری شود. در شبکه های C-RAN پردازش های باند پایه مربوط به چندین سلول به ابر منتقل شده که می توان از این ویژگی برای افزایش نرخ بهره وری استفاده

<sup>۱۴</sup>base station



شکل ۱-۶: تداخل در LTE و C-RAN [۳]

کرد. [۲، ۱۰]

### ۲-۳-۱ صرفه جویی در هزینه و مصرف انرژی

با بکارگیری شبکه های C-RAN در مصرف انرژی و از این رو در کاهش هزینه ها می توان صرفه جویی نمود. هزینه های صورت گرفته توسط اپراتورهای سیستم های مخابراتی که تحت عنوان TCO نیز شناخته می شود، به دو دسته ی عمده تقسیم بندی می شود. هزینه های CAPEX و هزینه های OPEX؛ که هزینه ی CAPEX مربوط به ساخت شبکه که شامل طراحی و نصب سخت افزارها می باشد. هزینه ی OPEX شامل هزینه های مربوط به راه اندازی و نگهداری و همچنین ارتقای شبکه ی مخابراتی می باشد. که C-RAN منجر به کاهش هر دو هزینه می شود.

### ۳-۳-۱ سهولت در ارتقا دادن و نگهداری از شبکه

با قرار گیری BBU ها در داخل ابر به جای قرارگیری در ایستگاه های پایه ی دور از هم امکان سهولت در ارتقا دادن و نگهداری از شبکه در صورت نیاز به مداخله ی نیروی انسانی فراهم می شود، زیرا در این صورت به جای نظارت بر تمام ایستگاههای پایه تنها تعداد مشخصی BBU pool مد نظر قرار می گیرند. هم چنین بروزرسانی CPU در این حالت تسریع شده و استفاده از تکنولوژی IT به جای استفاده از سخت افزارها هموارتر می شود.

### ۴-۳-۱ کاهش چشمگیر تداخل از طریق پردازش واحد باند پایه

تداخل در شهرهای بزرگ یکی از چالشهای مهم محسوب می شود. همانطور که در شکل ۱-۶ دیده می شود، در LTE تداخل به صورت واضحی بر روی سیگنال مفید اثر



می گذارد، حال در C-RAN این مشکل به صورتی که در شکل دیده می شود برطرف شده و سیگنال تداخل تبدیل به سیگنال مفید می شود و از رابطه ی متقابل کانال TDD<sup>۱۵</sup> استفاده می گردد.

### ۱-۳-۵ افزایش توان و کاهش تاخیر

در سالهای اخیر شبکه های نسل ۴ یا LTE توسط 3GPP استاندارد سازی شده و به مرور جایگزین سیستم های نسل ۳ شده اند.

شبکه های C-RAN با توجه به قابلیت هایی که دارند در سیستم های نسل ۴ یعنی LTE و LTE-A قابل پیاده سازی و بهره برداری بوده و مزایایی را برای این سیستم ها به همراه خواهند داشت. برای توضیح بهتر نقش C-RAN در افزایش توان عملیاتی نیاز هست که با تکنیک هایی از قبیل eICIC و CoMP آشنا شده و سپس این تکنیک ها را به ساختار C-RAN تعمیم بدهیم. همان طور که می دانید در سیستم های LTE منابع به صورت مشارکتی مورد استفاده قرار می گیرند. مسئولیت تخصیص منابع در این شبکه ها به عهده ی زمانبندی به نام eNB<sup>۱۶</sup> است که در ایستگاه پایه قرار دارد. نکته ی قابل توجه دیگر استفاده از تکنیک OFDMA می باشد که زمانبند را قادر می سازد که منابع را به صورت دینامیکی هم در حوزه ی زمان و هم در حوزه ی فرکانس به کاربران مختلف تخصیص دهد. با توجه به این که در سیستمهای LTE عموماً پارامتر استفاده ی مجدد از فرکانس برای تمامی سلول ها یک در نظر گرفته می شود، در نتیجه تداخل بین سلول های مجاور به شدت افزایش می یابد. برای رفع این مشکل دو روش عمده مطرح می شود: روش اول کاهش تداخل و روش دوم استفاده ی سازنده از تداخل. برای پیاده سازی روش اول از تکنیک ICIC یا eICIC استفاده می شود و برای روش دوم عمدتاً از تکنیک CoMP بهره می گیرند که توضیح نحوه ی عملکرد این تکنیک ها در مقاله ها به طور کامل بررسی شده است. در رابطه با کاهش تاخیر نیز می توان این گونه عنوان نمود که با قرار گرفتن BBU ها در مجاورت هم در ابر مدت زمان لازم برای انجام عمل hand off بین ایستگاههای پایه کاهش می یابد. زیرا عمل hand off در این حالت به جای ایستگاههای پایه در BBU ها صورت می گیرد

## ۱-۴ چالشها و مشکلات در برخورد با ساختار C-RAN

### ۱-۴-۱ دو چالش مهم مربوط به fronthaul

یکی از مشکلات پیش روی ساختار C-RAN در قسمت fronthaul به شرح زیر است.

- محدودیت ظرفیت که به دو دلیل ایجاد می گردد که در ادامه ذکر شده است [۴].

□ نمونه برداری و کوانتیزاسیون اسکالر

□ تداخل رادیویی به صورت عمومی

- محدودیت در اثر تاخیر که به سه دلیل ایجاد می شود که در ادامه ذکر شده است [۴].

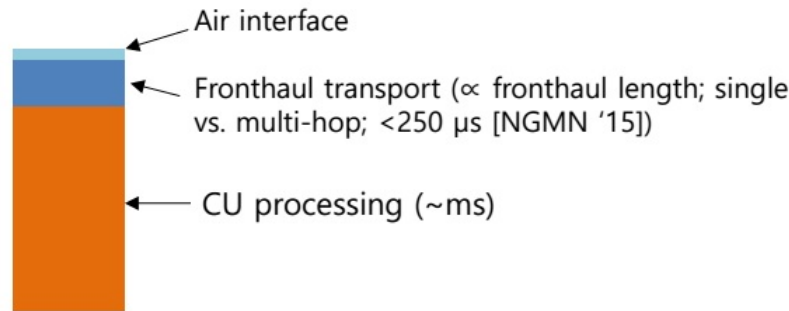
□ تداخل هوا

□ انتقال سیگنال در قسمت fronthaul

<sup>۱۵</sup>Time Division Duplexing

<sup>۱۶</sup>eNode B





شکل ۱-۷: محدودیت در اثر تاخیر [۴]

### □ پردازش واحد کنترل

انتقال سیگنال در قسمت fronthaul و پردازش واحد کنترل به نوع انتقال fronthaul بستگی دارد (بسیم یا انتقال با سیم) با استفاده از مخابرات فیبر نوری این مشکلات تا مقدار زیادی حل خواهد شد.

### ۱-۴-۲ نحوه ی مشارکت BBU ها نحوه ی اتصال و خوشه بندی

همکاری بین ایستگاههای پایه بایستی به گونه ای باشد که از نظر زمانبندی و بررسی اطلاعات بازخورد کانالها به منظور مدیریت تداخل و همچنین سازگاری باتکنیک CoMP مورد بررسی قرار گرفته باشد. تکنیک هایی که برای اتصال BBU ها مورد استفاده قرار می گیرند بایستی از نظر امنیت، قابلیت اطمینان، پشتیبانی از پهنای باند وسیع، تاخیر کم و ... استاندارد های لازم را برآورده ساخته و نسبت به ساختار سنتی عملکرد بهتری را از خود نشان دهند.

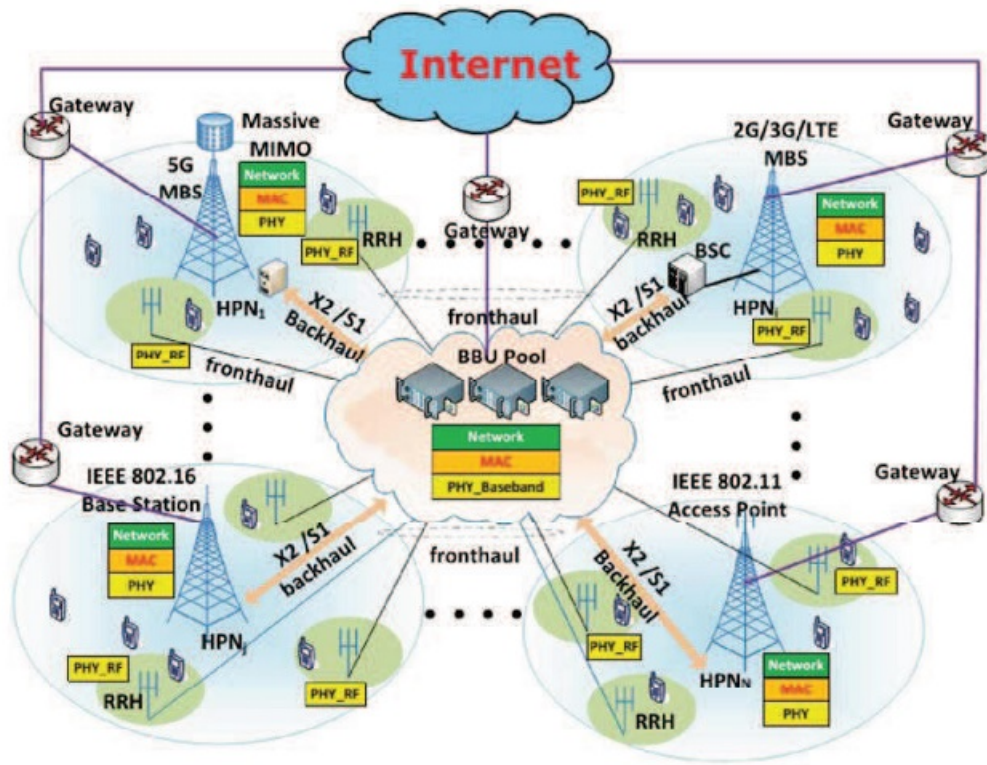
### ۱-۴-۳ نیاز به پهنای باند وسیعتر و تاخیر دقیق و کمتر

در ساختار شبکه ی C-RAN اطلاعات به صورت IQ بین RRH و BBU ها انتقال می یابند. طبق استاندارد هایی که برای این شبکه تعریف شده است، انتظار می رود که هر BBU pool قابلیت خدمات دهی به ۱۰۰۰ - ۱۰۰ ایستگاه پایه را دارا باشد. بنابراین با توجه به پهنای باند مورد نیاز برای ارسال اطلاعات به صورت IQ حجم اطلاعاتی زیادی توسط لینک های نوری به سمت BBU pool ها سرازیر خواهد شد و پهنای باند بالایی مورد نیاز است. علاوه بر نیاز به پهنای باند بالا شبکه ی انتقال ما بایستی نیاز به جیتر و تاخیر دقیق در شبکه را برآورده کند، که در ادامه برخی از این قیود لازم آورده شده است.

- دقت زمانی لازم برای همکاری بین ایستگاههای پایه بایستی در حدود  $5\mu sec$  باشد که مهم ترین شرط این مبحث محسوب می شود.

- صرف نظر از تاخیر حاصل از طول کابل تاخیر حاصل از رفت و برگشت اطلاعات کاربران بایستی از حدود  $5\mu sec$  بیشتر باشد

- فاصله ی بین RRH و BBU ها بایستی از حد  $40 - 20 km$  تجاوز نکند و تاخیر حاصل از پردازش زیر فریم ها در لینک های ارتباطی بین RRH و BBU نیز بایستی از  $1ms$  کمتر باشد



شکل ۱-۸: ساختار شبکه های دسترسی ابری نامتجانس [۵]

#### ۴-۴-۱ محدودیت ظرفیت در backhaul

همچنین محدودیت ظرفیت در backhaul منجر به محدود کردن عملکرد انتقال در حالت مشارکت چند نقطه ای در C-RAN می گردد.

#### ۴-۵-۱ نیاز به شبکه های انتقال از راه دور

برای انتقال اطلاعات بین RRH و BBU از فیبر نوری استفاده می شود. فیبر نوری به دلیل سرعت در انتقال اطلاعات تلفات کم و قابلیت انتقال حجم بالایی از اطلاعات گزینه ی مناسبی برای شبکه های C-RAN به حساب می آید. با وجود محاسن گفته شده گران بودن و عدم دسترسی تمام اپراتورها به فیبر نوری از جمله مشکلاتی است که بایستی قبل از پیاده سازی شبکه های C-RAN بدان پرداخته شود. [۱۱]

#### ۵-۱ شبکه های دسترسی رادیویی ابری نامتجانس (H-CRAN)

برای غلبه بر چالش های شبکه های C-RAN با محدودیت های fronthaul، شبکه های دسترسی ابری نامتجانس (H-CRAN) معرفی گردید [۵، ۶، ۱۲].

### ۱-۵-۱ ساختار شبکه ی H-CRAN

کاربر و صفحه ی کنترلگر در چنین شبکه هایی از هم مجزا می باشند. که در این شبکه ها ، نودهای توان بالا <sup>۱۷</sup>HPN ، عمدتاً برای فراهم کردن پوشش بدون درز و اجرای عملکرد صفحه کنترل می باشد. در حالی که RRH ها برای فراهم نمودن سرعت بالای نرخ داده برای انتقال بسته در ترافیک قرار گرفته اند. HPN ها از طریق لینکهای backhaul به BBU Pool متصلند ( برای هماهنگ کردن تداخل ). ساختار این شبکه شبیه به ساختار C-RAN می باشد . همانطور که در شکل (۸-۱) نشان داده شده است ، تعداد زیادی RRH ، همراه با انرژی مصرفی کم در ساختار H-CRAN ، با یکدیگر در BBU Pool مرکزی ، همکاری می کنند تا گین مشترک بالایی بدست آورند. تنها ، فرکانس رادیویی جلو ، (RF) و عملکردهای پردازشی ساده ، در RRH ، صورت می گیرد ، در حالی که پردازشهای مهم دیگر ، در BBU Pool انجام می گیرد. همچنین تنها بخشی از عملکردها در لایه ی PHY در RRH به مشارکت می انجامد که این مدل در شکل (۸-۱) نشان داده شده است.

اگرچه ، برخلاف C-RAN ، BBU Pool در H-CRAN ، به HPN ها متصلند که این، برای کاهش تداخل متقابل بین RRH ها و HPN ها از طریق محاسبات ابری متمرکز بر اساس تکنیکهای پردازشی مشترک می باشد. همچنین ، داده و واسط کنترل ، بین BBU Pool و HPN های  $S_1$  و  $X_2$  شناخته شده اند که تعریف آنها بر اساس تعریف استاندارد 3G ایجاد شده است.

همانطور که سرویسهای صدا ، می توانند به صورت بهینه در طول مد سوئیچ بسته در 4G فراهم گردند ، H-CRAN می تواند به طور همزمان سرویس صدا و داده را پشتیبانی کند. سرویس صدا مرجع به اداره از طریق HPN ها می باشد ، در حالی که ترافیک بسته ی پر داده ، بیشتر توسط RRH اداره می گردد. در مقایسه با ساختار C-RAN ، ساختار H-CRAN ، نیازهای fronthaul را بوسیله ی مشارکت HPN ها برطرف می سازد. با توجه به حضور HPN ها ، سیگنالهای کنترلی و سیمبلهای داده در H-CRAN جدا از هم می باشند. تمام کنترل کننده های سیگنال و سیستم هایی که اطلاعات را ارسال می نمایند ، توسط HPN ها به UE ، منتقل می گردد که منجر به سادگی در ظرفیت و در محدودیت تاخیر زمان در لینکهای fronthaul بین RRH ها و BBU Pool می گردد و منجر به صرفه جویی در مصرف انرژی می گردد. همچنین ، برخی از ترافیک های شدید و ناگهانی <sup>۱۸</sup> و یا سرویس پیام همراه با مقدار داده ی کم ، می تواند به صورت بهینه توسط HPN ها پشتیبانی گردد. مکانیزم کنترل بین ارتباط داشتن و نبود ارتباط ، توسط H-CRAN پشتیبانی می گردد که منجر به حفظ کردن مقدار قابل توجهی Overhead در رادیو بوسیله ی مکانیزم ارتباط جهت دار خالص می گردد. در RRH ، تکنولوژی های مختلف انتقال در لایه ی PHY ، قابل استفاده برای بهبود نرخ انتقال (همانند موج میلیمتری و نور مرئی) می گردد. در HPN ها، <sup>۱۹</sup>MIMO ، یکی از راه های افزایش پوشش در بهبود ظرفیت می باشد.

### ۲-۵-۱ چالشهای پیش روی H-CRAN

متأسفانه ، H-CRAN در عمل دچار چالشهایی است.

- اولین چالش به این دلیل است که با معروفتر شدن موقعیتهایی که بر اساس کاربردهای اجتماعی است ، داده های ترافیکی در طول مسیر fronthaul از RRH به BBU Pool ، با افزایش موج زیادی

<sup>۱۷</sup>High Power Node

<sup>۱۸</sup>Burst Traffic

<sup>۱۹</sup>Multiple Input Multiple Output

از داده های زائد همراه است که منجر به بدتر شدن محدودیت fronthaul می گردد.

- همچنین H-CRAN، از تمامی فواید پردازشی و ظرفیت ذخیره در ابزارهای پردازشی و الکترونیکی همانند RRH و تلفن های هوشمند (UE)، که راه های رسیدن به موفقیت در این ساختار است، استفاده نمی کند.
- همچنین، اپراتورها، نیاز به استقرار تعداد زیادی RRH و HPN ثابت در H-CRAN، می باشند تا به ماکسیمم ظرفیت دسترسی پیدا کنند. ولی در زمانهایی مه ترافیک زیاد نیست، منجر به اتلاف شدیدی می شود.

## ۶-۱ C-RAN و H-CRAN

### ۱-۶-۱ تفاوت و شباهت های این دو ساختار

تفاوت عمده ی بین این دو ساختار در این است که در H-CRAN، عملگر کنترل مرکزی از BBU Pool به HPN منتقل گردیده است. [۶]  
در هر دو ساختار، عملگرهای CRSP<sup>۲۰</sup> و ذخیره سازی اطلاعات در سرور ابر مرکزی، صورت می گیرد که نیاز به تعداد زیادی دستگاه های فرستنده (موبایل) و انتقال داده به سرعت کافی از طریق BBU Pool می باشد.

### ۲-۶-۱ مشکلات پیش روی این دو ساختار

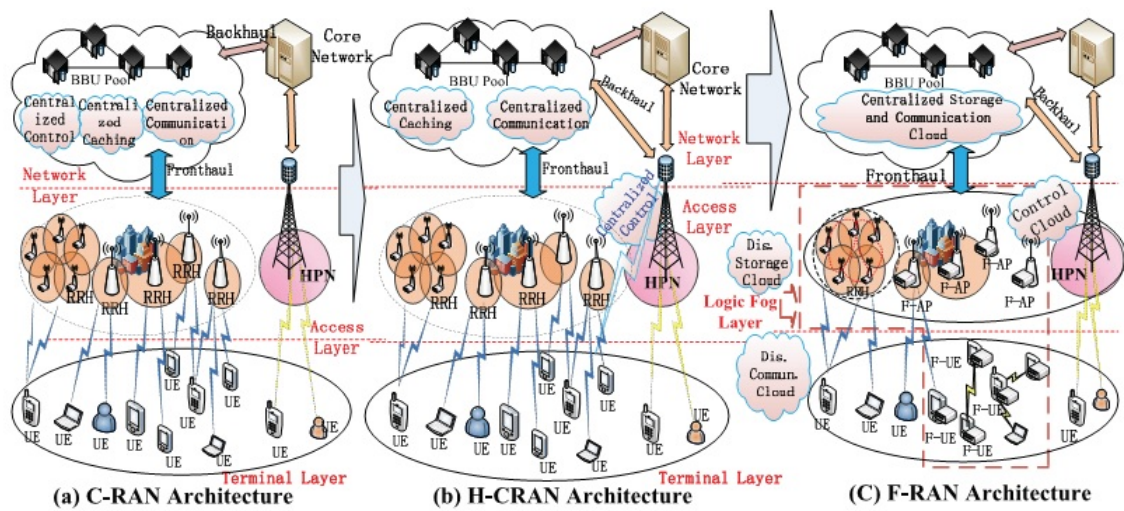
مهمترین مشکلات این دو ساختار، تاخیر انتقال زیاد و سنگینی حمل اطلاعات بر روی fronthaul می باشد. روش ساده ی رای حل این مشکل:

- جلوگیری از انتقال تمام داده ها به BBU Pool شویم و بخشی از پردازش اطلاعات را در RRH های محلی و همچنین وسایل الکترونیکی هوشمند انجام دهیم.
- جلوگیری کنیم از اینکه همه ی ترافیک به طور مستقیم از سرور ابر متمرکز منتقل شود، برخی از ترافیک محلی باید از ذخیره RRH های مجاور تحویل گردد.

## ۷-۱ ارائه ی پیشنهاد سیستم جایگزین (F-RAN)

برای حل کردن مشکلات H-CRAN و C-RAN، نیاز به معرفی ساختار جدید دیگری می باشیم که آن را F-RAN می نامیم. F-RAN تمام ویژگی های مثبت محاسبات ابری و شبکه های نامتجانس و محاسبات مهی را همزمان در بر می گیرد. محاسبات مهی، اصطلاحی برای جایگزین کردن محاسبات ابری است که مقدار قابل توجهی از ذخیره سازی، ارتباطات، کنترل کردن، اندازه گیری و مدیریت را در لبه ی شبکه انجام می دهد (نه در کانال و ابر مرکزی) [۶، ۱۲، ۱۳].

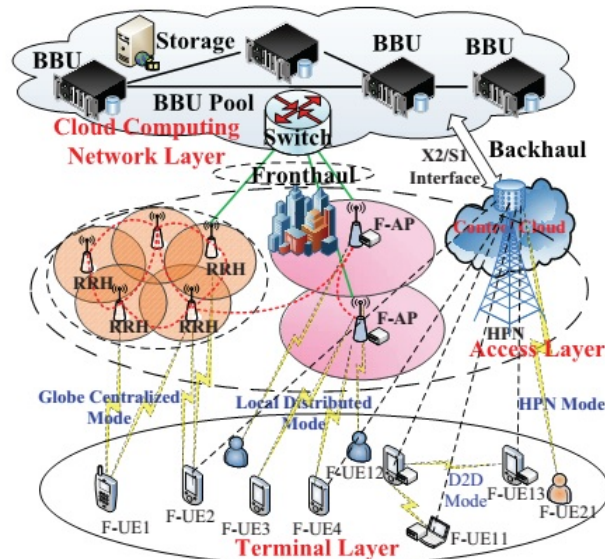
<sup>۲۰</sup> Collaboration Radio Signal Processing



شکل ۱-۹: سیر تحولات شبکه های رادیویی ابری [۶]

#### ۱-۷-۱ ساختار سیستمهای F-RAN

سیستمهای F-RAN تحولی از سیستمهای C-RAN می باشد که در شکل (۱-۹) نشان داده شده است. برخی از ارتباطات توزیع شده و عملکردهای ذخیره سازی در منطق لایه ی مه قرار دارد. همچنین چهار نوع ارتباطات ابری تعریف شده است.



شکل ۱-۱۰: مدل سیستم F-RAN [۶]

- ابر ذخیره گر و ارتباطات مرکزی جامع : که همانند ابر مرکزی C-RAN می باشد
- ابر کنترل گر مرکزی: که برای تکمیل عملکردهای کنترلی می باشد و در HPN ها قرار دارد



• ابر ارتباطات منطقی توزیع شده که در برنامه های محاسبات مهمی و ابزار های این محاسبات قرار دارد.

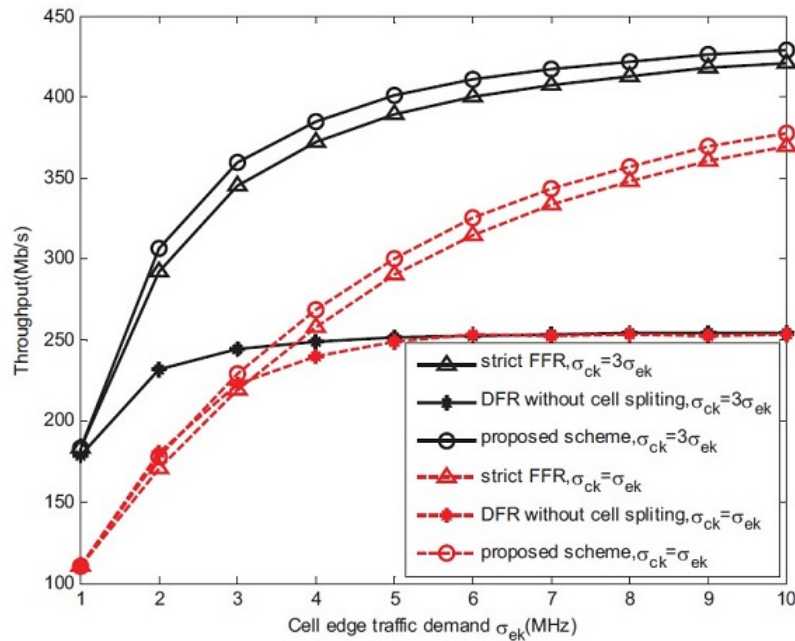
• ابر ذخیره گر منطق توزیع شده: که همانند قبل در F-RAN قرار دارد.

در این ساختار ، برای کاهش تاخیر ناشی از انتقال داده ها به ابر مرکزی ، ساختار های RRH را دارای حافظه قرار می دهیم که برای ارتباطات محلی، به جای اینکه پردازش ها در BBU Pool صورت بگیرد، بدون نیاز به انتقال به ابر مرکزی، درون RRH ها انجام پذیرد.

## ۸-۱ برخی از کاربردهای شبکه ی C-RAN

### ۱-۸-۱ تخصیص منابع مبتنی بر مدولاسیون OFDM

هدف از متد ارائه شده در برخی مقالات را می توان تخصیص منابع بین سلول ها با در نظر گرفتن تداخل بین سلول و هم چنین کاهش تعداد BBU های فعال عنوان کرد. نحوه ی تخصیص به ۲ بخش تقسیم شده و به طور جداگانه بررسی شده است. بخش اول و اصلی تخصیص منابع بین ناحیه های لبه سلول ها می باشد که بایستی تداخل در نظر گرفته شده و بدان منظور از روش graph coloring استفاده شده است و بخش دوم تخصیص منابع بین ناحیه های مرکزی می باشد که بنا به تخصیص های صورت گرفته در بخش اول انجام می شود. در ادامه عملکرد متد ارائه شده برای تخصیص منابع مبتنی بر شبکه C-RAN بررسی شده و مورد ارزیابی قرار می گیرد. در سناریو مورد نظر شبکه ای شامل ۹ سلول در نظر گرفته و پهنای باندی که به هر BBU تخصیص داده می شود را برابر  $B = 20\text{ MHz}$  در نظر گرفته و تابع توزیع احتمال ترافیک شبکه را نیز گوسی در نظر می گیریم. دو پارامتر  $\sigma_{ek}$  و  $\sigma_{ek}^2$  به ترتیب نشانگر پهنای باند مورد نیاز ناحیه ی لبه و ناحیه ی مرکزی سلول می باشند. پهنای باند مورد نیاز به صورت مستقل و یکسان بین تمام سلولها توزیع شده است. [۷] در شکل (۱-۱۱) توان عملیاتی تمام کاربران سلول چه کاربران نواحی مرکزی یا لبه مورد بررسی قرار گرفته است. در این دو دسته نمودار حاصل می نمودار با انتخاب  $\frac{\sigma_{ek}}{\sigma_{ek}^2} = \frac{1}{3}$  شود که وابستگی عملکرد به تغییرات ترافیک را نشان می دهند. در نمودار های مذکور متد جدیدی تحت عنوان DFR بدون تجزیه ی سلول نیز مشاهده می شود که نحوه ی تخصیص مطابق روش ارائه شده ما می باشد با این تفاوت که نواحی لبه و مرکزی تفکیک نشده و کل سلول واحد در نظر گرفته شده است. با هر دو انتخاب ممکن برای نسبت ترافیک ها می توان مشاهده کرد که متد ما عملکرد بهتری را از خود به نمایش می گذارد. متد DFR بدون تفکیک سلول نیز بدترین عملکرد را از خود نشان می دهد زیرا نمی تواند به طور بهینه از منابع استفاده کند در شکل های (۱-۱۲) و (۱-۱۳) نیز عملکرد بهره وری انرژی هر ۳ متد مورد نقد و بررسی قرار گرفته است. شایان ذکر است که میزان بهره وری انرژی به نسبت توان عملیاتی تمام کاربران به توان تمام BBU های فعال اطلاق می شود. با توجه به نمودار ها بدترین عملکرد متعلق به روش FFR معمول می باشد زیرا به ازای هر سلول از یک BBU مجزا استفاده می شود. نکته ی قابل توجه در این نمودار عملکرد بهتر متد DFR بدون تفکیک سلول نسبت به متد ارائه شده است. علت این امر نیز استفاده از BBU های کمتر از  $\frac{M}{3}$  می باشد. هر چند اگر ما تعداد کمتری کاربر در هر سلول داشته باشیم و حجم ترافیکی کاهش یابد، نتایج حاصل از متد ارائه شده از متد DFR بدون تفکیک سلول پیشی گرفته و بهترین عملکرد را از خود نشان می دهد که نتایج مذکور در شکل



شکل ۱۱-۱: توان عملیاتی تمام کاربران سلول [۷]

(۱۳-۱) قابل مشاهده است. در این نمودار فرض

$$\sigma_{ek} = \sigma_{ck}$$

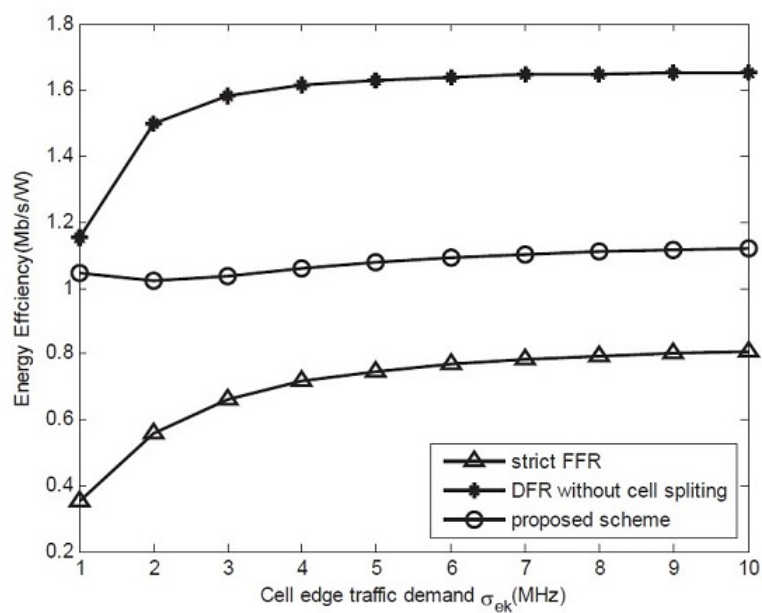
رعایت شده و میزان  $\sigma_{ek}$  بین ۰.۲ و ۲ انتخاب می شود با مفروضات انجام شده تعداد BBU های فعال در هر دو متد یکسان شده و چون توان عملیاتی کاربران در متد ارائه شده بهتر است پس متد مذکور در این نمودار نیز بهترین عملکرد را نسبت به ۲ متد دیگر از خود نشان می دهد.

## ۹-۱ تخصیص توان و خوشه بندی شبکه های رادیویی ابری

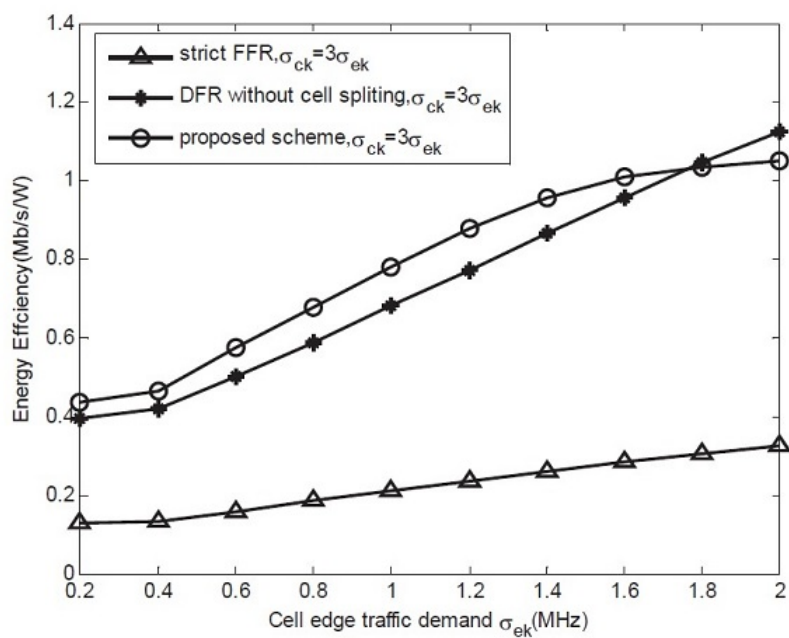
برای کاهش پیچیدگی این نوع شبکه ها، می توان از تکنیک های خوشه بندی در طراحی و چینش RRH ها استفاده کرد. برای بهبود بازدهی انرژی و توان نیز می توان تخصیص توان و خوشه بندی شبکه های رادیویی ابری را همزمان با هم انجام داد. که این مبحث یکی از بحث های داغ در شبکه های رادیویی ابری می باشد که با روش های بهینه سازی به طور همزمان به تخصیص توان و بدست آوردن تعداد خوشه ها خواهیم رسید. حتی برای خوشه بندی به طور تنها نیز می توان از روش K Means استفاده کرد. در شکل ۱۴-۱ نموداری از نسبت خطا به تعداد RRH در هر خوشه رسم شده است.

## ۱۰-۱ نتیجه گیری

در این فصل، نسل پنجم مخابرات یعنی 5G و ساختار جدید C-RAN که مورد توجه در این نسل مخابرات است، مورد بررسی قرار گرفته شده و مزایا و چالش های پیش روی آن به طور مختصری بیان کرده ایم.

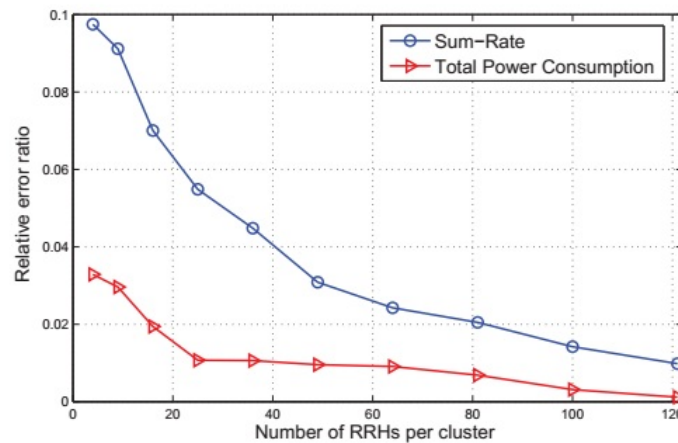


شکل ۱-۱۲: بهره وری انرژی در حضور ترافیک معمول [۷]



شکل ۱-۱۳: بهره وری انرژی در حضور ترافیک محدود [۷]





شکل ۱-۱۴: نسبت خطا به تعداد RRH در هر خوشه [۷]

همچنین ساختارهای جدیدی که ساختارهای تعمیم یافته ی C-RAN می باشد را مورد بررسی قرار داده ایم. این ساختارهای جدید قابلیت کاهش هزینه های ساخت و بهره برداری از شبکه و هم چنین بهبود کارایی سیستم از لحاظ پوشش دهی و تحرک پذیری را دارا می باشد و شاید بتوان افزایش بهره ی انرژی را جزو مهمترین مزایای این ساختار عنوان کرد.

## ۱۱-۱ خلاصه ای از فصلهای آتی

در فصلهای بعدی، مدل سیستم ساختار C-RAN مورد بررسی قرار می گیرد. در فصل ۲ به کارهای گذاشته و مدل سیستمهای گذشته در لینک فروسو و فراسو می پردازیم و مفهومی به نام بازدهی انرژی<sup>۲۱</sup> را بیان می کنیم و هدفمان در این فصول بیشینه سازی مجموع نرخ های قابل دسترس و بیشینه سازی بازدهی انرژی می باشد. در فصل سوم به بررسی مدل سیستم جدیدی می پردازیم که نسبت کارهای قبلی تغییرات اندکی کرده است و در فصل چهارم نیز مدل سیستمی با تغییرات بیشتری را در نظر داریم و در نهایت در فصل پنجم به نتیجه گیری تمام فصل ها پرداخته می شود.

<sup>۲۱</sup>Energy efficiency

## فصل دوم

# در ساختار دسترسی رادیویی ابری ادبیات و پیشینه ی تحقیق

## ۱-۲ مقدمه

شبکه های دسترسی رادیویی ابری، می تواند ساختار جدیدی برای نسل بعدی سیستمهای مخابراتی سلولی باشد. در این ساختار، پردازش های بخش باند پایه از ایستگاه پایه <sup>۱</sup>، به واحد کنترل <sup>۲</sup> در داخل ابر <sup>۳</sup> منتقل می گردد. ایستگاه باند پایه که به عنوان واحد رادیویی <sup>۴</sup> عمل می کند، توسط لینک fronthaul، به واحد کنترل متصل می گردد. لینک fronthaul، اطلاعاتی در مورد سیگنالهای باند پایه که در حالت فراسو از واحد رادیویی به واحد کنترل و در حالت فرسو به صورت برعکس، منتقل می کند. بدلیل محدودیت در ظرفیت لینک fronthaul، [۱۴] اطلاعات قبل از عبور از این لینک، کوانتیزه می گردد. در حال حاضر بسیاری از تحقیقات در زمینه ی 5G در مورد سیستم های MIMO است که در زیرساخت C-RAN می باشد. در این فصل، برخی از نتایج ارائه شده مرتبط با شبکه های دسترسی رادیویی ابری در لینک فرسو و فراسو بیان می گردد.

## ۲-۲ لینک فرسو

در این قسمت، سیستمهای MIMO C-RAN در حالت فرسو مورد بررسی قرار می گیرد. در حالت فرسو، واحد کنترل، پردازش اطلاعات پیام را با عملکرد کدگذاری کانال و پیش کد گذاری <sup>۵</sup> مدیریت می نماید.

### ۱-۲-۲ مدل سیستم اول

سیگنال پیش کدگذاری شده ی باند پایه در واحد کنترل، فشرده گشته و توسط لینک ارتباطی fronthaul که دارای ظرفیت محدود است [۱۵]، به واحد رادیویی منتقل می گردد. هر واحد رادیویی، از لینک fronthaul سیگنالی را که دارای نویز کوانتیزاسیون است، دریافت می کند؛ سپس با اعمال pulse shaping، سیگنال را به فرکانس بالاتر منتقل کرده و از طریق کانال بدون سیم به کاربران ارسال می نماید.

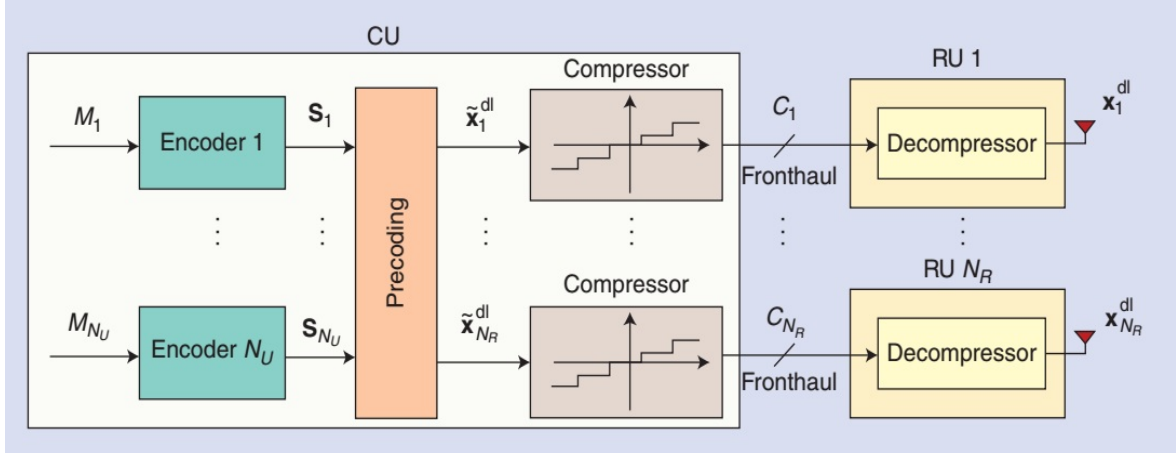
<sup>۱</sup>BS

<sup>۲</sup>CU

<sup>۳</sup>cloud

<sup>۴</sup>RRH

<sup>۵</sup>precoding



شکل ۱-۲: مسیر انتقال پیام در لینک فروسو [۸].

بلوک دیاگرام مدل سیستم اول در شکل ۱-۲ نشان شده است. در اینجا،  $N_U$  کاربر قرار دارند که توسط  $N_R$  واحد رادیویی سرویس دهی می شوند. برای بدست آوردن سیگنال  $\tilde{x}^{dl}$ ، واحد کنترل، سیگنال پیام را به صورت مجزا برای هر کاربر کدگذاری می کند. با اعمال این فرآیند، سبلمهای  $s = [s_1; \dots; s_{N_U}]$  بدست می آید که  $s_k$  نشان دهنده ی سبمل  $k$  امین کاربر می باشد. سیگنال پیش کدگذاری شده ی  $\tilde{x}^{dl}$  که توسط واحد کنترل تولید می گردد به این صورت بیان می شود:

$$\tilde{x}^{dl} = \mathbf{W} \mathbf{P}^\dagger s, \quad (1-2)$$

که

$$\tilde{x}^{dl} = [\tilde{x}_1^{dl}; \dots; \tilde{x}_{N_R}^{dl}] \quad (2-2)$$

در رابطه ی (۱-۲)،  $\mathbf{W}$ ، ماتریس پیش کدگذاری شده با ابعاد  $N_R \times N_U$  می باشد و  $\mathbf{W} = [w_1, \dots, w_{N_U}]$  است. علاوه بر این،  $\mathbf{P}^\dagger = \text{diag}(\sqrt{p_1}, \dots, \sqrt{p_{N_U}})$  ماتریس توان است. حال سیگنال فشرده شده ی دریافتی توسط واحد رادیویی به صورت زیر بدست می آید:

$$\mathbf{x}^{dl} = \tilde{\mathbf{x}}^{dl} + \mathbf{Q}, \quad (3-2)$$

که در اینجا  $\mathbf{Q} = [q_1, \dots, q_{N_R}]^T$ ، بردار نویز کوانتیزاسیون تولید شده به دلیل فشرده سازی بعد از پیش کدگذاری در واحد کنترل می باشد که دارای توزیع  $q_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{q_i}^2)$  می باشد. سیگنال دریافتی توسط  $j$  امین کاربر به صورت  $y_j$  نمایش داده می شود.

$$y_j = \mathbf{H}_j \mathbf{x}^{dl} + z_j \quad (4-2)$$

$\mathbf{H}_j$  بردار کانال کاربر  $j$ ام می باشد که دارای ابعاد  $1 \times N_R$  است. همچنین  $z_j$  نویز گوسی  $z_j \sim \mathcal{N}(0, 1)$

می باشد. توان ارسالی از  $i$  امین واحد رادیویی از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$P_i(\mathbf{W}, \sigma_q) = \frac{1}{T} E[||x_i||^2] = \text{trace}(\mathbf{w}_i \mathbf{P}^\dagger (\mathbf{P}^H)^\dagger \mathbf{w}_i^H + \sigma_{q_i}^2 \mathbf{I}) \quad (5-2)$$

که در اینجا  $T = 1$  می باشد. همچنین  $\sigma_{q_i}^2$  واریانس نویز کوانتیزاسیون است. با توجه به رابطه ی (5-2) ظرفیت لینک fronthaul از واحد کنترل به  $i$  امین واحد رادیویی از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$C_i(\mathbf{W}, \sigma_{q_i}) = \log \det(\mathbf{w}_i \mathbf{P}^\dagger (\mathbf{P}^H)^\dagger \mathbf{w}_i^H + \sigma_{q_i}^2 \mathbf{I}) - \log(\sigma_{q_i}^2) \quad (6-2)$$

برای بدست آوردن نرخ قابل دسترس  $j$  امین کاربر از فرمول زیر استفاده می گردد:

$$R_j(\mathbf{W}, \sigma_q) = I(s_j; y_j) \quad (7-2)$$

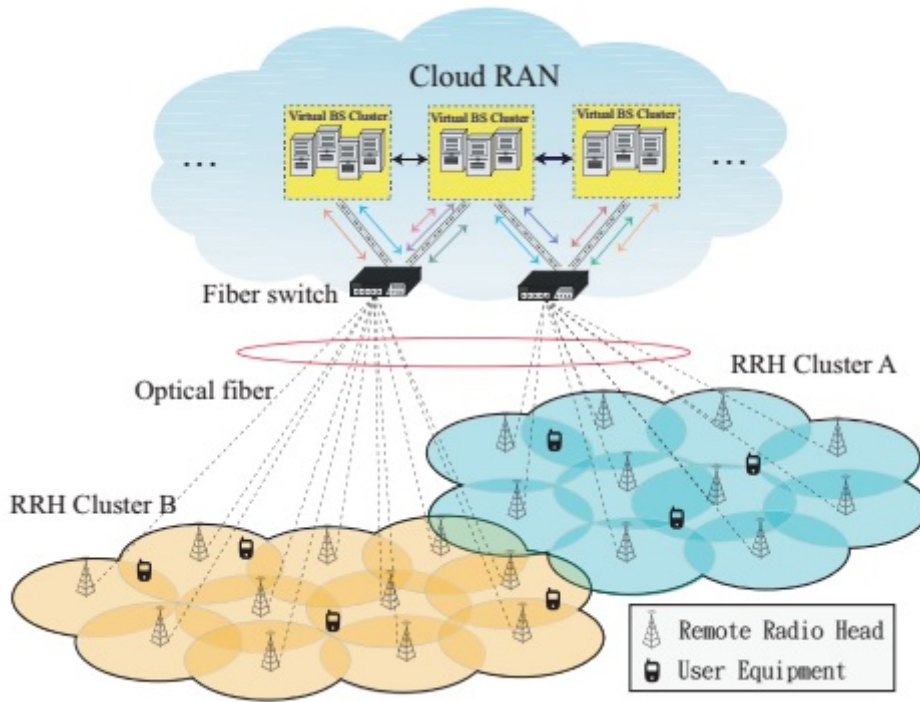
که در اینجا  $I$  همان اطلاعات متقابل است. در این تحقیقات، مجموع نرخ های قابل دسترس براساس محدودیت ظرفیت لینک fronthaul و محدودیت توان هر واحد رادیویی، بیشینه می گردد:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{W}, \sigma_q} \quad & \sum_j R_j(\mathbf{W}, \sigma_q) \\ \text{subject to} \quad & \bar{P}_i(\mathbf{W}, \sigma_q) \leq P_{max} \quad \forall i \\ & C_i(\mathbf{W}, \sigma_q) \leq C^{th} \quad \forall i \end{aligned} \quad (8-2)$$

در اینجا می خواهیم مجموع نرخ ها با محدودیت بیان شده را بیشینه کنیم. برای حل این مسائل از الگوریتم تکرار شونده و ضرایب لاگرانژ که در فصل بعدی ارائه می گردد، استفاده می شود [۱۶، ۱۷، ۸، ۱۸].

## ۲-۲-۲ مدل سیستم دوم

در این بخش، مدل سیستم دومی را برای ساختار MIMO C-RAN بررسی می کنیم. فرض بر این است که کاربران و RRH ها، به  $S$  تا خوشه تقسیم شده اند که  $v$  امین خوشه، دارای  $R_v$  تا RRH است که  $D_v$  تا کاربر را سرویس دهی می کنند. همچنین  $r_{(s,n)}$  نشان دهنده ی  $n$  امین واحد رادیویی در  $s$  امین خوشه می باشد و به همین صورت  $d_{(s,k)}$  نشان دهنده ی  $k$  امین کاربر در  $s$  امین خوشه است.



شکل ۲-۲: ساختار MIMO C-RAN [۹].

در این قسمت، بردار سیگنال دریافتی کاربران در  $s$  امین خوشه، به صورت زیر نوشته می شود:

$$\mathbf{y}_{D_s} = \sum_{v=1}^S \mathbf{H}_{R_v, D_s}^H \mathbf{W}_{R_v, D_v} \mathbf{P}_{D_v}^{\frac{1}{2}} \mathbf{x}_{D_v} + \mathbf{z}_{D_s}, \quad (9-2)$$

که در اینجا  $\mathbf{x}_{D_v} = [x_{d(v,1)}, \dots, x_{d(v,D_v)}]^T \in \mathbb{C}^{D_v \times 1}$  بردار سمبل ارسالی واحد رادیویی از  $t$  امین خوشه می باشد.

$\mathbf{W}_{R_v, D_v} = [\mathbf{w}_{R_v, d(v,1)}, \dots, \mathbf{w}_{R_v, d(v,D_v)}]^T \in \mathbb{C}^{R_v \times D_v}$  ماتریس پیش کدگذاری اعمال شده در خوشه ی  $v$  ام می باشد. علاوه بر این،  $\mathbf{z}_{D_s}$  نویز گوسی جمع شونده است که به صورت  $\mathbf{z}_{D_s} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, N, \mathbf{I}_{D_s})$  و دارای توان  $N$  می باشد. همچنین بردار کانال از واحدهای رادیویی دسته ی  $R_v$  به کاربر دسته ی  $D_s$  می باشد که این بردار را می توان به صورت زیر نوشت.  $\mathbf{H}_{R_v, D_s} = [\mathbf{h}_{R_v, d(s,1)}, \dots, \mathbf{h}_{R_v, d(s,D_s)}]^T \in \mathbb{C}^{R_v \times D_s}$  و همین طور بردار کانال از RRH های خوشه ی  $v$  به  $k$  امین کاربر در خوشه ی  $s$   $\mathbf{h}_{R_v, d(s,k)} \in \mathbb{C}^{R_v}$  به صورت زیر مدل می شود

$$\mathbf{h}_{R_v, d(s,k)} = \beta_{R_v, d(s,k)}^{\frac{1}{2}} \mathbf{g}_{R_v, d(s,k)}, \quad (10-2)$$

که در اینجا  $\mathbf{g}_{R_v, d(s,k)} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, N, \mathbf{I}_{D_s})$  نشان دهنده ی بردار کانال محوشدگی سریع و مسطح برای کانال می باشد و  $\beta_{R_v, d(s,k)} = \text{diag}(a_{r(v,1), d(s,k)}, \dots, a_{r(v,R_v), d(s,k)})$  نشان دهنده ی محوشدگی در مقیاس بزرگ می باشد. این مدل سیستم نیز شبیه به مدل سیستم مسئله ی قبلی است با این تفاوت

که در اینجا، فشردن سازی اعمال نمی گردد  $Q_{\mathcal{R}_v} = 0$  و فرض این است که ظرفیت لینک fronthaul نامحدود است. به علاوه، در اینجا چندین خوشه باهم در نظر گرفته شده است و تداخل پیامها بین خوشه های متفاوت نیز محاسبه می شود. حال می خواهیم توان ارسالی از هر واحد رادیوی  $i$  در خوشه ی  $s$  به کاربران را محاسبه نمود.

$$\bar{p}_{r(s,i)} = \|w_{r(s,i),D_s} P_{D_s}^{\frac{1}{2}}\|^2 \quad (11-2)$$

که در اینجا  $w_{r(s,i),D_s}$  سطر  $i$  ام ماتریس  $W_{R_s,D_s}$  است. در حالت کلی برای بدست آوردن بردار کانال، در لینک فراسو با ارسال پایلوت، بردار کانال بدست می آید که در اینجا فرض می شود که با اندکی خطا همراه است و به این صورت بیام می گردد.

$$\hat{h}_{\mathcal{R}_v,d(s,k)} = h_{\mathcal{R}_v,d(s,k)} + \Delta h_{\mathcal{R}_v,d(s,k)},$$

$\Delta h_{\mathcal{R}_v,d(s,k)}$  نشان دهنده ی بردار خطای تخمین زده شده است که دارای توزیع گوسی به صورت

$$\Delta h_{\mathcal{R}_v,d(s,k)} \sim \mathcal{N}(0, \phi_{\mathcal{R}_v,d(s,k)}^2),$$

است که داریم

$$\phi_{\mathcal{R}_v,d(s,k)} = \text{diag}(\phi_{r(v,1),d(s,k)}, \dots, \phi_{r(v,R_v),d(s,k)}).$$

همچنین با فرض اینکه پیش کدگذاری اعمال شده از نوع MMSE می باشد، ماتریس پیش کدگذاری از رابطه ی داده شده بدست می آید:

$$W_{\mathcal{R}_s,D_s} = \hat{H}_{\mathcal{R}_s,D_s} (\hat{H}_{\mathcal{R}_s,D_s}^H \hat{H}_{\mathcal{R}_s,D_s} + \alpha I_{D_s})^{-1}, \quad (12-2)$$

$\alpha$  فاکتور رگولاسیون است که در صورتی که مقدارش صفر باشد، پیش کدگذاری از نوع ZF خواهد بود. همچنین در صورتی که از پیش کدگذاری MRT استفاده نماییم، ماتریس پیش کدگذاری از رابطه ی مقابل بدست می آید:

$$W_{\mathcal{R}_s,D_s} = \hat{H}_{\mathcal{R}_s,D_s} \quad (13-2)$$

همچنین این ماتریس با روشهای مختلفی قابل نرمالیزه شدن است. حال برای فهم بیشتر، سیگنال دریافتی

کاربر  $d_{(s,k)}$  را نمایش می دهیم

$$\begin{aligned}
 y_{d_{(s,k)}} &= \mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d_{(s,k)}}^H \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d_{(s,k)}} p_{d_{(s,k)}}^{\frac{1}{2}} \\
 &+ \underbrace{\sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^{D_s} \mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d_{(s,k)}}^H \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d_{(s,l)}} p_{d_{(s,l)}}^{\frac{1}{2}}}_{\text{(intra-cluster interference)}} \\
 &+ \underbrace{\sum_{\substack{v=1 \\ v \neq s}}^S \sum_{l=1}^{D_s} \mathbf{h}_{\mathcal{R}_v, d_{(s,k)}}^H \mathbf{w}_{\mathcal{R}_v, d_{(v,l)}} p_{d_{(v,l)}}^{\frac{1}{2}}}_{\text{(inter-cluster interference)}} \\
 &+ z_{d_{(s,k)}}
 \end{aligned} \tag{۱۴-۲}$$

بنابراین مقدار SINR  $k$ امین کاربر در  $s$ امین خوشه به صورت زیر محاسبه می شود [۱۹، ۲۰]؛

$$\gamma_{d_{(s,k)}} = \frac{p_{d_{(s,k)}} |\mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d_{(s,k)}}^H \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d_{(s,k)}}|^2}{I_{d_{(s,k)}} + BN}. \tag{۱۵-۲}$$

که  $B$  پهنای باند کانال است و  $I_{d_{(s,k)}}$  توان سیگنال تداخلی می باشد که از رابطه ی زیر بدست می آید؛

$$\begin{aligned}
 I_{d_{(s,k)}} &= \underbrace{\sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^{D_s} |\mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d_{(s,k)}}^H \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d_{(s,l)}}|^2 p_{d_{(s,l)}}}_{\text{(intra-cluster interference)}} \\
 &+ \underbrace{\sum_{\substack{v=1 \\ v \neq s}}^S \sum_{l=1}^{D_s} |\mathbf{h}_{\mathcal{R}_v, d_{(s,k)}}^H \mathbf{w}_{\mathcal{R}_v, d_{(v,l)}}|^2 p_{d_{(v,l)}}}_{\text{(inter-cluster interference)}}
 \end{aligned} \tag{۱۶-۲}$$

بنابراین نرخ قابل دسترسی برای کاربر  $d_{(s,k)}$  به صورت زیر محاسبه می شود؛

$$\mathfrak{R}_{d_{(s,k)}} = B \log_2(1 + \gamma_{d_{(s,k)}}), \tag{۱۷-۲}$$

بازدهی انرژی نسبت مجموع نرخ های قابل دسترسی به مجموع توان ارسالی می باشد که به این صورت



نمایش داده می شود:

$$\eta(\mathbf{P}) := \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^{D_s} \mathfrak{R}_{d(s,k)}}{\sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^{R_s} \bar{p}_{r(s,i)}} = \frac{R_{total}(\mathbf{P})}{P_{RRH}(\mathbf{P})}, \quad (18-2)$$

حال در اینجا هدف بیشینه سازی بازدهی انرژی می باشد. در نتیجه مسئله ی بهینه سازی بدین گونه بیان می گردد:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{P}} \quad & \eta(\mathbf{P}) \\ \text{subject to} \quad & \bar{p}_{d(s,k)} \leq P_{max} \quad \forall s, \forall i, \\ & \mathfrak{R}_{d(s,k)} \geq \mathfrak{R}_{d(s,k)}^{th} \quad \forall s, \forall k, \\ & p_{d(s,k)} \geq 0 \quad \forall s, \forall k, \end{aligned} \quad (19-2)$$

این مسئله با استفاده از روش لاگرانژ و الگوریتم تکرار شونده بدست می آید که در فصل بعدی به طور کامل به شرح آن می پردازیم [۹، ۲۲، ۲۱].

### ۳-۲-۲ مدل سیستم سوم

برای گسترده سازی این مسئله ، همزمان تخصیص توان و خوشه بندی باهم در نظر گرفته می شود. این مسئله از مدل سیستمی به صورت زیر استفاده می نماید که تفاوت اندکی با معادله ی (۹-۲) دارد. سیگنال دریافتی برای  $k$ امین کاربر به این صورت است:

$$\begin{aligned} y_k = & \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M \phi_{c,m,k} h_{m,k} w_{m,k} \sqrt{p_k} x_k \\ & + \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M \sum_{r=1, r \neq k}^K \phi_{c,m,r} h_{m,k} w_{m,r} \sqrt{p_r} x_r + n_k, \end{aligned} \quad (20-2)$$

که در این معادله بردار کانال بین  $k$ امین کاربر و  $m$ امین واحد رادیویی است. علاوه بر این،  $w_{m,k}$  ماتریس پیش کد گذاری بین کاربر  $k$  و واحد رادیویی  $m$  است.  $p_k$  نیز توان سمبل ارسالی و  $x_k$  سمبل ارسالی برای  $k$ امین کاربر است. همچنین،  $\phi_{c,m,k} \in \{0, 1\}$  و زمانی که کاربر  $k$ ام و  $m$ امین کاربر رادیویی در خوشه ی  $c$ ام باشند، مقدار  $\phi$  یک و در غیر این صورت صفر می باشد. صورت مسئله در اینجا، بیشینه

سازی بازدهی انرژی با شروط بیان شده در معادله ی مقابل می باشد.

$$\begin{aligned}
 & \max_{P, \phi} \quad \eta \\
 & \text{subject to} \quad \sum_{c=1}^C \sum_{k=1}^K \phi_{c,m,k} |w_{m,k}|^2 p_k, \forall m, \\
 & \mathcal{R}_k \geq \mathcal{R}_k^{th} \quad \forall k, \\
 & p_k \geq 0 \quad \forall k, \\
 & \phi_{c,m,k} \in \{0, 1\} \\
 & \sum_{t=1, t \neq c}^C \sum_{m=1}^M \phi_{c,m,k} \sum_{m=1}^M \phi_{t,m,k} \leq 0 \quad \forall m, \forall c, \\
 & \sum_{t=1, t \neq c}^C \sum_{k=1}^K \phi_{c,m,k} \sum_{k=1}^K \phi_{t,m,k} \leq 0 \quad \forall m, \forall c, \\
 & \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \phi_{c,m,k} \geq 1
 \end{aligned} \tag{21-2}$$

در اینجا، با اعمال تابع لاگرانژ بیشینه سازی بازدهی انرژی بدست می آید [۲۳، ۲۴، ۲۵].

#### ۴-۲-۲ مقایسه ی روش های بیان شده

در این بخش، مدل سیستمهای مختلف در لینک فروسو با یکدیگر مقایسه شده است. در مدل سیستم اول، فشرده سازی و پیش کد گذاری اعمال می گردد. ابتدا، پیام کد گذاری می شود. سپس پیام کدگذاری شده، توسط واحد کنترل، پیش کدگذاری می شود. همچنین این پیام فشرده می شود و توسط لینک محدود fronthaul که فیبر نوری است، ارسال می گردد. در انتها، پیام فشرده شده توسط واحدهای رادیویی به کاربران بوسیله ی لینک بی سیم فرستاده می شود. در اینجا، کاربران و واحدهای رادیویی، خوشه بندی نشده اند. در این مدل، هدف، بیشینه سازی مجموع نرخ های قابل دسترس با شرط محدودیت توان و ظرفیت لینک fronthaul است.

در مدل سیستم دوم، پیام کدگذاری شده و سپس پیش کد گذاری به آن اعمال می گردد و در نهایت بوسیله ی لینک fronthaul نامحدود، به واحدهای رادیویی ارسال می گردد. واحدهای رادیویی و کاربران در این مدل، خوشه بندی شده اند. پیام دریافتی توسط واحدهای رادیویی، به کاربران خوشه ی خود از طریق لینک بیسیم ارسال می شود. در این مدل فشرده سازی بدلیل نامحدود بودن لینک fronthaul، صورت نمی گیرد. هدف از این مدل سیستم، بیشینه سازی بازدهی انرژی با شرط محدودیت توان است. مدل سیستم سوم نیز، همانند مدل سیستم دوم عمل می کند با این تفاوت که هدف در این مدل، بیشینه سازی بازدهی انرژی با شرط محدودیت توان و ایجاد خوشه ها است و خوشه سازی از قبل تعیین نشده است.

## ۵-۲-۲ نتایج عددی

در این بخش، نتایج عددی الگوریتم مورد استفاده را برای سیستم با پارامترهای بیان شده در جدول ۲-۱ [۲۶] بیان می کنیم.

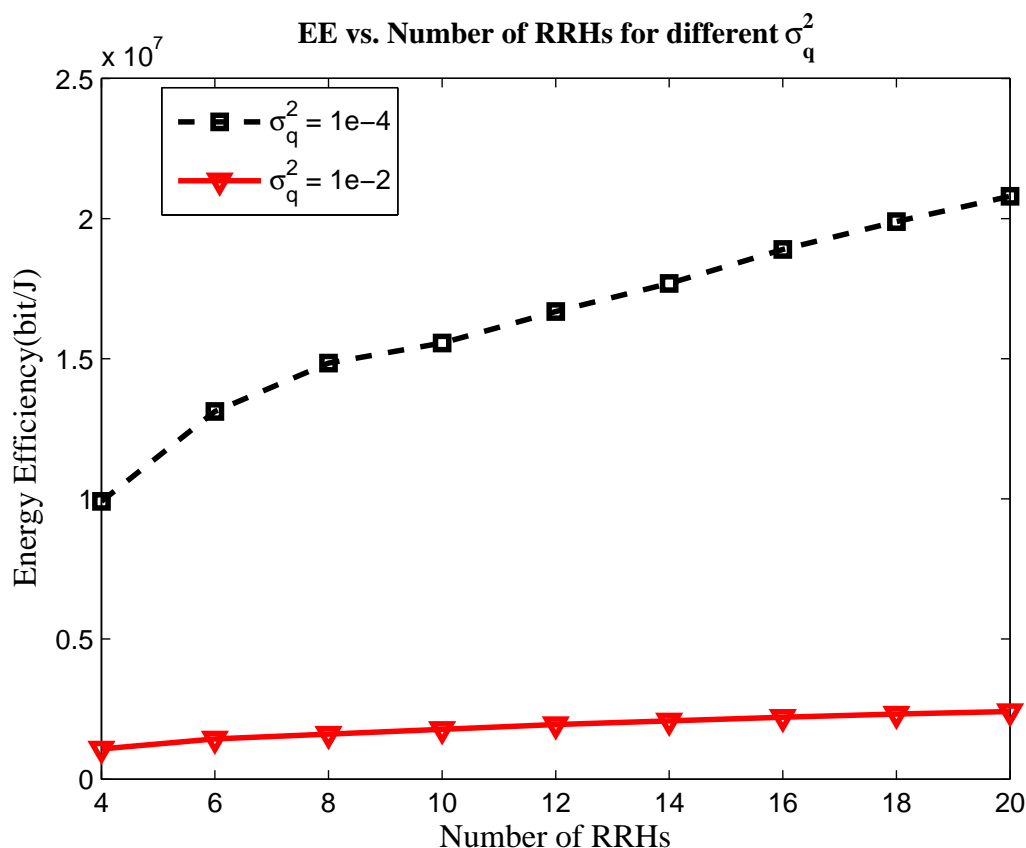
پارامترهای شبیه سازی: Table 2-1

Parameter	Value
Number of cluster S	1
The radius of the cell	500m
Noise power density	-174dBm/Hz
Bandwidth	120KHz
Maxmimun transmit Power	10dBm
Circuit Power of whole RRHs	10dBm
Minimum data rate	6bits/sec/Hz

در جدول ۲-۱، توان مداری واحدهای رادیویی  $P_c$ ، توانی است که صرف مدار تمام واحد های رادیویی می گردد [۲۷] و داریم :

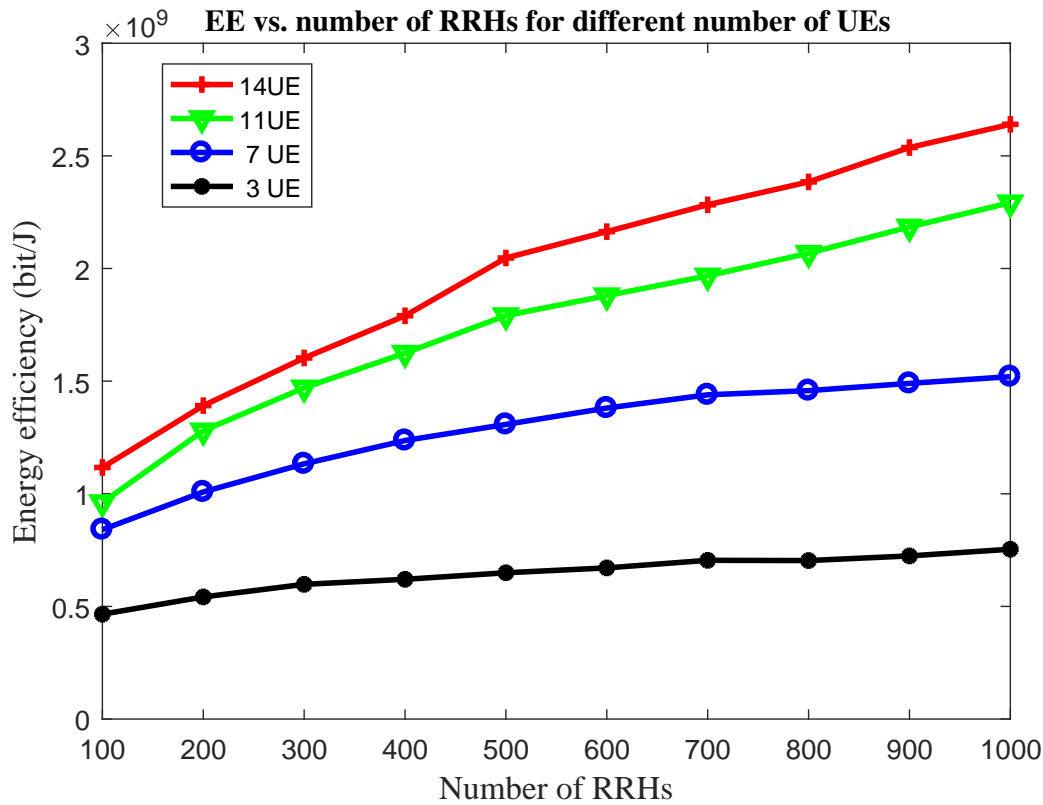
$$\eta = \frac{R_{total}(\mathbf{P})}{P_{RRH}(\mathbf{P}) + P_c} \quad (22-2)$$

با توجه به جدول ۲-۱، شبیه سازی هایی صورت گرفته شده است که در ادامه بیان می گردد.



شکل ۳-۲: بازدهی انرژی بر حسب تعداد واحدهای رادیویی تک آنتنه برای واریانس های نویز کوانتیزاسیون متفاوت با فرض وجود ۳ کاربر و  $P_{max} = 23dBm$

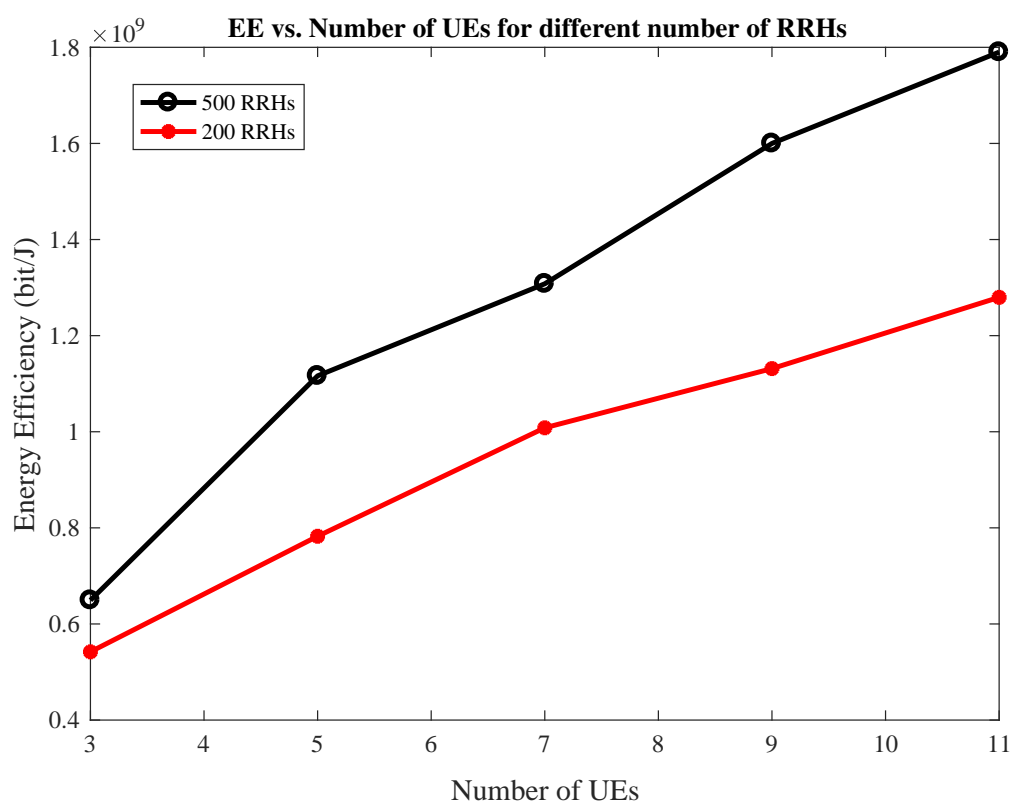
در شکل ۳-۲، بازدهی انرژی بر حسب تعداد واحدهای رادیویی تک آنتنه با فرض وجود ۳ کاربر و محدودیت لینک fronthaul،  $C_{max} = 5 (bit/s/Hz)$  برای دو نویز کوانتیزاسیون مختلف برای مدل سیستم اول رسم شده است. همانگونه که دیده می شود با افزایش نویز کوانتیزاسیون، بازدهی انرژی برای واحدهای رادیویی مختلف کاهش یافته است و با افزایش واحدهای رادیویی، بازدهی انرژی زیاد می گردد.



شکل ۲-۴: بازدهی انرژی برحسب تعداد واحدهای رادیویی برای یک خوشه برای تعداد کاربر متفاوت

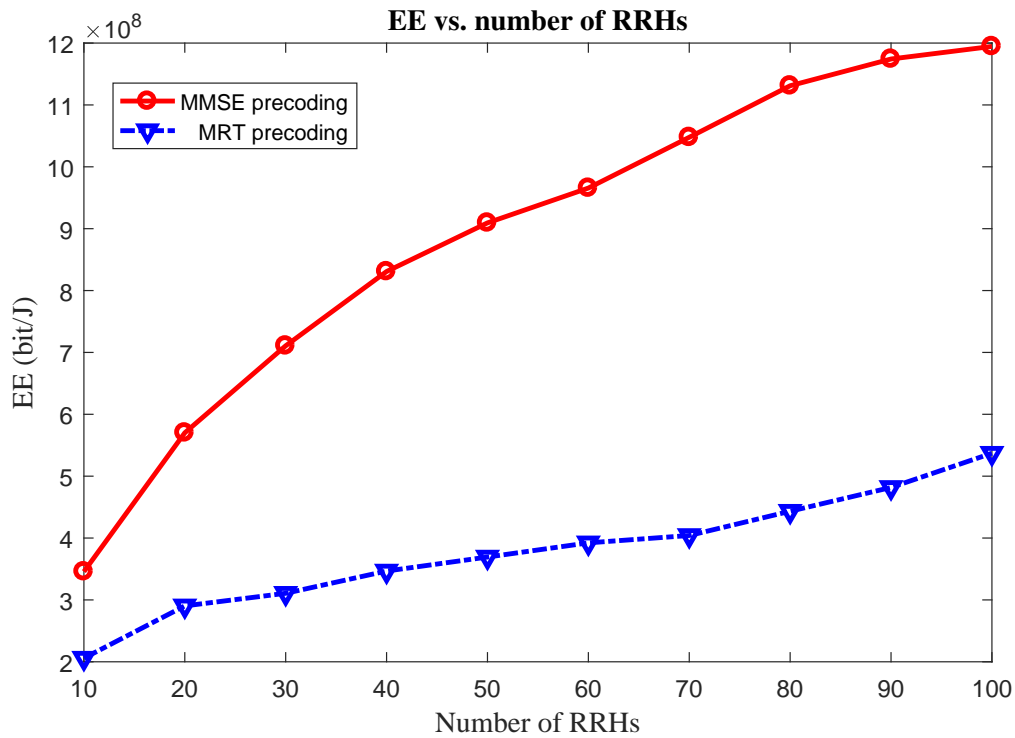
حال برای مدل سیستم دوم شبیه سازی هایی ارائه می گردد. در مدل سیستم دوم با فرض اینکه در ابتدا خوشه بندی صورت نگرفته باشد، با استفاده از روش الگوریتم تکرار شونده، بازدهی انرژی را برحسب تعداد واحدهای رادیویی برای یک خوشه با تعداد کاربران متفاوت در شکل (۲-۴) با فرض استفاده از پیش کدگذاری MRT رسم شده است. در این شکل فرض این است که ظرفیت محدود لینک fronthaul و همچنین خوشه بندی در نظر گرفته نشده است. همانطور که در شکل (۲-۴) می بینید با افزایش تعداد واحدهای رادیویی، بازدهی انرژی بهبود می یابد.

همچنین برای شرایط گفته شده، در شکل (۲-۵)، بازدهی انرژی برحسب تعداد کاربران برای دو سری واحدهای رادیویی مختلف کشیده شده است.



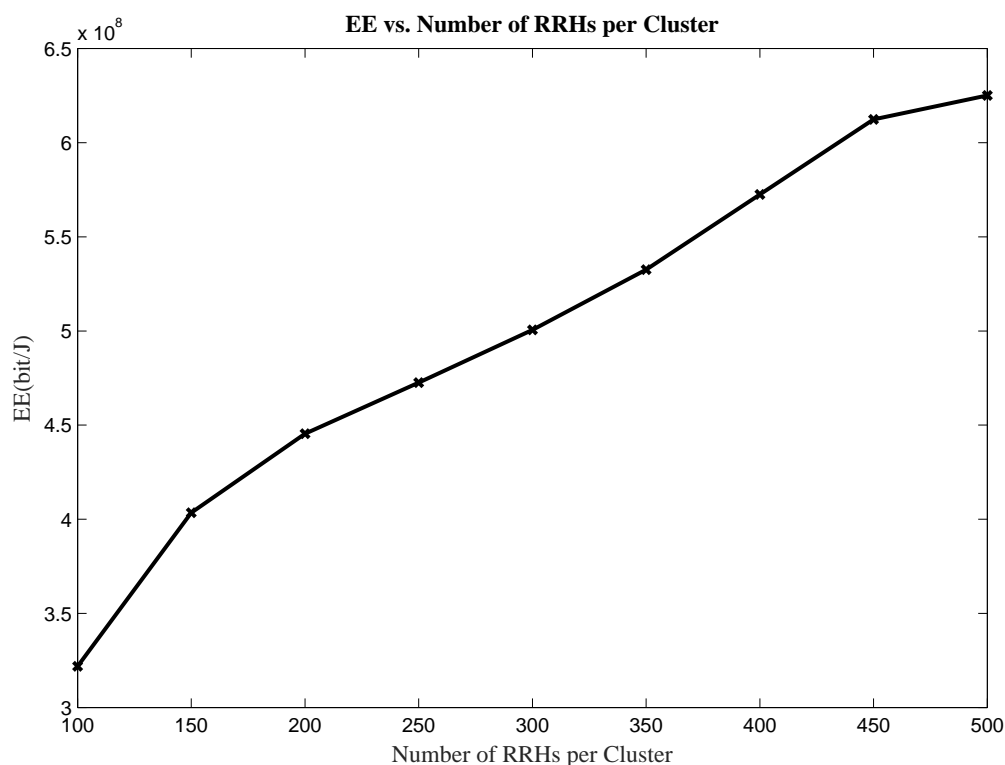
شکل ۲-۵: بازدهی انرژی برحسب تعداد واحدهای رادیویی برای یک خوشه برای تعداد کاربر متفاوت

حال میزان بازدهی انرژی برحسب تعداد واحدهای رادیویی برای دو نوع پیش کدگذاری MRT و MMSE برای ۳ کاربر در شکل ، نمایش داده شده است. با توجه به شکل، پیش کدگذاری MMSE، منجر به بازدهی انرژی بیشتری می گردد زیرا با افزایش کاربران تداخل بیشتر شده و پیش کدگذاری MMSE در حذف تداخل بهتر از MRT عمل می کند.



شکل ۲-۶: بازدهی انرژی بر حسب تعداد واحدهای رادیویی برای ۳ کاربر در دو حالت با پیش کدگذاری متفاوت.

همچنین در شکل ۲-۷، با فرض وجود ۳ خوشه و ۳ کاربر در هر خوشه بازدهی انرژی بر حسب تعداد واحدهای رادیویی در هر خوشه رسم شده است که در شکل با افزایش تعداد واحدهای رادیویی در هر خوشه بازدهی افزایش می یابد.



شکل ۲-۷: بازدهی انرژی بر حسب تعداد واحدهای رادیویی با وجود ۳ خوشه.

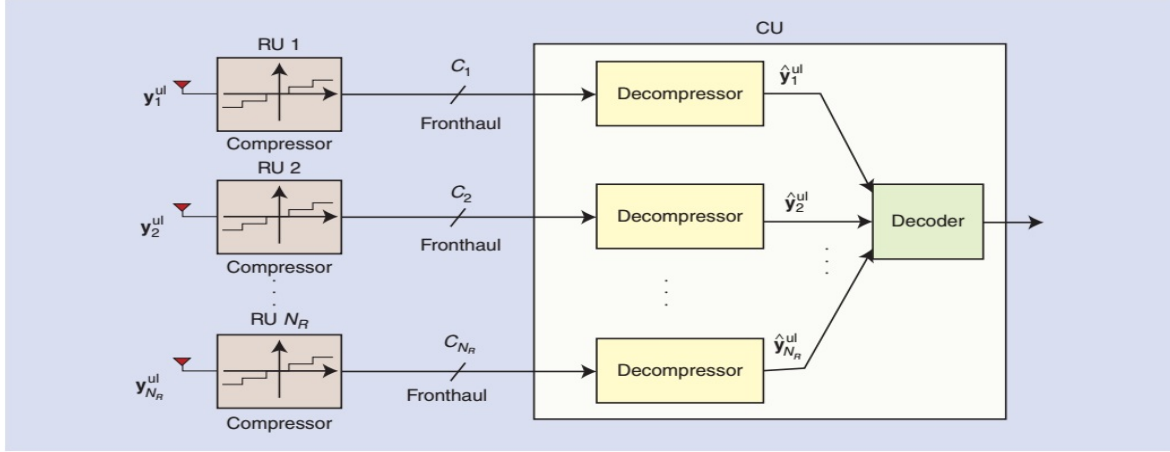
## ۳-۲ لینک فراسو

در این قسمت کارهای انجام شده در زمینه ی سیستمهای MIMO C-RAN را در حالت فراسو مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت فراسو، پیام از کاربران به واحد رادیویی ارسال می گردد و از طریق لینک fronthaul که فیبر نوری است به واحد کنترل برای پردازش انتقال می یابد.

### ۱-۳-۲ مدل سیستم اول

هدف از این بخش، بررسی لینک فراسو برای مدل سیستم خاص می باشد [۱۶، ۱۷، ۸، ۱۸]. که در شکل (۲-۸)، مسیر انتقال پیام از واحد رادیویی به واحد کنترل نمایش داده شده است. فرض بر این است که در این حالت، سیستم شامل  $N_U$  تا کاربر و  $N_R$  تا واحد رادیویی است.





شکل ۸-۲: مسیر انتقال پیام در لینک فراسو [۸].

در اینجا همانند لینک فروسو، ساختار سیستم به صورت MIMO C-RAN می باشد. همچنین فرض می کنیم که هر واحد رادیویی دارای  $N_r$  تا آنتن و هر کاربر تک آنتنه می باشد. در این مدل سیستم زمان ارسال پیام به دو بخش تقسیم می گردد. بخشی از زمان در ابتدا برای ارسال پایلوت و بخشی دیگر صرف ارسال پیام می گردد. کل زمان ارسال پیام را  $T$  در نظر گرفته که به دو بخش  $T_p$  برای ارسال پایلوت و یادگیری کانال و  $T_d$  برای ارسال داده می باشد:

$$T = T_p + T_d \quad (۲۳-۲)$$

سیگنال ارسالی توسط هر کاربر دارای ابعاد  $1 \times T$  می باشد. سیگنال ارسالی توسط کاربر  $i$ ام با نماد  $\mathbf{X}_i$  نشان داده شده که دارای توان  $P_i = \frac{1}{T} E[||\mathbf{X}_i||^2]$  است. این سیگنال به دو قسمت تقسیم می شود. قسمت اول  $X_{p,i}$  برای ارسال پایلوت است و دارای توان  $P_{p,i} = \frac{1}{T_p} E[||\mathbf{X}_{p,i}||^2]$  می باشد و قسمت دوم  $X_{d,i}$  برای ارسال داده است و دارای توان  $P_{d,i} = \frac{1}{T_d} E[||\mathbf{X}_{d,i}||^2]$  می باشد. همچنین این توانها در معادله ی داده شده صدق می کنند:

$$\frac{T_p}{T} P_{p,i} + \frac{T_d}{T} P_{d,i} = P_i \quad (۲۴-۲)$$

به علاوه سیگنال یادگیری کانال که همان پایلوت است به صورت  $\mathbf{X}_p = [\mathbf{X}_{p,1}^T, \dots, \mathbf{X}_{p,N_U}^T]^T$  است و  $\mathbf{X}_d = [\mathbf{X}_{d,1}^T, \dots, \mathbf{X}_{d,N_U}^T]^T$  سیگنال داده است. علاوه بر این،  $\mathbf{X}_p = \sqrt{P_p} \mathbf{S}_p$  و  $\mathbf{X}_d = \sqrt{P_d} \mathbf{S}_d$  که در اینجا  $\mathbf{S}_p$  و  $\mathbf{S}_d$  به ترتیب بردارهای  $N_U \times T$  هستند که نرمالیزه شده اند. پیام دریافتی توسط  $j$  امین واحد رادیویی برای دو حالت پیام یادگیری کانال و داده در ادامه بیان شده است:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{p,j} &= \sqrt{P_p} \mathbf{H}_j \mathbf{S}_p + \mathbf{Z}_{p,j} \\ \mathbf{Y}_{d,j} &= \sqrt{P_d} \mathbf{H}_j \mathbf{S}_d + \mathbf{Z}_{d,j} \end{aligned} \quad (۲۵-۲)$$

در معادله ی (۲۵-۲)،  $\mathbf{Z}_{p,j}$  و  $\mathbf{Z}_{d,j}$  نویز گوسی جمع شونده  $\mathbf{Z} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{I})$  می باشند و بردارهای آنها

به ترتیب دارای  $N_r \times T_p$  و  $N_r \times T_d$  ابعاد است. همچنین بردار  $\mathbf{H}_j$ ، نشان دهنده ی بردار کانال از کاربران به  $j$  امین واحد رادیویی می باشد که می توان به صورت  $\mathbf{H}_j = [h_{j,1}, \dots, h_{j,N_U}]$  بسط داد و دارای ابعاد  $N_r \times N_u$  می باشد. بردار کانال  $h_{j,1}$  در اینجا به صورت  $iid \sim \mathcal{N}(\cdot, \alpha_{j,i})$  مدل شده است که  $\alpha_{j,i} = \frac{1}{1 + \frac{d_{ji}}{d}}$  می باشد.

حال، همانطور که در شکل (۸-۲)، دیده می شود، پیام دریافتی توسط واحد رادیویی، فشرده سازی می گردد [۲۸] که در اینجا برای دو بخش پایلوت و داده جداگانه بررسی می کنیم.

#### مرحله ی یادگیری کانال

در طول این مرحله، فشرده سازی و کوانتیزاسیون برای سیگنال  $\mathbf{Y}_p$  اعمال می گردد و می توان به حالت زیر نوشت

$$\hat{\mathbf{Y}}_p = \mathbf{Y}_p + \mathbf{Q}_p \quad (۲۶-۲)$$

در معادله ی (۲۶-۲)،  $\mathbf{Q}_p \sim \mathcal{N}(\cdot, \sigma_p^2 \mathbf{I})$  و  $iid$  می باشد که  $\sigma_p^2$  تابع محدودیت لینک fronthaul می باشد. حال با توجه به معادله ی (۲۶-۲) کانال بین کاربران و واحدهای رادیویی بوسیله ی MMSE با خطا تخمین زده می شوند.

$$\mathbf{H} = \hat{\mathbf{H}} + \mathbf{E} \quad (۲۷-۲)$$

که کانال تخمین زده ی  $\hat{\mathbf{H}}$ ، ماتریس گوسی به صورت  $\hat{\mathbf{H}} : iid \sim \mathcal{N}(\cdot, \sigma_h^2)$  و  $\mathbf{E} : iid \sim \mathcal{N}(\cdot, \sigma_e^2)$  می باشد. همچنین  $\sigma_h^2 = \alpha - \sigma_e^2$  است.

#### مرحله ی بررسی داده

در این مرحله، داده فشرده سازی و کوانتیزاسیون می گردد.

$$\hat{\mathbf{Y}}_d = \mathbf{Y}_d + \mathbf{Q}_d \quad (۲۸-۲)$$

در معادله ی (۲۸-۲)،  $\mathbf{Q}_d : iid \sim \mathcal{N}(\cdot, \sigma_d^2)$  می باشد. علاوه بر این نویز معادل به صورت  $\mathbf{N}_d = \mathbf{E}\mathbf{X}_d + \mathbf{Z}_d + \mathbf{Q}_d$  تعریف می گردد. همچنین داریم:

$$\hat{\mathbf{Y}}_d = \hat{\mathbf{H}}\mathbf{X}_d + \mathbf{N}_d \quad (۲۹-۲)$$

که در اینجا  $\mathbf{N}_d : iid$  با میانگین صفر و توان  $1 + \sigma_d^2 + P_d \sigma_e^2$  است که نویز گوسی می باشد که مستقل از  $\mathbf{X}_d$  نیست.

## صورت مسئله

در ابتدای این بخش نرخ قابل دسترس و ظرفیت لینک محاسبه می گردد سپس صورت مسئله بیان می شود. کران پایین برای نرخ قابل دسترس برای مدل سیستم بیان شده با توجه به مقالات به صورت زیر است:

$$R = \frac{T_d}{T} \mathcal{E} \{ \log_2 \det(\mathbf{I}_{N_r} + \rho_{eff} \hat{\mathbf{H}} \hat{\mathbf{H}}^H) \} \quad (30-2)$$

که در اینجا  $\rho_{eff} = P_d / (\sigma_d^2 + P_d \sigma_e^2)$  می باشد. علاوه بر این در ادامه ظرفیت لینک fronthaul را بدست می آید. در اینجا فرض بر این است که  $C_p$  ظرفیت بخش پایلوت و  $C_d$  ظرفیت داده در این لینک باشد در نتیجه ظرفیت کل لینک برابر است با  $\bar{C} = C_p + C_d$  که در اینجا

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{T_p N_r}{T} \log_2 \left( 1 + \frac{P_p \alpha + 1}{\sigma_p^2} \right) \\ C_d &= \frac{T_d N_r}{T} \log_2 \left( 1 + \frac{P_d \alpha + 1}{\sigma_d^2} \right) \end{aligned} \quad (31-2)$$

است. حال در این حالت، مجموع نرخ های قابل دسترس براساس محدودیت ظرفیت لینک fronthaul و محدودیت توان هر واحد رادیویی، بیشینه می گردد:

$$\begin{aligned} & \max_{P_d, P_p} \sum R(P_d) \\ & \text{subject to } \bar{P}_i \leq P_{max} \quad \forall i \\ & \bar{C}(P_d, P_p) \leq C^{th} \end{aligned} \quad (32-2)$$

## ۲-۳-۲ مدل سیستم دوم

در این قسمت مدل سیستم دیگری برای لینک فراسو در نظر گرفته شده است [۲۹، ۳۰، ۳۱]. در این مدل سیستم فرض بر این است که  $N$  تا واحد رادیویی داریم که  $K$  کاربر را سرویس دهی می کنند همچنین فرض بر این است که واحدهای رادیویی و کاربران تک آنتنه هستند. برخلاف مدل سیستم قبل، در این بخش یادگیری کانال و یا پایلوت در مدل سیستم بیان نمی شود و صرفاً مرحله ی پردازش داده مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین از خوشه بندی کاربران و واحدهای رادیویی صرف نظر می گردد. سیگنال دریافتی توسط  $n$  امین واحد رادیویی که با  $y_n$  نمایش می دهیم به وسیله ی معادله ی زیر بدست می آید:

$$y_n = \sum_{k=1}^K h_{n,k} \sqrt{p_k} s_k + z_n \quad (33-2)$$

که در اینجا،  $h_{n,k}$  مقدار کانال از  $k$  امین کاربر به  $n$  امین واحد رادیویی می باشد. علاوه بر این،  $p_k$  توان ارسالی کاربر  $k$  ام می باشد و  $s_k$  پیام کاربر  $k$  ام است. نیز  $z_n$  نویز گوسی جمع شونده ی دریافتی برای  $n$  امین واحد رادیویی است که دارای میانگین صفر و واریانس  $\sigma_n^2$  می باشد.  $z_n \sim \mathcal{N}(0, \sigma_n^2)$

همچنین همانطور که قبلاً گفته شده به دلیل محدودیت ظرفیت لینک fronthaul پیام دریافتی توسط واحد رادیویی فشرده شده و سپس از طریق این لینک به واحد کنترل ارسال می گردد. پیام فشرده شده به این صورت بیان می گردد.

$$\tilde{y}_n = y_n + q_n \quad (34-2)$$

که در اینجا  $q_n \sim \mathcal{N}(0, \sigma_q^2) \quad \forall n$  نویز گوسی جمع شونده می باشد. در نتیجه با توجه به رابطه ی (34-2)، نرخ انتقال پیام از  $n$  امین واحد رادیویی به واحد کنترل از طریق لینک fronthaul به شرح زیر است.

$$C_n = B \log_2 \left( 1 + \frac{\sum_{k=1}^K |h_{n,k}|^2 p_k}{\sigma_q^2} \right) \quad (35-2)$$

پیام فشرده شده پس از انتقال به واحد کنترل از طریق لینک با ظرفیت محدود، در این واحد کنترل به صورت خطی ترکیب می گردد تا بتوان سیگنال هر پیام را تخمین زد. در نتیجه برای بدست آوردن سیگنال  $s_k$  که توسط کاربر ارسال شده است از روش تشخیص MRC که همان ترکیب خطی بین پیامهای دریافتی است، استفاده می نماییم.

$$\hat{s}_k = \mathbf{w}_k^H \tilde{\mathbf{y}} \quad (36-2)$$

در معادله ی بالا،  $\mathbf{w}_k = [w_{1,k}, \dots, w_{N,k}]$  همان بردار تشخیص است که  $w_{i,k} = h_{i,k}^*$  می باشد. همچنین در اینجا بردار  $\tilde{\mathbf{y}}$  به حالت مقابل تعریف می شود،  $\tilde{\mathbf{y}} = [\tilde{y}_1, \dots, \tilde{y}_N]$  حال می توان معادله ی (36-2) را به شکل زیر بسط داد.

$$\begin{aligned} \hat{s}_k &= \underbrace{\mathbf{w}_k^H \mathbf{h}_k \sqrt{P_k} s_k}_{\text{(desired signal)}} \\ &+ \underbrace{\sum_{k=1, k \neq k}^K \mathbf{w}_k^H \mathbf{h}_j \sqrt{P_j} s_j}_{\text{(interference signal)}} \\ &+ \underbrace{\mathbf{w}_k^H (\mathbf{z} + \mathbf{q})}_{\text{(quantisation and additive noise)}} \end{aligned} \quad (37-2)$$

در معادله ی ذکر شده،  $\mathbf{h}_k$  بردار کانال از کاربر  $k$  ام به تمام واحدهای رادیویی است که می توان به صورت  $\mathbf{h}_k = [h_{1,k}, \dots, h_{N,k}]$  نوشت. به همین منوال،  $\mathbf{z} = [z_1, \dots, z_N]$  و نیز  $\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_N]$  می باشد.

## صورت مسئله

همان طور که می دانیم نرخ قابل دسترس برای  $k$  امین کاربر به این صورت بدست می آید.

$$R_k = B \log_2(1 + \gamma_k) \quad (38-2)$$

که  $\gamma_k$  همان SINR برای  $k$  امین کاربر می باشد. با توجه به معادله ی (37-2)،  $\gamma_k$  از رابطه ی زیر بدست می آید

$$\gamma_k = \frac{p_k |\mathbf{w}_k^H \mathbf{h}_k|^2}{\sum_{k=1, j \neq k}^K p_j |\mathbf{w}_k^H \mathbf{h}_j|^2 + (\sigma_n^2 + \sigma_q^2) \|\mathbf{w}_k\|^2} \quad (39-2)$$

همانطور که گفته شد نسبت مجموع نرخ ها در سیستم به کل توان ارسالی کاربرها نشان دهنده ی بازدهی انرژی است که با  $\eta$  نمایش داده می شود و می توان اینگونه بیان کرد

$$\eta(\mathbf{P}) = \frac{\sum_{k=1}^K R_k}{\sum_{k=1}^K p_k} = \frac{R_{total}(\mathbf{P})}{P_{UE}(\mathbf{P})}, \quad (40-2)$$

حال در این مسئله، هدف پیشینه سازی بازدهی انرژی با شروط زیر می باشد:

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{P}} \quad \eta(\mathbf{P}) \\ & \text{subject to} \quad \bullet \leq p_k \leq P_{max} \quad \forall k, \\ & \quad \quad \quad R_k \geq R_k^{th} \quad \forall k, \\ & \quad \quad \quad C_n \leq C_n^{th} \quad \forall i, \end{aligned} \quad (41-2)$$

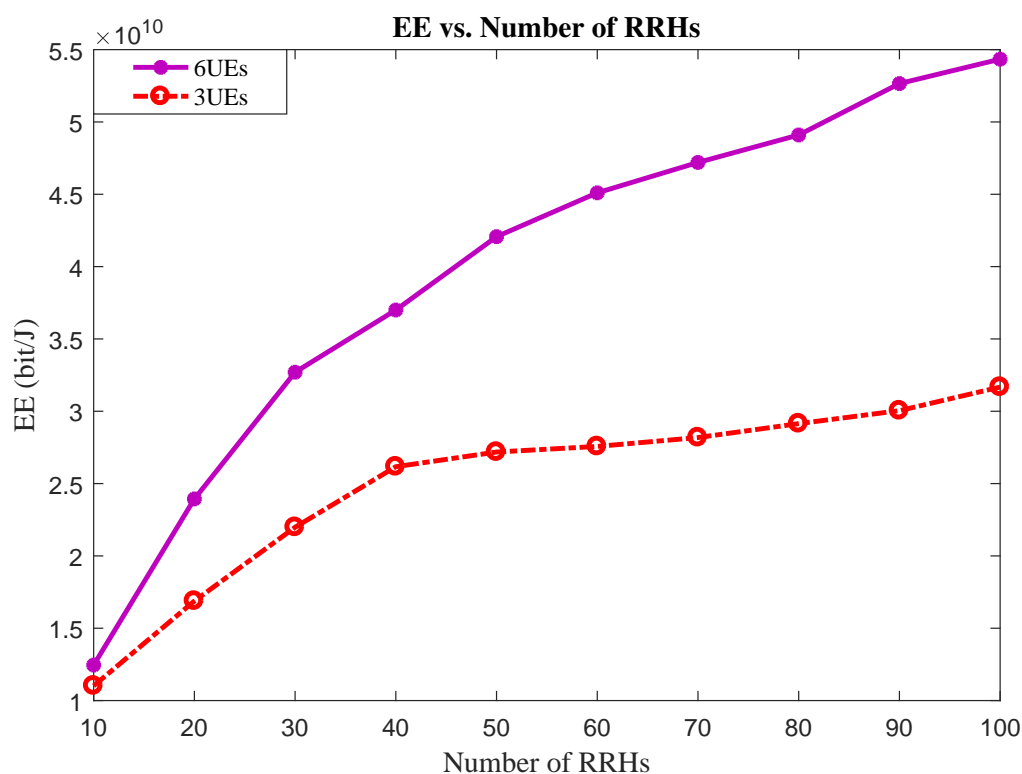
برای بدست آوردن توان بهینه، از تابع لاگرانژ و الگوریتم تکرار شونده استفاده می شود که در فصل ۳ به طور کامل شرح داده می شود.

## ۳-۳-۲ نتایج عددی

در این بخش، نتایج عددی الگوریتم مورد استفاده را برای سیستم با پرتو دهی MRT و پارامترهای بیان شده در جدول ۳-۲ [۲۹] بیان می شود.

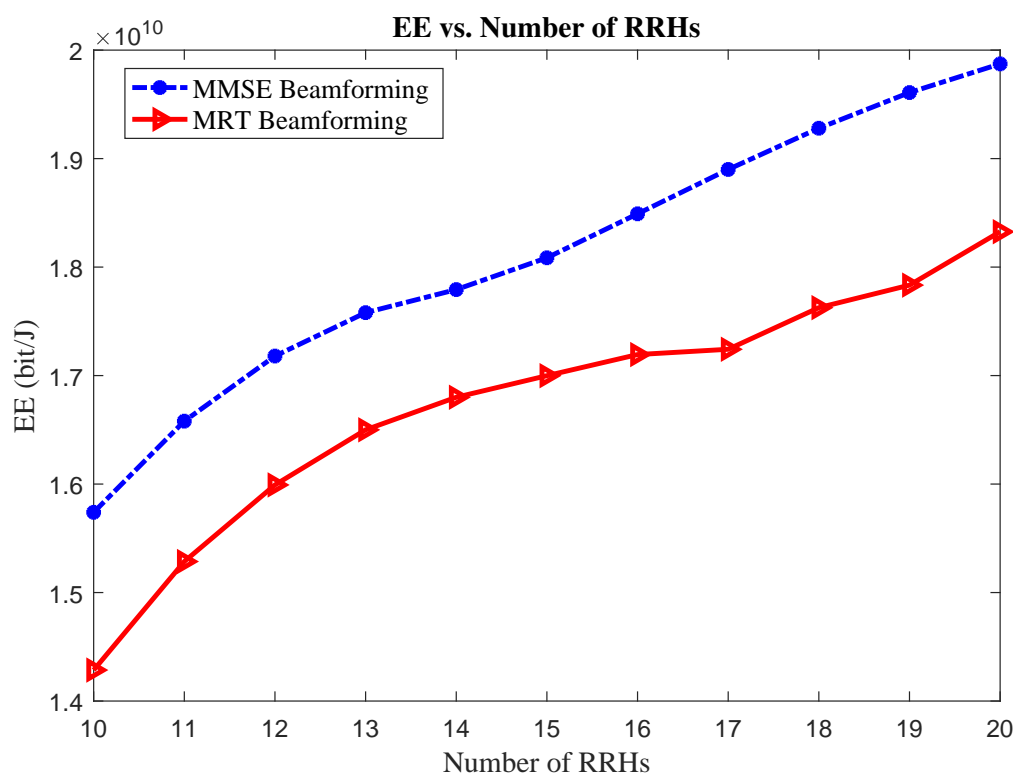
پارامترهای شبیه سازی: Table 2-2

Parameter	Value
Number of cluster S	1
The radius of the cell	500m
Noise power density	-174dBm/Hz
Bandwidth	1MHz
Maxmimun transmit Power	23dBm
Circuit Power of whole RRHs	10dBm
Minimum data rate	0.1bits/sec/Hz



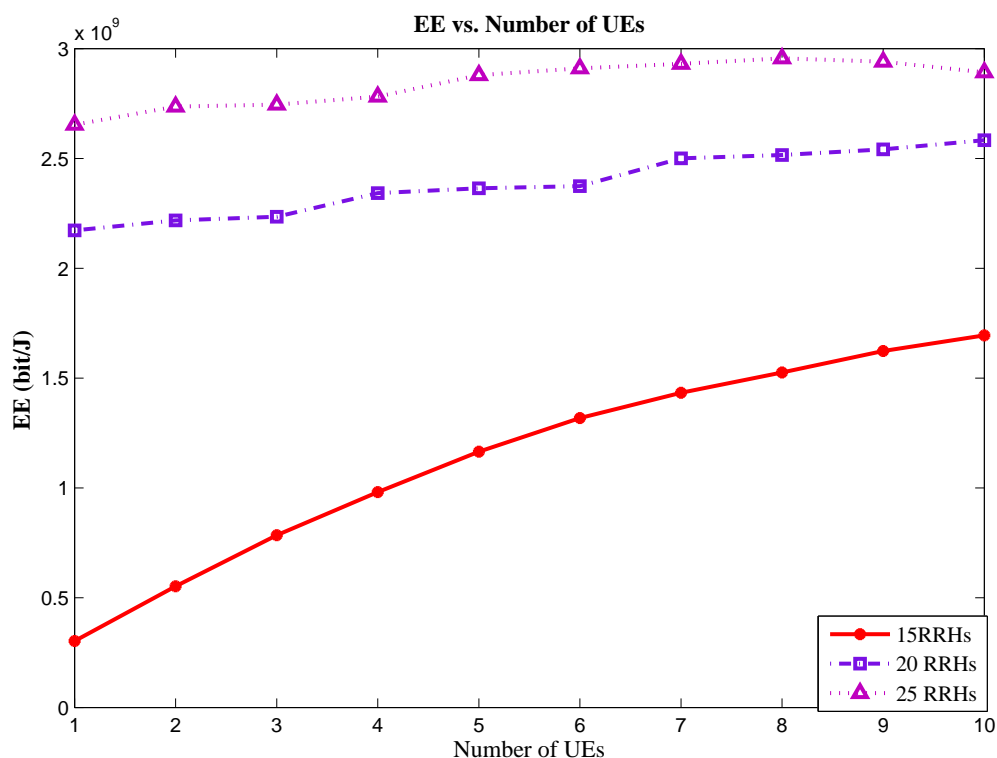
شکل ۲-۹: بازدهی انرژی برحسب تعداد واحدهای رادیویی برای یک خوشه برای ۲ کاربر متفاوت

حال بازدهی انرژی را برحسب تعداد واحدهای رادیویی برای یک خوشه با تعداد کاربران متفاوت در شکل (۲-۴) با فرض استفاده از پیش کدگذاری MRT رسم شده است. در این شکل فرض این است که ظرفیت محدود لینک fronthaul و همچنین خوشه بندی در نظر گرفته نشده است. همانطور که در شکل می بینید با افزایش تعداد واحدهای رادیویی، بازدهی انرژی بهبود می یابد.



شکل ۲-۱۰: بازدهی انرژی برحسب تعداد واحدهای رادیویی برای ۲ کاربر در دو حالت با پرتوهای متفاوت

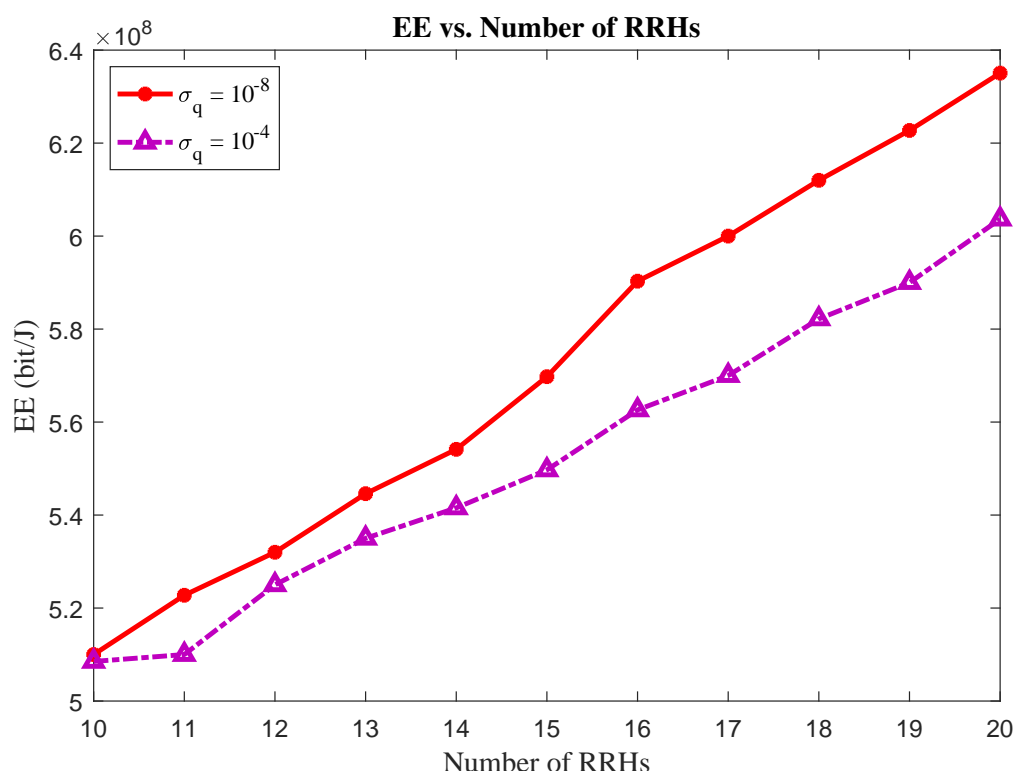
حال میزان بازدهی انرژی برحسب تعداد واحدهای رادیویی برای دو نوع پیش کدگذاری MRT و MMSE برای ۲ کاربر با فرض های گفته شده برای شکل قبلی، در شکل ۲-۱۰، رسم کرده ایم. با توجه به شکل، می توان فهمید که پیش کدگذاری MMSE، منجر به بازدهی انرژی بیشتری می گردد زیرا MRT اثر بیشتری در حذف نویز داشته در صورتی که MMSE تداخل را بهتر از بین می برد و در اینجا تاثیر نویز از تداخل کمتر است.



شکل ۲-۱۱: بازدهی انرژی برحسب تعداد کاربران برای یک خوشه برای ۳ مقدار متفاوت واحد های رادیویی

در شکل ۲-۱۱، بازدهی انرژی برحسب تعداد کاربران برای یک خوشه برای ۳ مقدار متفاوت واحد های رادیویی با فرض  $P_{max} = 10\text{dbm}$  رسم شده است. در این نمودار بیشینه ی ظرفیت محدود لینک fronthaul مقدار ۵ در نظر گرفته شده است و واریانس نویز کوانتیزاسیون  $10^{-8}$  می باشد. با افزایش کاربران، بازدهی انرژی زیاد می گردد و از جایی به بعد شیب افزایش آن رو به کاهش است که این کاهش به دلیل تداخل کاربران می باشد.





شکل ۲-۱۲: بازدهی انرژی برحسب تعداد واحدهای رادیویی برای ۲ کاربر در دو حالت با نویز کوانتیزاسیون متفاوت

حال میزان بازدهی انرژی برحسب تعداد واحدهای رادیویی در دو حالت با نویز کوانتیزاسیون متفاوت برای ۲ کاربر با فرض های گفته شده برای شکل قبلی، در شکل ۲-۱۲، رسم شده است. با توجه به شکل، می توان فهمید که بازدهی انرژی برای زمانی که میزان نویز کمتر است بیشتر می باشد.

### ۴-۳-۲ مقایسه ی روش های بیان شده

در این بخش، مدل سیستمهای مختلف در لینک فراسو با یکدیگر مقایسه می شوند. در هر دو مدل سیستم فشرده سازی و محدودیت لینک fronthaul مورد بررسی قرار گرفته شده است. همچنین در هر دو فرض شده که خوشه بندی صورت نگرفته است.

در مدل سیستم اول، سیگنال یادگیری کانال نیز در ابتدا ارسال می گردد تا بتوان کانال را تخمین زد. ولی در مدل سیستم دوم فرض بر این است که تخمین کانال از قبل صورت گرفته شده است و در مورد تخمین کانال صحبتی صورت نمی گیرد. همچنین در مدل سیستم دوم از ترکیب خطی <sup>۶</sup>MRC برای بازیابی سیگنال استفاده می گردد که در مدل سیستم اول مورد بررسی قرار نمی گیرد. در مدل سیستم اول، هدف ما، بیشینه سازی مجموع نرخهای قابل دسترس است در صورتی که در مدل سیستم دوم هدف بیشینه سازی بازدهی انرژی می باشد.

<sup>۶</sup>Maximum Ratio Combination

## ۴-۲ سیستم مخابراتی D2D

### ۱-۴-۲ مقدمه

در این بخش مدل سیستم دیگری بیان می شود که دارای سیستم مخابراتی D2D<sup>۷</sup> می باشد [۳۳، ۳۲]. سیستم D2D منجر می شود که ساختار C-RAN بازدهی طیفی بیشتر و تاخیر کمتری داشته باشد. در حال حاضر، تحقیقات زیادی در زمینه ی تخصیص منابع برای سیستم های مخابراتی D2D صورت گرفته است. حال در اینجا این مدل سیستم در ساختار C-RAN بررسی می شود [۳۴].

### ۲-۴-۲ مدل سیستم

در این ساختار، شبکه دارای  $N$  تا واحد رادیویی یا  $M$  آنتنه می باشد. همچنین این ساختار دارای  $K$  جفت کاربر D2D تک آنتنه می باشد که در هر جفت یکی فرستنده است که با  $T_x$  نمایش داده می شود و دیگری گیرنده می باشد که با  $R_x$  نمایش می دهیم. علاوه بر این فرض می شود واحد کنترل یا BBU pool به خوبی می تواند کانال را تخمین بزند. همچنین این مدل سیستم در دو وضعیت C-RAN و D2D کار می کند که در بازه های زمانی مختلف در وضعیت های مختلف عمل می کند. فرض کنید در بازه ی زمانی  $[t, t+1)$  سیگنال ارسالی از  $k$  امین کاربر فرستنده ی  $T_x$ ، در وضعیت C-RAN به صورت مقابل می باشد

$$\begin{aligned} y_k^C(t) = & \sum_{n=1}^N \mathbf{v}_{n,k}^H(t) \mathbf{g}_{n,k}^C(t) \sqrt{p_k(t)} s_k(t) \\ & + \sum_{n=1}^N \sum_{l \neq k}^K \mathbf{v}_{n,k}^H(t) \mathbf{g}_{n,l}^C(t) \sqrt{p_l(t)} s_l(t) \\ & + \sum_{n=1}^N \mathbf{v}_{n,k}^H(t) z_n(t) \end{aligned} \quad (۴۲-۲)$$

که در اینجا،  $\mathbf{v}_{n,k} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  نشان دهنده ی بردار پرتو دهی بین کاربر  $k$  ام و واحد رادیویی  $n$  ام می باشد.

می باشد. همچنین  $\mathbf{g}_{n,k}^C(t) \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  بردار کانال بین کاربر  $k$  ام و واحد رادیویی  $n$  ام است.  $z_n(t) \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2 \mathbf{I}_M)$  نیز، بردار نویز گوسی است. علاوه بر این،  $p_k(t)$  و  $s_k(t)$  به ترتیب نشان دهنده ی توان ارسالی و سیگنال ارسالی از کاربر  $k$  می باشد. در این وضعیت، نرخ قابل دسترسی از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$R_k^C(t) = \log_2 \left( 1 + \frac{p_k(t) |\mathbf{v}_k^H(t) \mathbf{g}_k^C(t)|^2}{\sum_{l \neq k}^K p_l(t) |\mathbf{v}_k^H(t) \mathbf{g}_l^C(t)|^2 + \sigma^2 \|\mathbf{v}_k\|_2^2} \right) \quad (۴۳-۲)$$

که در اینجا،  $\mathbf{v}_k \in \mathbb{C}^{NM \times 1}$  بردار پرتو دهی برای کاربر  $k$  می باشد که به صورت

<sup>۷</sup>Device-to-Device

واحد های رادیویی است. همچنین  $\mathbf{v}_k^C(t) = [\mathbf{v}_{\setminus,k}^C(t)^T, \dots, \mathbf{v}_{N,k}^C(t)^T]^T$  است. همچنین  $\mathbf{g}_k^C(t) \in \mathbb{C}^{NM \times 1}$  بردار کانال بین کاربر  $k$  ام و که به صورت  $\mathbf{g}_k^C(t) = [\mathbf{g}_{\setminus,k}^C(t)^T, \dots, \mathbf{g}_{N,k}^C(t)^T]^T$  می باشد. به صورت مشابه، سیگنال دریافتی توسط کاربر  $R_x$  در حالت D2D به صورت مقابل می باشد:

$$y_i^D(t) = g_{i,i}^D(t) \sqrt{p_i(t)} s_i(t) + \sum_{j \neq i}^K g_{j,i}^D(t) \sqrt{p_j(t)} s_j(t) + \phi_i(t) \quad (44-2)$$

که در اینجا  $g_{i,i}^D$  بردار کانال بین  $i$  امین جفت فرستنده و گیرنده ی D2D می باشند. همچنین  $\phi_i(t) \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$  نویز گوسی است. نرخ قابل دسترس در اینجا از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$R_k^D(t) = \log_2 \left( 1 + \frac{p_i(t) |g_{i,i}^D(t)|^2}{\sum_{j \neq i}^K p_j(t) |g_{j,i}^D(t)|^2 + \sigma^2} \right) \quad (45-2)$$

برای انتخاب وضعیت های متفاوت در بازه ی زمانی  $t$  برای جفت کاربر  $k$  از رابطه ی زیر استفاده می شود.

$$x_k(t) = \begin{cases} 0, & \text{C-RAN mode} \\ 1, & \text{D2D mode} \end{cases}$$

بنابراین با توجه به رابطه ی بالا نرخ قابل دسترس برای  $k$  امین جفت کاربر به صورت زیر بدست می آید:

$$R_k(t) = (1 - x_k(t)) R_k^C(t) + x_k(t) R_k^D(t) \quad (46-2)$$

میانگین نرخ قابل دسترس برای  $k$  امین جفت D2D از رابطه ی مقابل بدست می آید:

$$\bar{R}_k = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \mathbb{E}\{R_k(t)\} \quad (47-2)$$

حال در اینجا هدف، پیشینه سازی مجموع میانگین نرخ قابل دسترس با شروطی که بیان می گردد، می

باشد که در ادامه نمایش داده شده است.

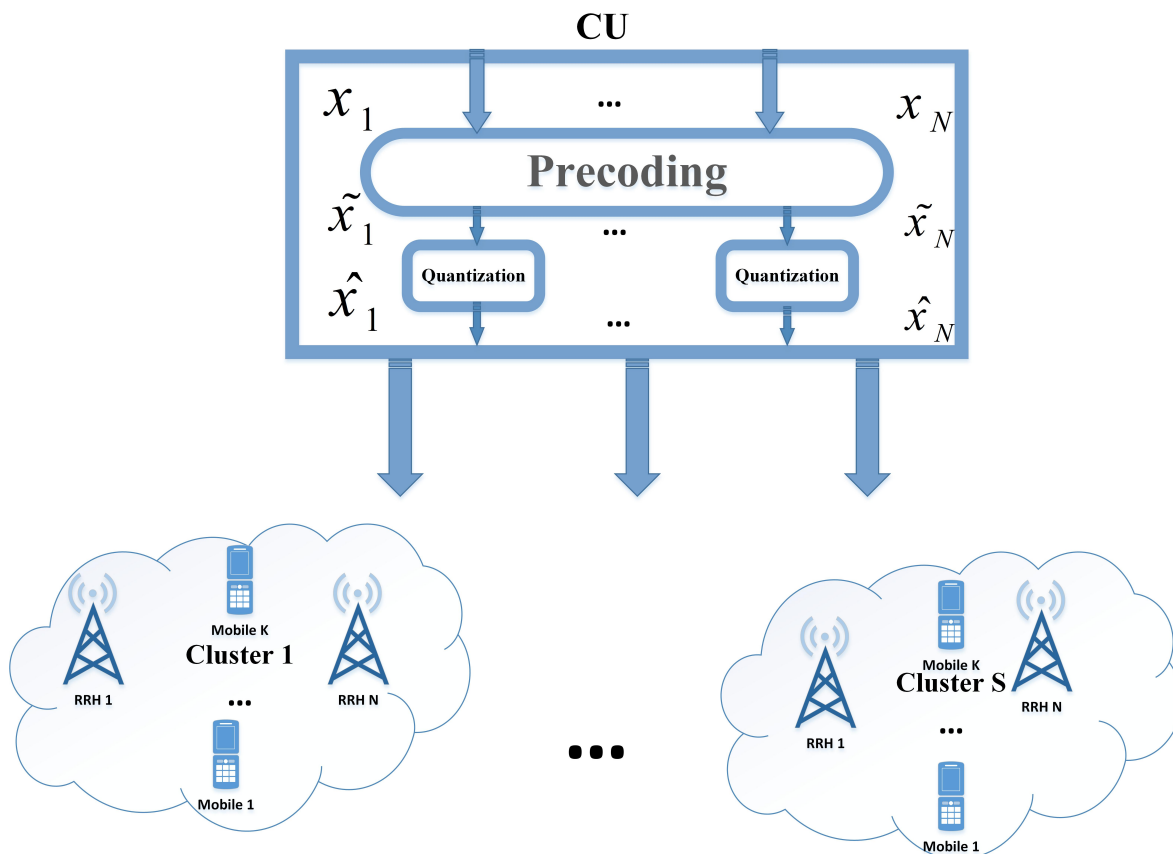
$$\begin{aligned}
 & \max_{\mathbf{p}(t), \mathbf{x}(t)} \sum_{k=1}^K (\bar{R}_k) \\
 \text{subject to} \quad & 0 \leq p_k \leq P_{max} \quad \forall k, \\
 & \sum_{k=1}^K x_k(t) p_k(t) \leq P_{max}^k \quad \forall k, \\
 & x_k(t) \in \{0, 1\} \quad \forall i, k
 \end{aligned} \tag{۴۸-۲}$$

## ۵-۲ نتیجه گیری

در این فصل ابتدا لینک فروسو و سپس لینک فراسو را مورد بررسی قرار گرفته است. در لینک فروسو سه مدل سیستم متفاوت بررسی شده اند که در فصل بعدی دو مدل سیستم اول را با یکدیگر ادغام کرده و مدل سیستم جدیدی بیان می شود. همچنین در لینک فراسو نیز دو مدل سیستم متفاوت بیان شده است که در ادامه ی فصل سوم مدل سیستمی شامل چندین خوشه به همراه لینک محدود fronthaul تعریف می شود. در قسمت آخر این فصل، مدل سیستم D2D معرفی شده که در حال حاضر می توان در این زمینه، کارهای نوینی انجام داد.

## فصل سوم

# تخصیص منابع در شبکه های دسترسی رادیویی ابری دارای ظرفیت محدود در لینک fronthaul



شکل ۳-۱: ساختار C-RAN در لینک فروسو.

### ۱-۳ مقدمه

در این فصل، هدف تخصیص منابع در شبکه های دسترسی رادیویی ابری است که برای دو حالت لینک فراسو و لینک فروسو در نظر گرفته شده است. در اینجا فرض بر این است که واحدهای رادیویی، به صورت توزیع شده و مشارکتی همانند MIMO، پیام را دریافت و یا ارسال می کنند که شبکه های دسترسی رادیویی ابری با مشارکت توزیع شده را ایجاد می نمایند. برای استفاده از مزایای سیستمهای C-RAN و MIMO، از سیستم MIMO C-RAN به طور همزمان استفاده می گردد که منجر به بهبود نرخ و بازدهی انرژی EE می گردد. با استفاده از سیستم های MIMO، می توان به نرخ داده ی بیشتری رسید. برای در نظر گرفتن لینک عملی بین واحد کنترل و واحد رادیوییها، که Fronthaul نامیده می شود، ظرفیت لینک Fronthaul محدود در نظر گرفته می شود. بنابراین، سیگنالی که از لینک Fronthaul عبور می کند نیاز به فشرده سازی دارد.

در ادامه مدل سیستم برای لینک فروسو و فراسو بیان می شود. فرض مسئله بر این است که سیستم به صورت چند آنتنه (MIMO) می باشد و ظرفیت Fronthaul محدود است. همچنین، سیستم دارای چندین خوشه یا سلول که در هر خوشه، تعدادی واحد رادیویی و تعدادی کاربر قرار دارد [۳۵، ۹]. هدف، بدست آوردن بیشینه بازدهی انرژی می باشد.

در حالت لینک فروسو، پیام، پیش کدگذاری شده است و سپس فشرده سازی بر روی آن صورت گرفته است و از طریق لینک Fronthaul به واحد رادیویی منتقل می شود تا پیام را به کاربران ارسال کنند

[۸، ۱۷، ۱۸].

در حالت لینک فراسو، سیگنال از کاربران به واحدهای رادیویی منتقل شده و سپس پیام فشرده شده و به دست واحد کنترل می رسد؛ تا با استفاده از روش های ترکیب کردن<sup>۱</sup>، پیام ارسالی کاربران بازیابی شود.

### ۳-۲ لینک فروسو

در این بخش، لینک فروسو برای سیستم MIMO C-RAN در نظر گرفته شده است که واحد کنترل، پیام را پیش کدگذاری کرده سپس سیگنال پیش کدگذاری شده را فشرده می کند. سیگنال فشرده شده ی نهایی توسط لینک Fronthaul با ظرفیت محدود منتقل می گردد [۳۶]. فرض بر این است که واحدهای رادیویی و کاربران خوشه بندی شده اند به طوری که در هر خوشه تعدادی واحد رادیویی است که به کاربران موجود در آن خوشه، سرویس دهی می کنند. در این سیستم، فرستنده می بایست اطلاعات حالت کانال را بداند (CSIT). از آنجایی که CSIT با کمی خطا با ارسال پایلوت در لینک فراسو بدست می آید، به همین دلیل فرض در اینجا به این صورت است که تخمین CSIT، همراه با خطای مشخص است. در واحد کنترل، از پیش کدگذاری از نوع MMSE برای کاهش تداخل بین کاربران و بهبود عملکرد سیستم استفاده می گردد. همچنین، ابتدا نرخ قابل دسترسی را با توجه به ظرفیت محدود Fronthaul، بدست می آوریم. سپس توان تخصیص داده را بهینه می کنیم تا EE به مقدار بهینه ی خود برسد. در ادامه، ابتدا مدل سیستم و سپس نرخ قابل دسترسی بیان شده و مسئله ی تخصیص توان بررسی می گردد [۳۷].

#### ۳-۲-۱ مدل سیستم

لینک فروسو سیستم MIMO C-RAN شامل  $R$  واحد رادیویی می باشد که  $D$  کاربر تک آنتنه را سرویس می دهند. فرض بر این است که کاربران و واحدهای رادیویی، به  $S$  تا خوشه تقسیم شده اند که  $v$  امین خوشه، دارای  $R_v$  واحد رادیویی است که  $D_v$  کاربر را سرویس دهی می کنند [۹]. همچنین، فرض بر این است که  $j$  امین واحد رادیویی، در  $v$  امین خوشه، توسط لینک فیبر نوری با ظرفیت محدود  $C_{R(v,j)}$  به CU متصل می گردد. در نتیجه داریم:

$$\begin{aligned}\mathcal{R}_v &= \{r_{(v,i)} | 1 \leq i \leq R_v, i \in \mathbb{Z}^+\}, \\ \mathcal{C}_{\mathcal{R}_v} &= \{C_{r_{(v,j)}} | 1 \leq j \leq R_v, j \in \mathbb{Z}^+\}, \\ \mathcal{D}_v &= \{d_{(v,k)} | 1 \leq k \leq D_v, k \in \mathbb{Z}^+\},\end{aligned}\tag{۱-۳}$$

که  $\mathcal{R}_v$ ،  $\mathcal{C}_{\mathcal{R}_v}$  و  $\mathcal{D}_v$  به ترتیب نشان دهنده ی دسته ی واحدهای رادیویی، دسته ی ظرفیت لینک Fronthaul و دسته ی کاربران در  $v$  امین دسته ی خوشه می باشد. در واحد کنترل، ما روش فشرده سازی بعد از پیش کدگذاری و سپس ارسال را اعمال کرده ایم. هر کاربر همزمان تداخل بین خوشه ها و داخل یک خوشه را همزمان دریافت می کنند.

<sup>۱</sup>combining

### ۲-۲-۳ آنالیز نرخ قابل دسترس

در این زیربخش، نرخ قابل دسترسی سیستم بررسی می گردد.

**قضیه ۲-۳-۱.** نرخ قابل دسترسی برای کاربر  $d_{(s,k)}$  به صورت زیر می باشد:

$$\mathfrak{R}_{d_{(s,k)}} = B \log_2(1 + \gamma_{d_{(s,k)}}), \quad (2-3)$$

که  $B$  پهنای باند کانال و  $\gamma_{d_{(s,k)}}$  همان  $SINR$  دریافتی  $k$ امین کاربر در  $s$ امین دسته ی خوشه است که به صورت زیر بیان می گردد.

$$\gamma_{d_{(s,k)}} = \frac{p_{d_{(s,k)}} |h_{\mathcal{R}_s, d_{(s,k)}}^H w_{\mathcal{R}_s, d_{(s,k)}}|^2}{I_{d_{(s,k)}} + BN}. \quad (3-3)$$

در فرمول (۴-۱۰)،  $I_{d_{(s,k)}}$  نشان دهنده ی توان سیگنال تداخلی است.  $BN$  نشان دهنده ی توان نویز است و  $h_{\mathcal{R}_s, d_{(s,k)}}$  نشان دهنده ی بردار کانال بین  $k$ امین کاربر و واحدهای رادیویی  $s$  امین دسته ی خوشه می باشد. همچنین  $w_{\mathcal{R}_s, d_{(s,k)}}$  نشان دهنده ی بردار پیش کدگذاری استفاده شده در  $s$ امین دسته ی خوشه ها برای  $k$ امین کاربر می باشد.  $p_{d_{(s,k)}}$  توان ارسالی واحدهای رادیویی است که به  $k$ امین کاربر در  $s$ امین دسته ی خوشه ارسال می گردد.

**برهان.** فرض کنید  $y_{\mathcal{D}_s}$  یک بردار  $1 \times D_s$  باشد که نشان دهنده ی سیگنال دریافتی توسط دسته ای از کاربران در  $s$  امین خوشه باشد که به صورت زیر بدست می آید.

$$y_{\mathcal{D}_s} = \sum_{v=1}^S H_{\mathcal{R}_v, \mathcal{D}_s}^H \hat{x}_{\mathcal{R}_v} + z_{\mathcal{D}_s}, \quad (4-3)$$

که  $\hat{x}_{\mathcal{R}_v} = [\hat{x}_{r_{(v,1)}}, \dots, \hat{x}_{r_{(v, \mathcal{R}_v)}}]^T \in \mathbb{C}^{\mathcal{R}_v}$  بردار سمبل ارسالی خوشه ی  $v$  ام می باشد.  $z_{\mathcal{D}_s} \sim \mathcal{N}(\cdot, N \cdot I_{D_s})$  نویز گوسی سفید اضافه شونده می باشد که دارای توان  $N$  و  $H_{\mathcal{R}_v, \mathcal{D}_s} = N$ . نشان دهنده ی ماتریس کانال بین واحدهای رادیویی  $[\mathbf{h}_{\mathcal{R}_v, d_{(s,1)}}, \dots, \mathbf{h}_{\mathcal{R}_v, d_{(s, D_s)}}]^T \in \mathbb{C}^{\mathcal{R}_v \times D_s}$  در دسته ی  $\mathcal{R}_v$  و کاربران  $\mathcal{D}_s$  می باشد. بردار کانال از واحدهای رادیویی خوشه ی  $v$  به  $k$  امین کاربر در خوشه ی  $s$  ام  $\mathbf{h}_{\mathcal{R}_v, d_{(s,k)}} \in \mathbb{C}^{\mathcal{R}_v}$  به صورت زیر مدل می شود [۲۱]

$$\mathbf{h}_{\mathcal{R}_v, d_{(s,k)}} = \beta_{\mathcal{R}_v, d_{(s,k)}}^{\frac{1}{\alpha}} \mathbf{g}_{\mathcal{R}_v, d_{(s,k)}}, \quad (5-3)$$

که  $\mathbf{g}_{\mathcal{R}_v, d_{(s,k)}} \sim \mathcal{N}(\cdot, N \cdot I_{D_s})$  نشان دهنده ی بردار کانال محوشدگی سریع و مسطح می باشد و  $\beta_{\mathcal{R}_v, d_{(s,k)}} = \text{diag}(a_{r_{(v,1)}, d_{(s,k)}}, \dots, a_{r_{(v, \mathcal{R}_v)}, d_{(s,k)}})$  نشان دهنده ی محوشدگی در مقیاس بزرگ می



باشد. همچنین سیگنال ارسالی تحت فشرده سازی به صورت زیر است

$$\hat{\mathbf{x}}_{\mathcal{R}_v} = \tilde{\mathbf{x}}_{\mathcal{R}_v} + \mathbf{Q}_{\mathcal{R}_v}, \quad (6-3)$$

که در اینجا  $\mathbf{Q}_{\mathcal{R}_v} = [q_{r(v,1)}, \dots, q_{r(v,R_v)}]^T$  نشان دهنده ی بردار نویز کوانتیزاسیون می باشد که به دلیل فشرده سازی بعد از پیش کدگذاری در واحد کنترل ایجاد می گردد که دارای توزیع  $q_{M(t,i)} \sim \mathcal{N}(\cdot, \sigma_{q(t,i)}^2)$  است. علاوه بر این،

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\mathcal{R}_v} = \mathbf{W}_{\mathcal{R}_v, \mathcal{D}_v} \mathbf{P}_{\mathcal{D}_v}^{\frac{1}{2}} \mathbf{x}_{\mathcal{D}_v},$$

نشان دهنده ی پیام پیش کدگذاری شده قبل از فشرده سازی می باشد. همانطور که گفته شده بود، فرض بر این است که بردار کانال را می دانیم و همراه با خطا بدست آمده است؛ کانال همراه با خطا به صورت زیر مدل شده است:

$$\hat{\mathbf{h}}_{\mathcal{R}_v, d(s,k)} = \mathbf{h}_{\mathcal{R}_v, d(s,k)} + \Delta \mathbf{h}_{\mathcal{R}_v, d(s,k)},$$

$\Delta \mathbf{h}_{\mathcal{R}_v, d(s,k)}$  نشان دهنده ی بردار خطای تخمین زده شده است که دارای توزیع گوسی به صورت

$$\Delta \mathbf{h}_{\mathcal{R}_v, d(s,k)} \sim \mathcal{N}(\cdot, \phi_{\mathcal{R}_v, d(s,k)}^2),$$

است که داریم

$$\phi_{\mathcal{R}_v, d(s,k)} = \text{diag}(\phi_{r(v,1), d(s,k)}, \dots, \phi_{r(v, R_v), d(s,k)}).$$

با استفاده از پیش کدگذاری MMSE، ماتریس پیش کدگذاری به صورت زیر است [۳۸]

$$\mathbf{W}_{\mathcal{R}_s, \mathcal{D}_s} = \hat{\mathbf{H}}_{\mathcal{R}_s, \mathcal{D}_s} (\hat{\mathbf{H}}_{\mathcal{R}_s, \mathcal{D}_s}^H \hat{\mathbf{H}}_{\mathcal{R}_s, \mathcal{D}_s} + \alpha \mathbf{I}_{D_s})^{-1}, \quad (7-3)$$

همچنین  $\alpha$ ، فاکتور رگولاریزاسیون است بنابراین،  $I_{d(s,k)}$  را که توان تداخلی بر روی کاربر بود به صورت

زیر می توان تخمین زد.

$$\begin{aligned}
 I_{d(s,k)} = & \underbrace{\sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^{D_s} |h_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,l)}|^2 p_{d(s,l)}}_{\text{(intra-cluster interference)}} \\
 & + \underbrace{\sum_{\substack{v=1 \\ v \neq s}}^S \sum_{l=1}^{D_v} |h_{\mathcal{R}_v, d(s,k)}^H \mathbf{w}_{\mathcal{R}_v, d(v,l)}|^2 p_{d(v,l)}}_{\text{(inter-cluster interference)}} \\
 & + \underbrace{\sum_{v=1}^S \sum_{i=1}^{R_v} \sigma_{q_{r(v,i)}}^2 |h_{r(v,i), d(s,k)}|^2}_{\text{(quantization noise interference)}}.
 \end{aligned} \tag{۸-۳}$$

□

### ۳-۲-۳ بهینه سازی تخصیص توان

می دانیم که توان سیگنال ارسالی توسط  $i$ امین واحد رادیویی در  $s$ امین خوشه به صورت زیر می باشد :

$$\bar{p}_{r(s,i)} = E[||\hat{x}_{\mathcal{D}_v}||^2], \tag{۹-۳}$$

با قرار دادن رابطه ی (۶-۳) در (۹-۳)، توان سیگنال ارسالی به این صورت بدست می آید:

$$\bar{p}_{r(s,i)} = \mathbf{w}_{r(s,i), \mathcal{D}_s} \mathbf{P}_{\mathcal{D}_s}^{\frac{1}{2}} \mathbf{P}_{\mathcal{D}_s}^{H \frac{1}{2}} \mathbf{w}_{r(s,i), \mathcal{D}_s}^H + \sigma_{q(s,i)}^2. \tag{۱۰-۳}$$

در نتیجه نرخ قابل دسترس بر روی لینک fronthaul، بین واحد کنترل و  $i$ امین واحد رادیویی در  $t$ امین خوشه به صورت زیر بدست می آید

$$C_{r(t,i)} = \log \left( 1 + \frac{\mathbf{w}_{r(s,i), \mathcal{D}_s} \mathbf{P}_{\mathcal{D}_s}^{\frac{1}{2}} \mathbf{P}_{\mathcal{D}_s}^{H \frac{1}{2}} \mathbf{w}_{r(s,i), \mathcal{D}_s}^H}{\sigma_{q(s,i)}^2} \right), \tag{۱۱-۳}$$

شرح مسئله

نسبت مجموع نرخ ها در سیستم به کل توان ارسالی واحدهای رادیویی نشان دهنده ی بازدهی انرژی است که یکی از مهم ترین پارامترها در انتخاب تکنولوژی می باشد که با  $\eta$  نمایش داده می شود و می

توان اینگونه بیان کرد

$$\eta(\mathbf{P}) := \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^{D_s} \mathfrak{R}_{d(s,k)}}{\sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^{R_s} \bar{p}_{r(s,i)}} = \frac{R_{total}(\mathbf{P})}{P_{RRH}(\mathbf{P})}, \quad (12-3)$$

که در اینجا  $\mathbf{P} = \{P_{\mathcal{D}_s} | 1 \leq s \leq S, s \in \mathbb{Z}^+\}$  ماتریس تخصیص توان است. در این بخش، بیشینه سازی بازدهی انرژی با شروط زیر مورد بررسی قرار می گیرد

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{P}} \quad \eta(\mathbf{P}) \\ & \text{subject to} \quad \bar{p}_{r(s,i)} \leq P_{max} \quad \forall s, \forall i, \\ & \quad \mathfrak{R}_{d(s,k)} \geq \mathfrak{R}_{d(s,k)}^{th} \quad \forall s, \forall k, \\ & \quad C_{r(s,i)} \leq C_{r(s,i)}^{th} \quad \forall s, \forall i, \\ & \quad p_{d(s,k)} \geq 0 \quad \forall s, \forall k, \end{aligned} \quad (13-3)$$

از آنجایی که این یک مسئله ی محدب نیست، با روش الگوریتم تکرار شونده ، مقدار توان بهینه را بدست می آوریم [39].

#### ۴-۲-۳ روش مورد استفاده

در این قسمت، به جای ماکسیمم کردن (12-3)، مسئله ی معادل آن را با الگوریتم تکرار شونده حل می کنیم

قضیه ۴-۲-۳. مقدار ماکسیمم  $\eta^*$  تنها زمانی بدست می آید که

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{P}} (R_{total}(\mathbf{P}) - \eta^* P_{RRH}(\mathbf{P})) = \\ & R_{total}(\mathbf{P}^*) - \eta^* P_{RRH}(\mathbf{P}^*) = 0, \end{aligned} \quad (14-3)$$

که  $\{P\}$  یک پاسخ امکان پذیر برای مسئله ی (13-3) باشد [40].

□

برهان. اثبات این قضیه با روش مشابه در مقاله ی [40] حل شده است.

برای حل مسئله ی بهینه سازی (4-20)، از تابع لاگرانژ استفاده می کنیم [39] که توسط الگوریتم

تکرار شونده بدست می آید. برای ساده سازی کران بالا برای تداخل (۴-۴)، به این صورت بدست می آید

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{d(s,k)} &= \sum_{v=1}^S P_{max} \| \mathbf{h}_{\mathcal{R}_v, d(s,k)} \mathbf{w}_{\mathcal{R}_v, d(s,k)} \|^2, \\ &+ \sum_{v=1}^S \sum_{i=1}^{R_v} \sigma_{q_{r(v,i)}}^2 |h_{r(v,i), d(s,k)}|^2. \end{aligned} \quad (۱۵-۳)$$

بنابراین، برای بدست آوردن توان بهینه کران پایینی برای نرخ بدست می آید

$$\tilde{\mathfrak{R}}_{d(s,k)} = B \log_2(1 + \tilde{\gamma}_{d(s,k)}), \quad (۱۶-۳)$$

که  $\tilde{\gamma}_{d(s,k)}$  به صورت زیر است

$$\tilde{\gamma}_{d(s,k)} = \frac{p_{d(s,k)} |\mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}|^2}{\tilde{I}_{d(s,k)} + BN}; \quad (۱۷-۳)$$

همانطور که قبلا بیان شد، الگوریتم تکرار شونده برای بهینه سازی مورد استفاده قرار می گیرد که براساس ضرایب تابع لاگرانژ می باشد

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\mathbf{P}; \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\kappa}) &= \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^{\mathcal{D}_s} \tilde{\mathfrak{R}}_{d(s,k)} - \eta \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^{\mathcal{R}_s} \bar{p}_{r(s,i)} \\ &+ \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^{\mathcal{D}_s} \lambda_{d(s,k)} (\tilde{\mathfrak{R}}_{d(s,k)} - \mathfrak{R}_{d(s,k)}^{th}) \\ &- \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^{\mathcal{R}_s} \mu_{r(s,i)} (\bar{p}_{r(s,i)} - P_{max}) \\ &- \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^{\mathcal{R}_s} \kappa_{r(s,i)} (C_{r(s,i)} - C_{r(s,i)}^{th}). \end{aligned} \quad (۱۸-۳)$$

که در اینجا،  $\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\kappa} \geq 0$  بردارهای ضرایب لاگرانژ می باشد. با استفاده از این معادله، توان بهینه به صورت زیر بدست می آید

$$p_{d(s,k)}^* = \left[ \frac{B(1 + \lambda_{d(s,k)})}{\ln 2 \times (\iota_{d(s,k)} + \chi_{d(s,k)})} - \frac{\tilde{I}_{d(s,k)} + BN}{\nu_{d(s,k)}} \right]^+; \quad (۱۹-۳)$$

که داریم

$$\nu_{d(s,k)} = |\mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}|^2,$$

$$\iota_{d(s,k)} = \sum_{i=1}^{\mathcal{R}_s} (\mu_{r(s,i)} + \eta) (w_{r(s,i),d(s,k)} w_{r(s,i),d(s,k)}^*),$$

$$\chi_{r(s,i)} \approx \sum_{k=1}^{\mathcal{R}_s} \frac{\kappa_{r(s,i)}}{\ln 2} \frac{(w_{r(s,i),d(s,k)} w_{r(s,i),d(s,k)}^*)}{P_{max}}.$$

در آخر، برای بدست آوردن توان بهینه، الگوریتم (۱) مورد استفاده قرار می گیرد [۴۰]

---

**Algorithm 1** Energy-Efficient Power Allocation

---

Set the maximum number of iterations  $I_{max}$ , convergence condition  $\epsilon_\eta$  and the initial value  $\eta^{(1)} = 0$

Set the iteration index  $i = 1$  and begin the iteration (Outer Loop).

**for**  $1 \leq i \leq I_{max}$  **do**

Solve the resource allocation problem with  $\eta^{(i)}$  (Inner Loop);

Obtain  $P^{(i)}, R_{total}^{(i)}, P_{RRH}^{(i)}$

**if**  $R_{total}(\mathbf{P}^{(i)}) - \eta^{(i)} P_{RRH}(\mathbf{P}^{(i)}) < \epsilon_\eta$  **then**

Set  $\mathbf{P}^* = \mathbf{P}^{(i)}$  and  $\eta^* = \eta^{(i)}$ ;

break;

**else**

Set  $\eta^{(i)} = \frac{R_{total}(\mathbf{P}^{(i)})}{P_{RRH}(\mathbf{P}^{(i)})}$  and  $i = i + 1$ ;

**end if**

**end for**

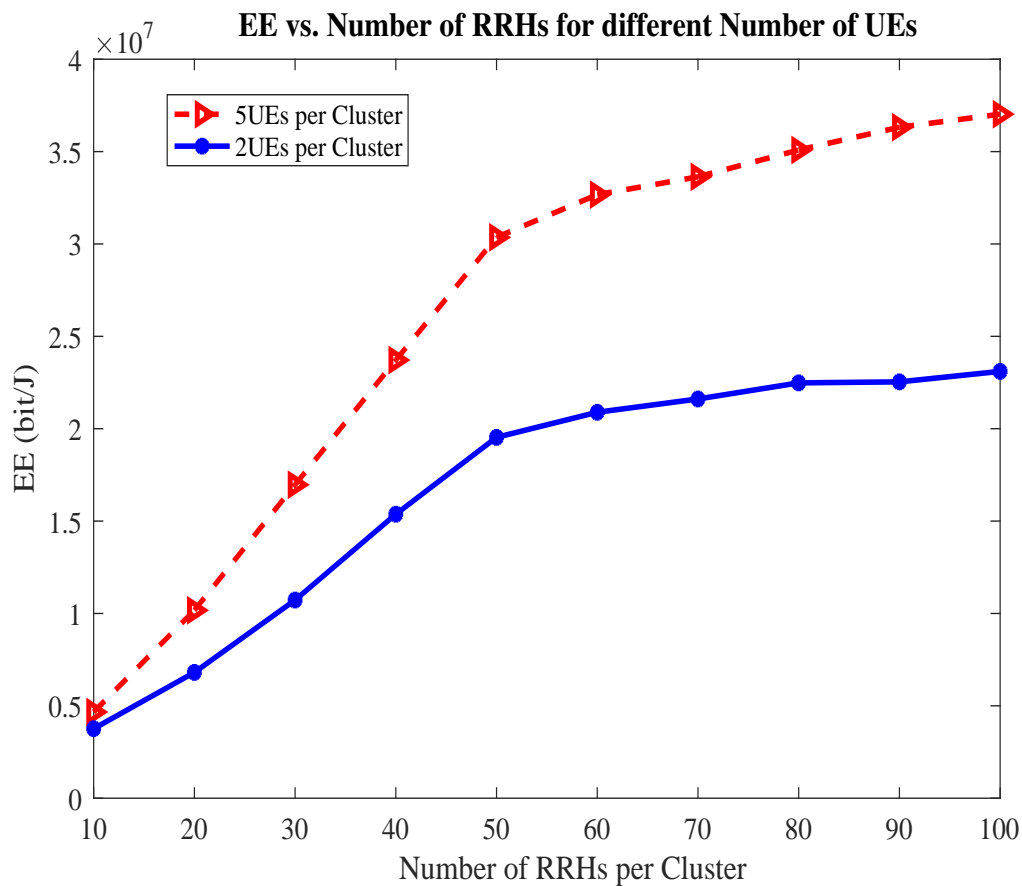
---

### ۵-۲-۳ نتایج عددی

در این بخش، نتایج عددی الگوریتم مورد استفاده برای سیستم MIMO C-RAN با پارامترهای بیان شده در جدول ۳-۱ بیان می شود.

پارامترهای شبیه سازی: Table 3-1

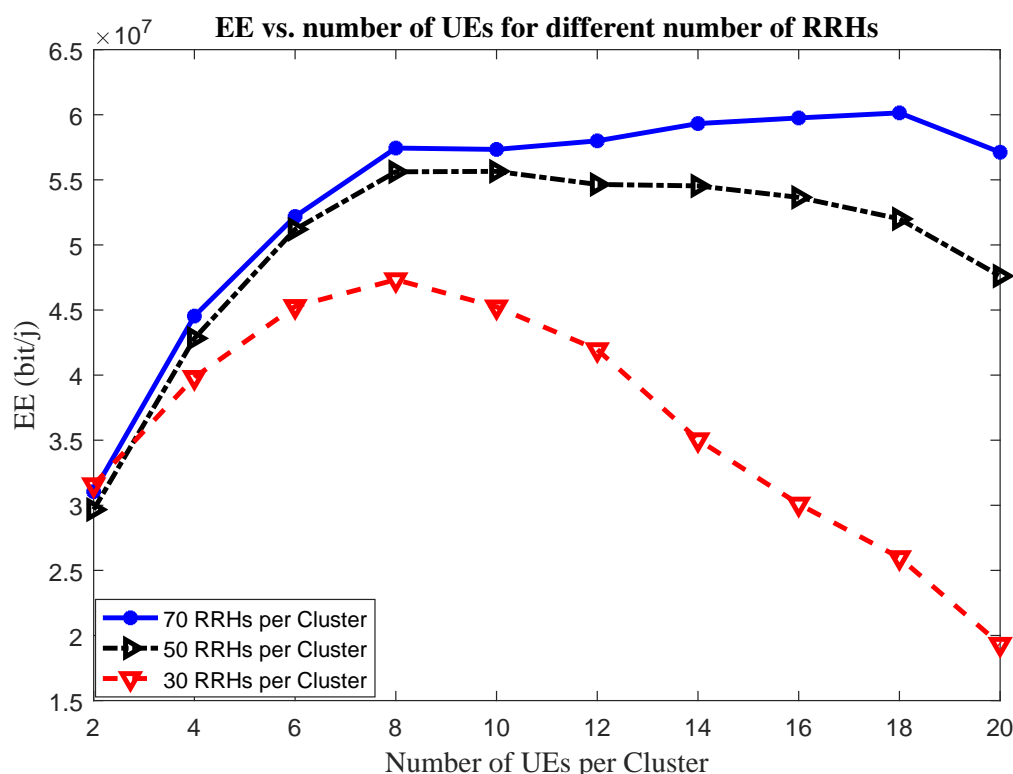
Parameter	Value
Number of cluster S	2
Noise power density	-174dBm/Hz
Bandwidth	120KHz
Maxmimun transmit Power	23dBm
Circuit Power of whole RRHs	10dBm
Variance of quantization noise	$10^{-4}$
Maxmimun fronthaul link's rate	5bits/sec/Hz
Minimum data rate	1bits/sec/Hz



شکل ۳-۲: بازدهی انرژی با توجه به تغییرات تعداد واحدهای رادیویی در هر خوشه برای دو بهینه برای دو کاربر مختلف و پارامترهای جدول ۳-۱

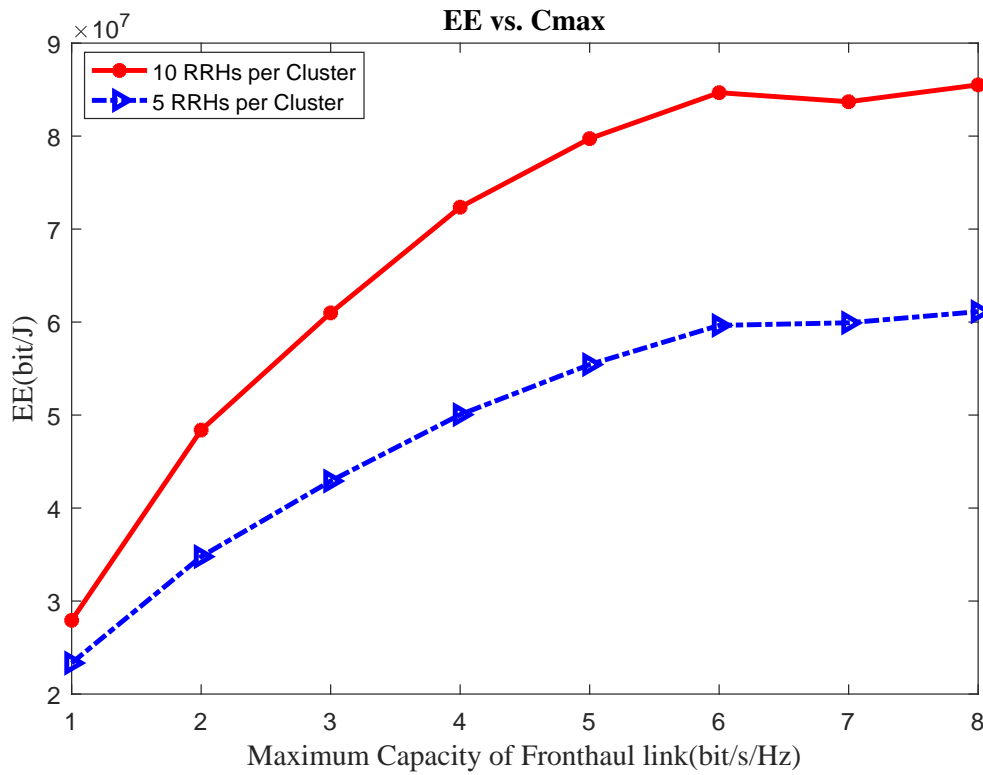
در شکل ۴-۱، بازدهی انرژی سیستم MIMO C-RAN بر اساس تعداد واحدهای رادیویی در هر خوشه برای الگوریتم مورد استفاده و برای دو تعداد کاربر متفاوت، رسم شده است. همانطور که شکل

نشان می دهد، با افزایش تعداد واحدهای رادیویی، بازدهی انرژی افزایش می یابد و سپس در این شکل از حدود ۵۰ واحد رادیویی شیب افزایش بازدهی انرژی کمتر شده و به نظر می آید که رو به ثابت شدن است زیرا با افزایش واحدهای رادیویی ابتدا نرخ ارسال داده بیشتر می شود و بازدهی انرژی بهبود می یابد و در نهایت نرخ ارسال داده دیگر بیشتر نمی گردد و ثابت می شود. زیرا در اینجا با افزایش تعداد واحدهای رادیویی، مجموع توان کل افزایش می یابد در نتیجه نرخ انتقال داده نیز بیشتر می گردد.



شکل ۳-۳: بازدهی انرژی با توجه به تغییرات تعداد کاربران در هر خوشه برای توان بهینه برای سه واحد رادیویی مختلف و پارامترهای جدول ۳-۱ و  $P_c = 9\text{dbm}$

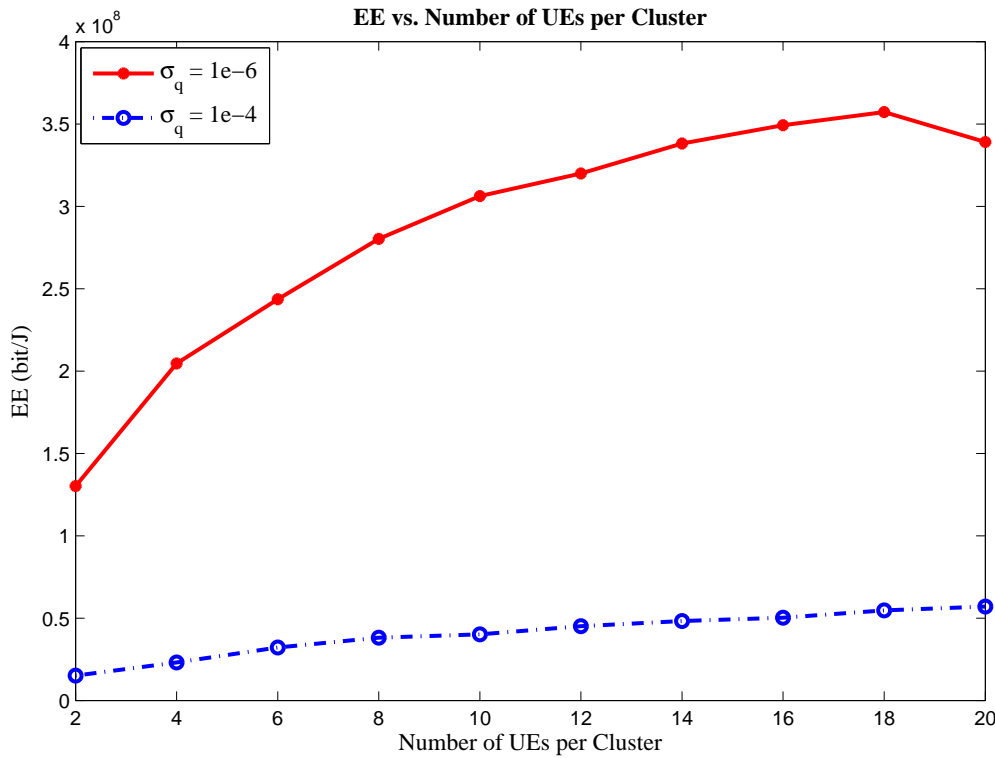
در شکل ۳-۳، بازدهی انرژی بر اساس تعداد کاربران در هر خوشه برای الگوریتم مورد استفاده و برای سه تعداد واحد رادیویی متفاوت، رسم شده است. همانطور که دیده می شود با افزایش تعداد کاربران، ابتدا شیب نمودار زیاد می شود و بازدهی انرژی افزایش می یابد زیرا با افزایش کاربران مجموع نرخ های انتقال افزایش می یابد ولی از یک مقدار به بعد تداخل بین کاربران افزایش می یابد و تاثیر خود را به طور محسوس بر بازدهی انرژی می گذارد و در نتیجه بازدهی انرژی کاهش می یابد.



شکل ۳-۴: بازدهی انرژی با توجه به تغییرات  $C^{th}$  در حالت  $S = 2$ ،  $\text{Number of RRHs per Cluster} = 10, 5$ ،  $\text{Number of UE per Cluster} = 2$

در شکل ۳-۴، بازدهی انرژی بر اساس محدودیت ظرفیت لینک fronthaul، برای دو تعداد متفاوت ۵ و ۱۰ واحد رادیویی در هر خوشه رسم شده است. با توجه به شکل، زمانی که ظرفیت یک مقداری بیشتر می گردد، بدلیل اینکه نرخ قابل دسترس توسط تعداد کاربران و واحدهای رادیویی محدود می گردد، به نظر می آید افزایش محدودیت این ظرفیت تاثیر چندانی در بازدهی انرژی ندارد.



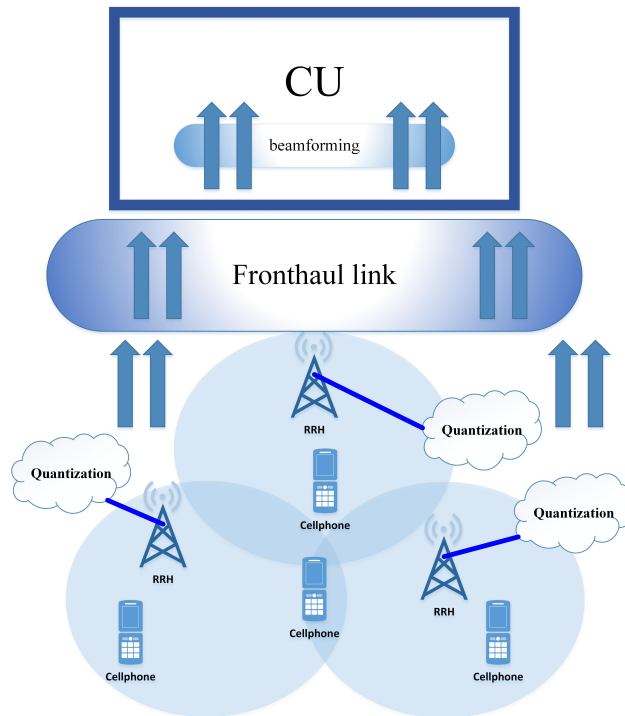


شکل ۳-۵: بازدهی انرژی بر حسب تعداد کاربران در ۳ خوشه برای دو مقدار  $\sigma_q = 1e-4$ ,  $1e-6$  و  $100 \sigma_q$  واحد رادیویی در هر خوشه

حال در شکل ۳-۵، بازدهی انرژی بر حسب تعداد کاربران در هر خوشه برای دو مقدار  $\sigma_q = 1e-4$ ,  $1e-6$  و وجود ۳ خوشه در هر خوشه با فرض بودن  $100$  واحد رادیویی در هر خوشه رسم شده است. همانطور که می بینید با افزایش کاربران بازدهی انرژی افزایش یافته است و بازدهی انرژی در واریانس نویز کمتر بیشتر از بازدهی انرژی در واریانس نویز بیشتر می باشد.

### ۳-۲-۶ نتیجه گیری

در این بخش، تخصیص توان بهینه در لینک فروسو برای مدل سیستم MIMO C-RAN با فرض محدودیت بر روی ظرفیت fronthaul، در نظر گرفته شده است. مدل سیستم شرح داده شده و مسئله ی تخصیص توان بهینه با روش الگوریتم بهینه و استفاده از تابع لاگرانژ حل شده است. شبیه سازی ها نشان می دهد که با افزایش تعداد واحدهای رادیویی عملکرد سیستم بهبود داده و افزایش تعداد کاربران ابتدا منجر به افزایش بازدهی انرژی می گردد و سپس به دلیل زیاد شدن تاثیر تداخل، کاهش می یابد. همچنین با کاهش نویز کوانتیزاسیون عملکرد سیستم بهبود می یابد. علاوه بر این، با افزایش بیشینه ظرفیت لینک fronthaul ابتدا بازدهی انرژی زیاد شده سپس شیب افزایش بازدهی انرژی، کم می شود.



شکل ۳-۶: ساختار C-RAN در لینک فراسو

### ۳-۳ لینک فراسو

در این بخش، لینک فراسو برای سیستم MIMO C-RAN در نظر گرفته شده است که پیام در مسیر لینک فراسو از کاربر به واحدهای رادیویی منتقل می شود و پس از فشردن سازی توسط لینک fronthaul به واحد کنترل منتقل می گردد.

همانند لینک فروسو فرض بر این است که واحدهای رادیویی و کاربران خوشه بندی شده اند به طوری که هر خوشه شامل تعدادی واحد رادیویی است که به کاربران موجود در آن خوشه، سرویس دهی می کنند. همچنین در این مدل از روش پرتو دهی برای کاهش تداخل استفاده می کنیم که پرتو دهی در داخل واحد کنترل صورت می گیرد. در ادامه، ابتدا سیستم مدل و سپس نرخ قابل دسترسی بیان شده و مسئله ی تخصیص توان بررسی می گردد.

#### ۱-۳-۳ مدل سیستم

مدل سیستم برای لینک فراسو نیز همانند لینک فروسو می باشد که در ادامه شرح داده شده است [۲۹، ۳۰]. سیستم MIMO C-RAN شامل  $R$  واحد رادیویی می باشد که  $D$  کاربر تک آنتنه را سرویس می دهند. فرض بر این است که کاربران و واحد رادیوییها، به  $S$  خوشه تقسیم شده اند که  $v$  امین خوشه، دارای  $R_v$  واحد رادیویی است که  $D_v$  کاربر را سرویس دهی می کنند. علاوه بر این، فرض بر این است که  $j$  امین واحد رادیویی، در  $v$  امین خوشه، توسط لینک فیبر نوری با ظرفیت محدود  $C_{r(v,j)}$  به واحد کنترل

متصل می گردد.

$$\begin{aligned}\mathcal{R}_v &= \{r_{(v,i)} | 1 \leq i \leq R_v, i \in Z^+\}, \\ \mathcal{C}_{\mathcal{R}_v} &= \{C_{r_{(v,j)}} | 1 \leq j \leq R_v, j \in Z^+\}, \\ \mathcal{D}_v &= \{d_{(v,k)} | 1 \leq k \leq D_v, k \in Z^+\},\end{aligned}\quad (20-3)$$

که  $\mathcal{R}_v$ ,  $\mathcal{C}_{\mathcal{R}_v}$  و  $\mathcal{D}_v$  به ترتیب نشان دهنده ی دسته واحد رادیوییها، دسته ی ظرفیت لینک Fronthaul و دسته ی کاربران در  $v$ امین دسته ی خوشه می باشد. واحد رادیویی ها تداخل پیام ها را از خوشه های دیگر نیز دریافت می کنند.

### ۳-۳-۲ آنالیز نرخ قابل دسترس

در این قسمت، هدف بررسی نرخ قابل دسترسی سیستم می باشد.

**قضیه ۳-۳-۱.** نرخ قابل دسترسی برای کاربر  $d_{(s,k)}$  به صورت زیر می باشد:

$$\mathfrak{R}_{d_{(s,k)}} = B \log_2(1 + \gamma_{d_{(s,k)}}), \quad (21-3)$$

که  $B$  پهنای باند کانال و  $\gamma_{d_{(s,k)}}$  همان  $SINR$  دریافتی  $k$ امین کاربر در  $s$ امین دسته ی خوشه است که به صورت زیر بیان می گردد.

$$\gamma_{d_{(s,k)}} = \frac{p_{d_{(s,k)}} |w_{\mathcal{R}_s, d_{(s,k)}}^H h_{\mathcal{R}_s, d_{(s,k)}}|^2}{I_{d_{(s,k)}} + B\nu}. \quad (22-3)$$

در فرمول (۳-۴-۱)،  $I_{d_{(s,k)}}$  نشان دهنده ی توان سیگنال تداخلی است.  $B\nu$  نشان دهنده ی توان نویز است و  $h_{\mathcal{R}_s, d_{(s,k)}}$  نشان دهنده ی بردار کانال بین  $k$ امین کاربر و واحدهای رادیویی  $s$  امین دسته ی خوشه می باشد. همچنین  $w_{\mathcal{R}_s, d_{(s,k)}}$  نشان دهنده ی بردار پرتو دهی استفاده شده در  $s$ امین دسته ی خوشه ها بر روی واحدهای رادیویی برای بدست آوردن پیام  $k$ امین کاربر می باشد.  $p_{d_{(s,k)}}$  توان ارسالی  $k$ امین کاربر در  $s$ امین دسته ی خوشه می باشد.

**برهان.** در این قسمت می خواهیم  $\gamma$  را بدست آوریم

فرض کنید  $y_{\mathcal{R}_s}$  یک بردار  $1 \times R_s$  باشد که نشان دهنده ی سیگنال دریافتی توسط دسته ای از واحدهای رادیویی در  $s$  امین خوشه باشد که به صورت زیر بدست می آید.

$$y_{\mathcal{R}_s} = \sum_{v=1}^S H_{\mathcal{R}_v, \mathcal{D}_s} x_{\mathcal{D}_v} + z_{\mathcal{D}_s}, \quad (23-3)$$

که  $x_{\mathcal{D}_v} = [x_{d_{(v,1)}}, \dots, x_{d_{(v,D_v)}}]^T \in \mathbb{C}^{D_v}$  بردار سمبل ارسالی خوشه ی  $v$  ام می باشد.

$\mathbf{z}_{\mathcal{D}_s} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, N. \mathbf{I}_{D_s})$  نویز گوسی سفید اضافه شونده می باشد که دارای توان  $N$  و  $\mathbf{H}_{\mathcal{R}_v, \mathcal{D}_s} \in \mathbb{C}^{R_v \times D_s}$  نشان دهنده ی ماتریس کانال بین کاربران  $\mathcal{D}_s$  در دسته ی  $s$  ام و واحدهای رادیویی  $\mathcal{R}_v$  در دسته ی  $v$  ام می باشد. همچنین مدل کانال همانند لینک فروسو با توجه به فرمول (۳-۵)، بدست می آید. حال می خواهیم پیام دریافتی توسط واحد رادیویی  $n$  ام در دسته ی  $s$  ام را بدست آوریم:

$$y_{r(s,n)} = \sum_{k=1}^{D_s} h_{r(s,n), d(s,k)} \sqrt{p_{d(s,k)}} x_{d(s,k)} + \sum_{t=1, t \neq s}^S \sum_{j=1}^{D_t} h_{r(s,n), d(t,j)} \sqrt{p_{d(t,j)}} x_{d(t,j)} + z_{r(s,n)} \quad (۳-۲۴)$$

پیام دریافتی توسط واحد رادیویی، بعد از فشرده سازی به صورت زیر می شود

$$\hat{y}_{r(s,n)} = y_{r(s,n)} + q_{r(s,n)} \quad (۳-۲۵)$$

پیام هر کاربر در واحد کنترل با اعمال پرتو دهی<sup>۲</sup> به صورتی که در ادامه بیان شده، بدست می آید

$$\begin{aligned} \hat{x}_{d(s,k)} &= \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)} \sqrt{p_{d(s,k)}} x_{d(s,k)} \\ &+ \sum_{i=1, i \neq k}^{D_s} \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d(s,i)} \sqrt{p_{d(s,i)}} x_{d(s,i)} \\ &+ \sum_{t=1, t \neq s}^S \sum_{j=1}^{D_t} \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d(t,j)} \sqrt{p_{d(t,j)}} x_{d(t,j)} \\ &+ \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H (\mathbf{q}_{\mathcal{R}_s} + \mathbf{z}_{\mathcal{R}_s}) \end{aligned} \quad (۳-۲۶)$$

حال برای بدست آوردن SINR، توان سیگنال بر روی توان تداخل و نویز را بدست می آوریم:

$$\gamma = \frac{p_{d(s,k)} |\mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}|^2}{I_{d(s,k)} + B \times \nu_{d(s,k)}} \quad (۳-۲۷)$$

<sup>۲</sup>beamforming

که داریم :

$$\begin{aligned} \nu_{d(s,k)} &= \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H (\text{diag}(\sigma_{n_{r(s,1)}}^2 \dots \sigma_{n_{r(s,R_s)}}^2) + \text{diag}(\sigma_{q_{r(s,1)}}^2 \dots \sigma_{q_{r(s,R_s)}}^2)) \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)} \\ I_{d(s,k)} &= \sum_{i=1, i \neq k}^{D_s} |\mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d(s,i)}|^2 p_{d(s,i)} + \sum_{t=1, t \neq s}^S \sum_{j=1}^{D_t} |\mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d(t,j)}|^2 p_{d(t,j)} \end{aligned} \quad (28-3)$$

در اینجا  $\sigma_n^2$  واریانس نویز می باشد که برای سادگی برای همه ی واحدهای رادیویی ثابت فرض شده و دارای مقدار  $N$ . است و  $\sigma_q^2$  واریانس نویز فشرده سازی می باشد. علاوه بر این با استفاده از پرتو دهی MMSE، ماتریس پرتو دهی به صورت زیر است

$$\mathbf{W}_{\mathcal{R}_s, \mathcal{D}_s} = \hat{\mathbf{H}}_{\mathcal{R}_s, \mathcal{D}_s} (\hat{\mathbf{H}}_{\mathcal{R}_s, \mathcal{D}_s}^H \hat{\mathbf{H}}_{\mathcal{R}_s, \mathcal{D}_s} + \alpha \mathbf{I}_{D_s})^{-1}, \quad (29-3)$$

همچنین  $\alpha$ ، فاکتور رگولاریزاسیون است در صورتی که  $\alpha$  صفر باشد، ماتریس پرتو دهی ZF خواهیم داشت. □

### ۳-۳-۳ بهینه سازی تخصیص توان

در این قسمت می خواهیم توان را طوری اختصاص دهیم تا بازدهی انرژی به بیشینه مقدار خود برسد. می دانیم نرخ قابل دسترس بر روی لینک fronthaul، بین  $n$  امین واحد رادیویی در  $s$  امین خوشه و واحد کنترل به صورت زیر بدست می آید

$$C_{r(s,n)} = \log \frac{1 + (\sum_{k=1}^{D_s} |h_{r(s,n), d(s,k)}|^2 p_{d(s,k)} + \sum_{t=1, t \neq s}^S \sum_{l=1}^{D_t} |h_{r(s,n), d(t,l)}|^2 p_{d(t,l)} + BN.)}{\sigma_{q(s,n)}^2}, \quad (30-3)$$

شرح مسئله

همانطور که گفته شد نسبت مجموع نرخ ها در سیستم به کل توان ارسالی کاربرها نشان دهنده ی بازدهی انرژی است که با  $\eta$  نمایش داده می شود و می توان اینگونه بیان کرد

$$\eta(\mathbf{P}) := \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^{D_s} \Re_{d(s,k)}}{\sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^{K_s} p_{d(s,k)}} = \frac{R_{total}(\mathbf{P})}{P_{UE}(\mathbf{P})}, \quad (31-3)$$

که در اینجا  $P = \{P_{\mathcal{D}_s} | 1 \leq s \leq S, s \in \mathbb{Z}^+\}$  ماتریس تخصیص توان است. در این بخش، بیشینه سازی بازدهی انرژی با شروط زیر مورد بررسی قرار می گیرد

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{P}} \quad & \eta(\mathbf{P}) \\ \text{subject to} \quad & 0 \leq p_{d(s,k)} \leq P_{max} \quad \forall s, \forall k, \\ & \mathfrak{R}_{d(s,k)} \geq \mathfrak{R}_{d(s,k)}^{th} \quad \forall s, \forall k, \\ & C_{r(s,i)} \leq C_{r(s,i)}^{th} \quad \forall s, \forall i, \end{aligned} \quad (32-3)$$

همانند لینک فروسو، بدلیل محدب نبودن مسئله از روش الگوریتم تکرار شونده استفاده می کنیم.

### ۴-۳-۳ روش مورد استفاده

در این قسمت، به جای ماکسیمم کردن (۳۱-۳)، همانند لینک فروسو، از قضیه ی (۱-۲-۴) استفاده می نماییم. همچنین کران بالایی برای تداخل بدست می آید که در ادامه بیان می شود.

$$\tilde{I}_{d(s,k)} = \sum_{v=1}^S |w^H_{\mathcal{R}_s, d(s,k)} h_{\mathcal{R}_v, d(s,k)}|^2 P_{max} \quad (33-3)$$

در نتیجه با توجه به رابطه ی (۲۴-۴)، می توان  $\gamma$  را به این صورت تخمین زد:

$$\tilde{\gamma}_{d(s,k)} = \frac{p_{d(s,k)} |w^H_{\mathcal{R}_s, d(s,k)} h_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}|^2}{\tilde{I}_{d(s,k)} + B\nu}. \quad (34-3)$$

ابتدا تابع لاگرانژ را تشکیل می دهیم تا بتوان با استفاده از آن، از الگوریتم تکرار شونده ی (۱)، استفاده کرد.

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\mathbf{P}; \lambda, \mu, \kappa) = & \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^{\mathcal{D}_s} \tilde{\mathfrak{R}}_{d(s,k)} - \eta \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^{\mathcal{K}_s} p_{d(s,k)} \\ & + \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^{\mathcal{D}_s} \lambda_{d(s,k)} (\tilde{\mathfrak{R}}_{d(s,k)} - \mathfrak{R}_{d(s,k)}^{th}) \\ & - \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^{\mathcal{K}_s} \mu_{d(s,k)} (p_{d(s,k)} - P_{max}) \\ & - \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^{\mathcal{R}_s} \kappa_{r(s,i)} (C_{r(s,i)} - C_{r(s,i)}^{th}). \end{aligned} \quad (35-3)$$

که در اینجا،  $\lambda, \mu, \kappa \geq 0$  بردارهای ضرایب لاگرانژ می باشد .  
با استفاده از این معادله و مشتقگیری از آن، توان بهینه به صورت زیر بدست می آید

$$p_{d(s,k)}^* \approx \left[ \frac{B(1 + \lambda_{d(s,k)}) - (\sum_{n=1}^{\mathcal{R}_s} \kappa_{r(s,i)})}{\ln 2 \times (\eta + \mu_{d(s,k)})} \right]^+; \quad (36-3)$$

در آخر، برای بدست آوردن توان بهینه، الگوریتم (۲) مورد استفاده قرار می گیرد [۴۰]

---

**Algorithm 2** Energy-Efficient Power Allocation

---

Set the maximum number of iterations  $I_{max}$ , convergence condition  $\epsilon_\eta$  and the initial value  $\eta^{(1)} = 0$

Set the iteration index  $i = 1$  and begin the iteration (Outer Loop).

**for**  $1 \leq i \leq I_{max}$  **do**

Solve the resource allocation problem with  $\eta^{(i)}$  (Inner Loop);

Obtain  $P^{(i)}, R_{total}^{(i)}, P_{UE}^{(i)}$

**if**  $R_{total}(\mathbf{P}^{(i)}) - \eta^{(i)} P_{UE}(\mathbf{P}^{(i)}) < \epsilon_\eta$  **then**

Set  $\mathbf{P}^* = \mathbf{P}^{(i)}$  and  $\eta^* = \eta^{(i)}$ ;

break;

**else**

Set  $\eta^{(i)} = \frac{R_{total}(\mathbf{P}^{(i)})}{P_{UE}(\mathbf{P}^{(i)})}$  and  $i = i + 1$ ;

**end if**

**end for**

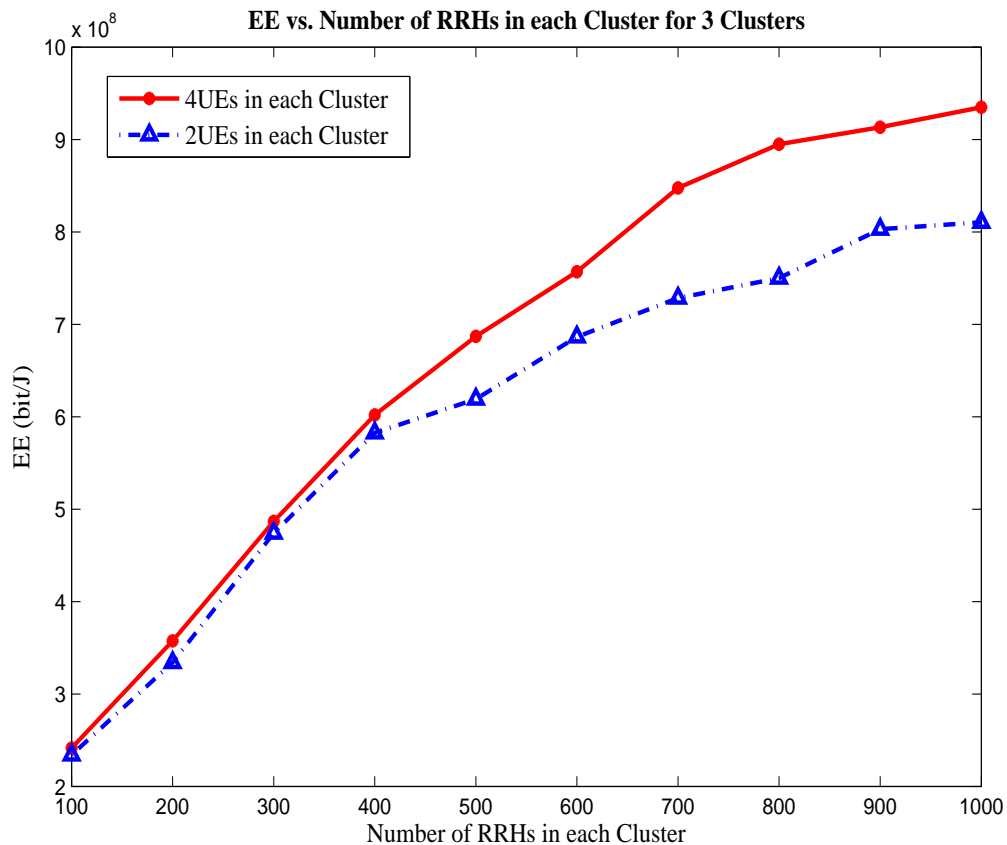
---

### ۵-۳-۳ نتایج عددی

در این بخش، نتایج عددی الگوریتم مورد استفاده را برای سیستم MIMO C-RAN با پارامترهای بیان شده در جدول ۳-۲ و استفاده از پرتو دهی ZF بیان می شود.

Table 3-2: پارامترهای شبیه سازی

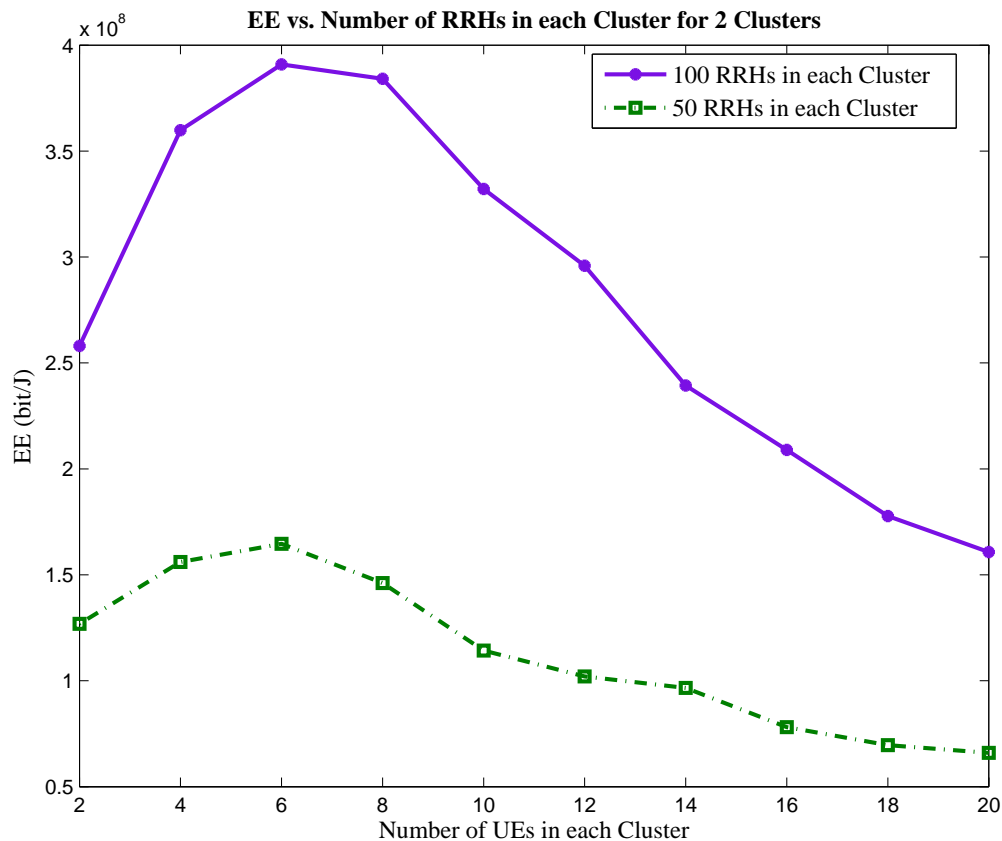
Parameter	Value
Number of cluster S	3
Noise power density	-174dBm/Hz
Bandwidth	120KHz
Maxmimun transmit Power	10dBm
Circuit Power of whole RRHs	10dBm
Variance of quantization noise	$10^{-2}$
Maxmimun fronthaul link's rate	20bits/sec/Hz
Minimum data rate	1bits/sec/Hz



شکل ۷-۳: بازدهی انرژی با توجه به تغییرات تعداد واحدهای رادیویی در هر خوشه برای دو کاربر مختلف و پارامترهای جدول ۳-۲

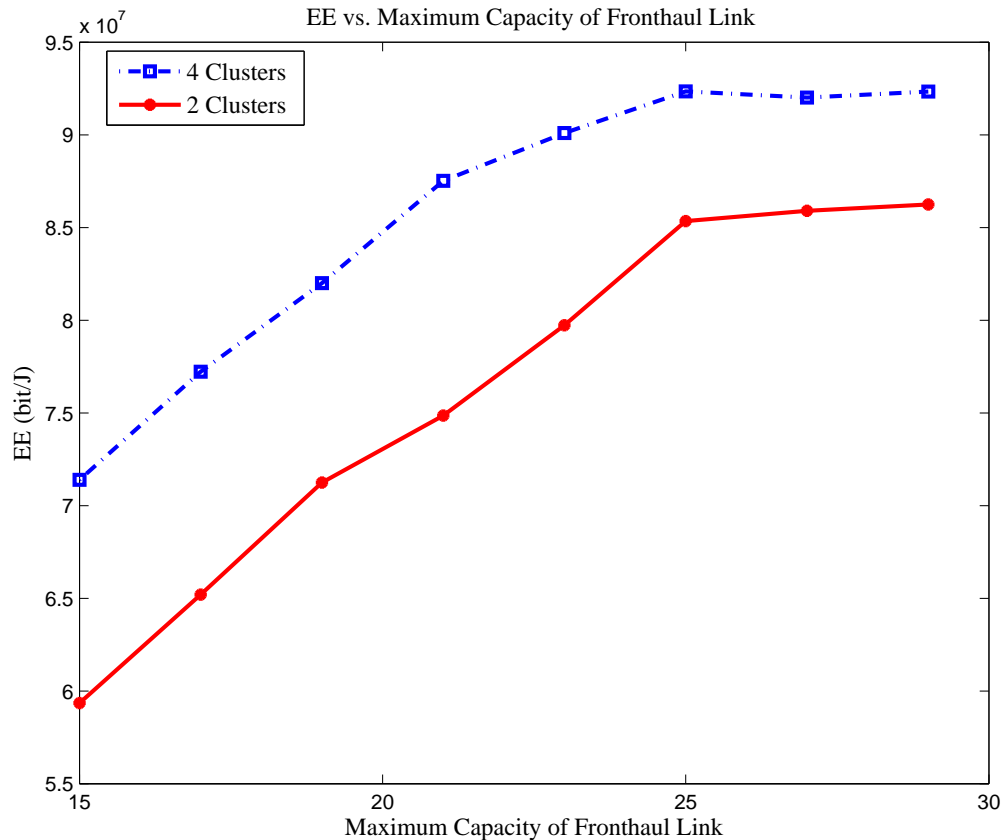
در شکل ۷-۳، بازدهی انرژی سیستم MIMO C-RAN بر اساس تعداد واحدهای رادیویی در هر خوشه برای الگوریتم مورد استفاده و برای دو تعداد کاربر متفاوت، رسم شده است. همانطور که شکل نشان می دهد، با افزایش تعداد واحدهای رادیویی، بازدهی انرژی افزایش می یابد و از یک مقدار به بعد شیب افزایش بازدهی انرژی کمتر شده است. زیرا با افزایش تعداد واحدهای رادیویی، مجموع توان کل افزایش یافته و در نتیجه نرخ انتقال داده نیز بیشتر می گردد.





شکل ۳-۸: بازدهی انرژی با توجه به تغییرات تعداد کاربران در هر خوشه برای توان بهینه برای دو واحد رادیویی مختلف و پارامترهای جدول ۳-۲ و  $S = 2$

در شکل ۳-۸، بازدهی انرژی بر اساس تعداد کاربران در هر خوشه برای الگوریتم مورد استفاده و برای دو تعداد واحد رادیویی متفاوت، رسم شده است. همانطور که دیده می شود با افزایش تعداد کاربران، ابتدا شیب نمودار زیاد می شود و بازدهی انرژی افزایش می یابد سپس به دلیل افزایش تاثیر تداخل بین کاربران بازدهی انرژی کاهش می یابد.



شکل ۳-۹: بازدهی انرژی با توجه به تغییرات  $C^{th}$ ، در حالت  $S = 2, 4$ ،  $\text{Number of RRHs per Cluster} = 30$ ،  $\text{Number of UE per Cluster} = 2$

در شکل ۳-۹، بازدهی انرژی بر اساس محدودیت ظرفیت لینک fronthaul، برای دو تعداد متفاوت ۲ و ۴ خوشه و در هر خوشه ۲ کاربر و ۳۰ واحد رادیویی رسم شده است. با توجه به شکل، ابتدا با بازدهی انرژی، افزایش یافته، سپس بدلیل اینکه نرخ قابل دسترس توسط تعداد کاربران و واحدهای رادیویی محدود می گردد، به نظر می آید افزایش محدودیت این ظرفیت تاثیر چندانی در بازدهی انرژی ندارد.

### ۳-۳-۶ نتیجه گیری

در این بخش، تخصیص توان بهینه در لینک فراسو برای مدل سیستم MIMO C-RAN با فرض محدودیت بر روی ظرفیت fronthaul و وجود چندین خوشه، در نظر گرفته شده است. مدل سیستم شرح داده شده و مسئله ی تخصیص توان بهینه با روش الگوریتم بهینه و استفاده از تابع لاگرانژ حل شده است. شبیه سازی ها نشان می دهد همانند لینک فراسو با افزایش تعداد واحدهای رادیویی عملکرد سیستم بهبود داده و افزایش تعداد کاربران منجر به افزایش بازدهی انرژی می گردد ولی در نهایت به دلیل تداخل بازدهی انرژی کاهش می یابد. همچنین، با افزایش بیشینه ظرفیت لینک fronthaul ابتدا بازدهی انرژی زیاد شده سپس شیب افزایش بازدهی انرژی، کم می شود.

## فصل چهارم

# تخصیص منابع در حالت تقسیم زمانی دینامیکی در شبکه دسترسی رادیویی

## ۱-۴ مقدمه

در این فصل هدف بدست آوردن مدل سیستم در حالت تقسیم زمانی یا TDD<sup>۱</sup> دینامیکی می باشد که بدین منظور تخصیص توان برای هر دو لینک فراسو و فروسو به طور همزمان بدست می آید. در تقسیم زمانی دینامیکی، منابع به صورت دینامیکی بین هر دو لینک فراسو و فروسو تخصیص داده می شود. در سیستم های سنتی ایستگاه پایه و سیستم سنتی ایستگاه پایه و واحد رادیویی که در فصل اول بیان شد، تداخل بین لینک فراسو و فروسو منجر به کاهش شدید در بازدهی انرژی می گردد در حالی که در سیستم C-RAN این تداخل به دلیل وجود BBU Pool و واحد های رادیویی RRH و نوع پردازش هایی که در آنها صورت می گیرد، تاثیر چندانی در بازدهی انرژی نمی گذارد [۲۲، ۴۱].

حال در ادامه، مدل سیستمی با ساختار C-RAN بیان می نماییم که دارای چندین خوشه است که تعدادی از این خوشه ها در لینک فراسو و تعدادی دیگر در لینک فروسو عمل می کنند. همچنین تمام واحدهای رادیویی در این خوشه ها به واحد کنترل ابری BBU Pool از طریق لینک fronthaul با ظرفیت محدود، متصلند. سیگنالهای خوشه های لینک فراسو و فروسو نیز بر یکدیگر تداخل اعمال می کنند.

## ۲-۴ مدل سیستم

در این بخش مدل سیستمی برای حالت تقسیم زمانی دینامیکی براساس معماری C-RAN در لینک فراسو و فروسو همانند فصل ۳ بیان می شود. فرض بر این است که این سیستم شامل  $S$  خوشه می باشد که  $S_1$  خوشه در لینک فروسو و  $S_2$  خوشه در لینک فراسو عمل می کنند که  $S_1 + S_2 = S$  است. همچنین هر خوشه  $v$  دارای  $R_v$  واحد رادیویی و  $D_v$  کاربر می باشد. علاوه بر این، فرض بر این است که  $j$  امین واحد رادیویی، در  $v$  امین خوشه، توسط لینک فیبر نوری با ظرفیت محدود  $C_{r(v,j)}$  به واحد کنترل متصل می گردد. در نتیجه داریم:

$$\begin{aligned}\mathcal{R}_v &= \{r_{(v,i)} | 1 \leq i \leq R_v, i \in \mathbb{Z}^+\}, \\ \mathcal{C}_{\mathcal{R}_v} &= \{C_{r(v,j)} | 1 \leq j \leq R_v, j \in \mathbb{Z}^+\}, \\ \mathcal{D}_v &= \{d_{(v,k)} | 1 \leq k \leq D_v, k \in \mathbb{Z}^+\},\end{aligned}\quad (۱-۴)$$

که  $\mathcal{R}_v$ ،  $\mathcal{C}_{\mathcal{R}_v}$  و  $\mathcal{D}_v$  به ترتیب نشان دهنده ی دسته واحدهای رادیویی، دسته ی ظرفیت لینک Fronthaul و دسته ی کاربران در  $v$  امین دسته ی خوشه می باشد. واحدهای رادیویی تداخل پیام ها را از خوشه های دیگر لینک فراسو و فروسو دریافت می کنند.

## ۱-۲-۴ آنالیز نرخ قابل دسترس در خوشه های فروسو

در این قسمت، هدف بررسی نرخ قابل دسترسی سیستم برای خوشه هایی است که در حال تبادل در لینک فروسو می باشند. نرخ قابل دسترسی برای کاربر  $d_{(s,k)}$  به صورت زیر می باشد:

$$\mathfrak{R}_{d_{(s,k)}} = B \log_2(1 + \gamma_{d_{(s,k)}}), \quad (۲-۴)$$

<sup>۱</sup>Time Division Duplexing

که  $B$  پهنای باند کانال و  $\gamma_{d(s,k)}$  همان SINR دریافتی  $k$ امین کاربر در  $s$ امین دسته ی خوشه است که به صورت زیر بیان می گردد.

$$\gamma_{d(s,k)} = \frac{p_{d(s,k)} |h_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H w_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}|^2}{I_{d(s,k)} + BN}. \quad (3-4)$$

در فرمول (3-4)،  $I_{d(s,k)}$  نشان دهنده ی توان سیگنال تداخلی است.  $BN$  نشان دهنده ی توان نویز است و  $h_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}$  نشان دهنده ی بردار گین کانال بین  $k$ امین کاربر و واحدهای رادیویی  $s$ امین دسته ی خوشه در حالت لینک فروسو می باشد. همچنین  $w_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}$  نشان دهنده ی بردار پیش کدگذاری استفاده شده در  $s$ امین دسته ی خوشه ها برای  $k$ امین کاربر می باشد.  $p_{d(s,k)}$  توان ارسالی واحدهای رادیویی است که به  $k$ امین کاربر در  $s$ امین دسته ی خوشه ارسال می گردد. برای بدست آوردن  $\gamma_{d(s,k)}$  ابتدا سیگنال دریافتی را نمایش می دهیم. سیگنال دریافتی لینک فروسو توسط کاربر  $k$  ام در خوشه ی  $s$  ام به این صورت نمایش داده می شود

$$\begin{aligned} y_{d(s,k)} = & \underbrace{\sqrt{p_{d(s,k)}} h_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H w_{\mathcal{R}_s, d(s,k)} x_{d(s,k)}}_{\text{(desired signal)}} + \underbrace{\sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^{D_s} h_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H w_{\mathcal{R}_s, d(s,l)} \sqrt{p_{d(s,l)}} x_{d(s,l)}}_{\text{(intra-cluster interference)}} \\ & + \underbrace{\sum_{\substack{v=1 \\ v \neq s}}^{S_v} \sum_{l=1}^{D_v} h_{\mathcal{R}_v, d(s,k)}^H w_{\mathcal{R}_v, d(v,l)} \sqrt{p_{d(v,l)}} x_{d(v,l)}}_{\text{(inter-cluster interference)}} + \underbrace{\sum_{t=1}^{S_v} \sum_{l=1}^{D_t} b_{\mathcal{D}_t, d(s,k)}^H \sqrt{p_{d(t,l)}} x_{d(t,l)}}_{\text{(interference from uplink's clusters)}} \quad (4-4) \\ & + \underbrace{\sum_{v=1}^{S_v} \sum_{i=1}^{R_v} q_{r(v,i)} h_{r(v,i), d(s,k)} + z_{d(s,k)}}_{\text{(quantization noise interference)}}. \end{aligned}$$

که در اینجا،  $b_{\mathcal{D}_t, d(s,k)} \in \mathbb{C}^{D_t \times 1}$  بردار کانال بین کاربران لینک فراسو در خوشه ی  $t$  ام به  $k$ امین کاربر لینک فروسو در خوشه ی  $s$  ام می باشد که همانند پارامتر بردار کانال  $h$  بدست می آید. بقیه ی پارامترها نیز در فصل ۳ به طور کامل بیان شده است. با توجه به (4-4)،  $I_{d(s,k)}$  از رابطه ی زیر بدست می آید.

$$\begin{aligned} I_{d(s,k)} = & \underbrace{\sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^{D_s} |h_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H w_{\mathcal{R}_s, d(s,l)}|^2 p_{d(s,l)}}_{\text{(intra-cluster interference)}} + \underbrace{\sum_{\substack{v=1 \\ v \neq s}}^{S_v} \sum_{l=1}^{D_v} |h_{\mathcal{R}_v, d(s,k)}^H w_{\mathcal{R}_v, d(v,l)}|^2 p_{d(v,l)}}_{\text{(inter-cluster interference)}} \quad (5-4) \\ & + \underbrace{\sum_{t=1}^{S_v} \sum_{l=1}^{D_t} |b_{\mathcal{D}_t, d(s,k)}^H|^2 p_{d(t,l)}}_{\text{(interference from uplink's clusters)}} + \underbrace{\sum_{v=1}^{S_v} \sum_{i=1}^{R_v} \sigma_{q_{r(v,i)}}^2 |h_{r(v,i), d(s,k)}|^2}_{\text{(quantization noise interference)}}. \end{aligned}$$

همچنین توان سیگنال ارسالی به این صورت بدست می آید

$$\bar{p}_{r(s,i)} = \mathbf{w}_{r(s,i),\mathcal{D}_s} \mathbf{P}_{\mathcal{D}_s}^{\frac{1}{2}} \mathbf{P}_{\mathcal{D}_s}^{H\frac{1}{2}} \mathbf{w}_{r(s,i),\mathcal{D}_s}^H + \sigma_{q(s,i)}^2. \quad (6-4)$$

و داریم:

$$P_{dl} = \sum_{s=1}^{S_1} \sum_{i=1}^{R_s} \bar{p}_{r(s,i)} + P_c^{total,DL} \quad (7-4)$$

که  $P_c^{total,DL}$ ، توان مداری کل واحدهای رادیویی لینک فروسو است. در نتیجه نرخ قابل دسترس بر روی لینک fronthaul، بین واحد کنترل و  $k$ امین واحد رادیویی در  $t$ امین خوشه به صورت زیر بدست می آید

$$C_{r(t,i)} = \log \left( 1 + \frac{\mathbf{w}_{r(s,i),\mathcal{D}_s} \mathbf{P}_{\mathcal{D}_s}^{\frac{1}{2}} \mathbf{P}_{\mathcal{D}_s}^{H\frac{1}{2}} \mathbf{w}_{r(s,i),\mathcal{D}_s}^H}{\sigma_{q(s,i)}^2} \right), \quad (8-4)$$

#### ۲-۲-۴ آنالیز نرخ قابل دسترس در خوشه های فراسو

حال در این قسمت، هدف بررسی نرخ قابل دسترسی سیستم برای خوشه هایی است که در حال تبادل در لینک فراسو می باشند که همانند بخش قبلی بدست می آید. نرخ قابل دسترسی برای کاربر  $d_{(s,k)}$  به این صورت است

$$\mathfrak{R}_{d(s,k)} = B \log_2(1 + \gamma_{d(s,k)}), \quad (9-4)$$

که  $B$  پهنای باند کانال و  $\gamma_{d(s,k)}$  همان SINR دریافتی  $k$ امین کاربر در  $s$ امین دسته ی خوشه است که در رابطه ی (۱۰-۴) آمده است.

$$\gamma_{d(s,k)} = \frac{p_{d(s,k)} |\mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}|^2}{I_{d(s,k)} + B\nu}. \quad (10-4)$$

در فرمول (۱۰-۴)،  $I_{d(s,k)}$  نشان دهنده ی توان سیگنال تداخلی است.  $B\nu$  نشان دهنده ی توان نویز است و  $\mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}$  نشان دهنده ی بردار کانال بین  $k$ امین کاربر و واحدهای رادیویی  $s$ امین دسته ی خوشه می باشد. همچنین  $\mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}$  نشان دهنده ی بردار پرتو دهی استفاده شده در  $s$ امین دسته ی خوشه ها بر روی واحدهای رادیویی برای بدست آوردن پیام  $k$ امین کاربر می باشد.  $p_{d(s,k)}$  توان ارسالی  $k$ امین کاربر در  $s$ امین دسته ی خوشه می باشد. در این قسمت می خواهیم  $\gamma$  را بدست آوریم

پیام دریافتی توسط واحد رادیویی  $n$  ام در دسته  $s$  ام در رابطه ی (۴-۱۱) نوشته شده است.

$$\begin{aligned}
 y_{r(s,n)} = & \underbrace{\sum_{k=1}^{D_s} h_{r(s,n),d(s,k)} \sqrt{p_{d(s,k)}} x_{d(s,k)}}_{\text{desired signal}} + \underbrace{\sum_{t=1, t \neq s}^{S_r} \sum_{j=1}^{D_t} h_{r(s,n),d(t,j)} \sqrt{p_{d(t,j)}} x_{d(t,j)}}_{\text{inter-cluster interference}} \\
 & + \underbrace{\sum_{v=1}^{S_l} \mathbf{f}_{\mathcal{R}_v, r(s,n)}^H \mathbf{W}_{\mathcal{R}_v, \mathcal{D}_v}^{DL} \mathbf{P}_{\mathcal{D}_v}^{1/2} \mathbf{x}_{\mathcal{D}_v}}_{\text{downlink's cluster interference}} + \underbrace{\mathbf{z}_{r(s,n)}}_{\text{gaussian noise}}
 \end{aligned} \quad (۴-۱۱)$$

که در اینجا  $\mathbf{W}^{DL}$  ماتریس پیش کدگذاری در لینک فروسو می باشد. پیام دریافتی توسط واحد رادیویی، بعد از فشرده سازی به صورت زیر می شود

$$\hat{y}_{r(s,n)} = y_{r(s,n)} + q_{r(s,n)} \quad (۴-۱۲)$$

پیام هر کاربر در واحد کنترل با اعمال پرتو دهی<sup>۲</sup> به صورتی که در ادامه بیان شده، بدست می آید

$$\begin{aligned}
 \hat{x}_{d(s,k)} = & \underbrace{\mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)} \sqrt{p_{d(s,k)}} x_{d(s,k)}}_{\text{desired signal}} + \underbrace{\sum_{i=1, i \neq k}^{D_s} \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d(s,i)} \sqrt{p_{d(s,i)}} x_{d(s,i)}}_{\text{intra-cluster interference}} \\
 & + \underbrace{\sum_{t=1, t \neq s}^{S_r} \sum_{j=1}^{D_t} \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d(t,j)} \sqrt{p_{d(t,j)}} x_{d(t,j)}}_{\text{inter-cluster interference}} + \underbrace{\sum_{v=1}^{S_l} \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{f}_{\mathcal{R}_v, \mathcal{R}_s}^H \mathbf{W}_{\mathcal{R}_v, \mathcal{D}_v}^{DL} \mathbf{P}_{\mathcal{D}_v}^{1/2} \mathbf{x}_{\mathcal{D}_v}}_{\text{downlink's cluster interference}} \\
 & + \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H (\mathbf{q}_{\mathcal{R}_s} + \mathbf{z}_{\mathcal{R}_s})
 \end{aligned} \quad (۴-۱۳)$$

حال برای بدست آوردن SNR، توان سیگنال بر روی توان تداخل و نویز مورد محاسبه قرار می گیرد.

$$\gamma = \frac{p_{d(s,k)} |\mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}|^2}{I_{d(s,k)} + B \times \nu_{d(s,k)}} \quad (۴-۱۴)$$

همچنین می توان نوشت

$$\begin{aligned}
 \nu_{d(s,k)} = & \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H (\text{diag}(\sigma_n r(s,1)}^2 \dots \sigma_n r(s, R_s)}^2) + \text{diag}(\sigma_q r(s,1)}^2 \dots \sigma_q r(s, R_s)}^2)) \mathbf{W}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)} \\
 I_{d(s,k)} = & \sum_{i=1, i \neq k}^{D_s} |\mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d(s,i)}|^2 p_{d(s,i)} + \sum_{t=1, t \neq s}^{S_r} \sum_{j=1}^{D_t} |\mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d(t,j)}|^2 p_{d(t,j)} + I_{d(s,k)}^{dl}
 \end{aligned} \quad (۴-۱۵)$$

<sup>۲</sup>beamforming

در اینجا  $\sigma_n^2$  واریانس نویز می باشد که برای سادگی برای همه ی واحدهای رادیویی ثابت فرض شده و دارای مقدار  $N$  است و  $\sigma_q^2$  واریانس نویز فشرده سازی می باشد. علاوه بر این،

$$I_{d(s,k)}^{dl} = \sum_{v=1}^{S_v} \| \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{f}_{\mathcal{R}_v, \mathcal{R}_s}^H \mathbf{W}_{\mathcal{R}_v, D_v}^{DL} \mathbf{P}_{D_v}^{1/2} \|^2. \quad (16-4)$$

می دانیم نرخ قابل دسترس بر روی لینک fronthaul، بین  $n$  امین واحد رادیویی در  $s$  امین خوشه و واحد کنترل به صورت مقابل بدست می آید

$$C_{r(s,n)} = \log \frac{(\sum_{k=1}^{D_t} |h_{r(s,n), d(s,k)}|^2 p_{d(s,k)} + BN.)}{\sigma_{q(s,n)}^2}, \quad (17-4)$$

و کل توان لینک فراسو به این صورت است

$$P_{ul} = \sum_{s=1}^{S_r} \sum_{k=1}^{D_s} p_{d(s,k)} + P_c^{total, UL}. \quad (18-4)$$

که  $P_c^{total, UL}$ ، توان مداری کل واحدهای رادیویی لینک فراسو است.

#### ۳-۲-۴ شرح مسئله

در اینجا نسبت مجموع وزن دار نرخ ها لینک فروسو و فراسو در سیستم به مجموع وزن دار توان ارسالی پیشنهاد می گردد که پیشنهادی با شروط زیر مورد بررسی قرار می گیرد.

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{P}} \quad \tau &= \frac{\sum_{s=1}^{S_v} \sum_{k=1}^{D_s} \mathfrak{R}_{d(s,k)}^{DL} + \alpha \sum_{s=1}^{S_r} \sum_{k=1}^{D_s} \mathfrak{R}_{d(s,k)}^{UL}}{P_{dl} + \beta P_{ul}} \\ \text{subject to} \quad \bar{p}_{r(s,i)} &\leq P_{max}^{dl} & \forall s \in S_v, \forall i, \\ \mathfrak{R}_{d(s,k)} &\geq \mathfrak{R}_{d(s,k)}^{th} & \forall s, \forall k, \\ C_{r(s,i)} &\leq C_{r(s,i)}^{th} & \forall s, \forall i, \\ p_{d(s,k)} &\geq 0 & \forall s, \forall k, \\ p_{d(s,k)} &\leq P_{max}^{ul} & \forall s, \forall k, \end{aligned} \quad (19-4)$$

که در اینجا  $\mathbf{P} = \{P_{D_s} | 1 \leq s \leq S, s \in \mathbb{Z}^+\}$  ماتریس تخصیص توان است. از آنجایی که این یک مسئله ی محدب نیست، با روش الگوریتم تکرار شونده ، مقدار توان بهینه بدست می آید [۳۹].

#### ۴-۲-۴ روش مورد استفاده

در این قسمت، به جای پیشنهادی سازی  $\tau$ ، مسئله ی معادل آن را با الگوریتم تکرار شونده حل می شود



قضیه ۴-۲-۱. مقدار ماکسیمم  $\tau^*$  تنها زمانی بدست می آید که

$$\begin{aligned} \max_P & \left( \sum_{s=1}^{S_1} \sum_{k=1}^{D_s} \mathfrak{R}_{d(s,k)}^{DL} + \alpha \sum_{s=1}^{S_r} \sum_{k=1}^{D_s} \mathfrak{R}_{d(s,k)}^{UL} \right) - \tau^* (P_{dl} + \beta P_{ul}) = \\ & \sum_{s=1}^{S_1} \sum_{k=1}^{D_s} \mathfrak{R}_{d(s,k)}^{*DL} + \alpha \sum_{s=1}^{S_r} \sum_{k=1}^{D_s} \mathfrak{R}_{d(s,k)}^{*UL} - \tau^* (P_{dl}^* + \beta P_{ul}^*) = 0, \end{aligned} \quad (20-4)$$

که  $\{P\}$  یک پاسخ امکان پذیر برای مسئله ی (۳-۱۳) باشد [۴۰].

□

برهان. اثبات این قضیه با روش مشابه در مقاله ی [۴۰] حل شده است.

این مسئله برای حل، به دو بخش مجزای بیشینه سازی برای لینک فروسو و فراسو تقسیم می گردد سپس دو بخش جدا شده با الگوریتم های تکرار شونده با یکدیگر حل می شوند و جواب بهینه را می دهند.

#### ۴-۲-۵ الگوریتم لینک فروسو

برای حل مسئله ی بهینه سازی لینک فروسو، از تابع لاگرانژ استفاده می کنیم [۳۹] که توسط الگوریتم تکرار شونده بدست می آید. الگوریتم تکرار شونده برای بهینه سازی مورد استفاده قرار می گیرد که براساس ضرایب تابع لاگرانژ می باشد

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(P; \lambda, \mu, \kappa) = & \sum_{s=1}^{S_1} \sum_{k=1}^{D_s} \tilde{\mathfrak{R}}_{d(s,k)} - \eta \sum_{s=1}^{S_1} \sum_{i=1}^{R_s} \bar{p}_{r(s,i)} - \eta P_c^{total,dl} \\ & + \sum_{s=1}^{S_1} \sum_{k=1}^{D_s} \lambda_{d(s,k)} (\tilde{\mathfrak{R}}_{d(s,k)} - \mathfrak{R}_{d(s,k)}^{th}) \\ & - \sum_{s=1}^{S_1} \sum_{i=1}^{R_s} \mu_{r(s,i)} (\bar{p}_{r(s,i)} - P_{max}) \\ & - \sum_{s=1}^{S_1} \sum_{i=1}^{R_s} \kappa_{r(s,i)} (C_{r(s,i)} - C_{r(s,i)}^{th}). \end{aligned} \quad (21-4)$$

که در اینجا،  $\lambda, \mu, \kappa \geq 0$  بردارهای ضرایب لاگرانژ می باشد. همچنین برای ساده سازی می توان نوشت:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{d(s,k)} = & \sum_{v=1}^{S_1} P_{max} \| \mathbf{h}_{\mathcal{R}_v, d(s,k)} \mathbf{w}_{\mathcal{R}_v, d(s,k)} \|^2 + \sum_{v=1}^S \sum_{i=1}^{R_v} \sigma_{q_{r(v,i)}}^2 |h_{r(v,i), d(s,k)}|^2 \\ & + \sum_{t=1}^{S_r} \sum_{l=1}^{D_t} |b_{\mathcal{D}_t, d(s,k)}^H|^2 p_{d(t,l)}. \end{aligned} \quad (22-4)$$

با استفاده از این معادله، توان بهینه به صورت مقابل بدست می آید

$$p_{d(s,k)}^* = \left[ \frac{B(1 + \lambda_{d(s,k)})}{\ln 2 \times (\iota_{d(s,k)} + \chi_{d(s,k)})} - \frac{\tilde{I}_{d(s,k)} + BN}{\nu_{d(s,k)}} \right]^+; \quad (23-4)$$

که

$$\begin{aligned} \nu_{d(s,k)} &= |h_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}|^2, \\ \iota_{d(s,k)} &= \sum_{i=1}^{\mathcal{R}_s} (\mu_{r(s,i)} + \eta) (w_{r(s,i), d(s,k)} w_{r(s,i), d(s,k)}^*), \\ \chi_{r(s,i)} &\approx \sum_{i=1}^{\mathcal{R}_s} \frac{\kappa_{r(s,i)}}{\ln 2} \frac{(w_{r(s,i), d(s,k)} w_{r(s,i), d(s,k)}^*)}{P_{max}}. \end{aligned}$$

#### ۶-۲-۴ الگوریتم لینک فراسو

ابتدا کران بالایی برای تداخل بدست می آید که در ادامه بیان می شود.

$$\tilde{I}_{d(s,k)} = \sum_{v=1}^{S_\gamma} |\mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{h}_{\mathcal{R}_v, d(s,i)}|^2 P_{max} + \sum_{n=1}^{R_s} \sum_{v=1}^{S_\gamma} \|\mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{f}_{\mathcal{R}_v, r(s,n)}^H \mathbf{W}_{\mathcal{R}_v, \mathcal{D}_v}^{DL} \mathbf{P}_{\mathcal{D}_v}^{1/2}\|^2 \quad (24-4)$$

در نتیجه با توجه به رابطه ی (۲۴-۴)، می توان  $\gamma$  را به این صورت تخمین زد.

$$\tilde{\gamma}_{d(s,k)} = \frac{p_{d(s,k)} |\mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}^H \mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, d(s,k)}|^2}{\tilde{I}_{d(s,k)} + B\nu}. \quad (25-4)$$

حال تابع لاگرانژ را برای لینک فراسو تشکیل داده می شود.

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\mathbf{P}; \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\kappa}) &= \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^{\mathcal{D}_s} \alpha \tilde{\mathfrak{R}}_{d(s,k)} - \eta \beta \sum_{s=1}^{S_\gamma} \sum_{k=1}^{\mathcal{K}_s} p_{d(s,k)} - \eta \beta P_c^{total, ul} \\ &+ \sum_{s=1}^{S_\gamma} \sum_{k=1}^{\mathcal{D}_s} \varrho_{d(s,k)} (\tilde{\mathfrak{R}}_{d(s,k)} - \mathfrak{R}_{d(s,k)}^{th}) \\ &- \sum_{s=1}^{S_\gamma} \sum_{k=1}^{\mathcal{K}_s} v_{d(s,k)} (p_{d(s,k)} - P_{max}) \\ &- \sum_{s=1}^{S_\gamma} \sum_{i=1}^{\mathcal{R}_s} \omega_{r(s,i)} (C_{r(s,i)} - C_{r(s,i)}^{th}). \end{aligned} \quad (26-4)$$

که در اینجا،  $\omega, \varrho, v \geq 0$ ، بردارهای ضرایب لاگرانژ می باشد. با استفاده از این معادله و مشتقگیری از آن، توان بهینه به صورت زیر بدست می آید

$$p_{d(s,k)}^* \approx \left[ \frac{B(\alpha + \varrho_{d(s,k)}) - (\sum_{n=1}^{\mathcal{R}_s} \omega_{r(s,i)})}{\ln 2 \times (\eta\beta + v_{d(s,k)})} \right]^+; \quad (27-4)$$

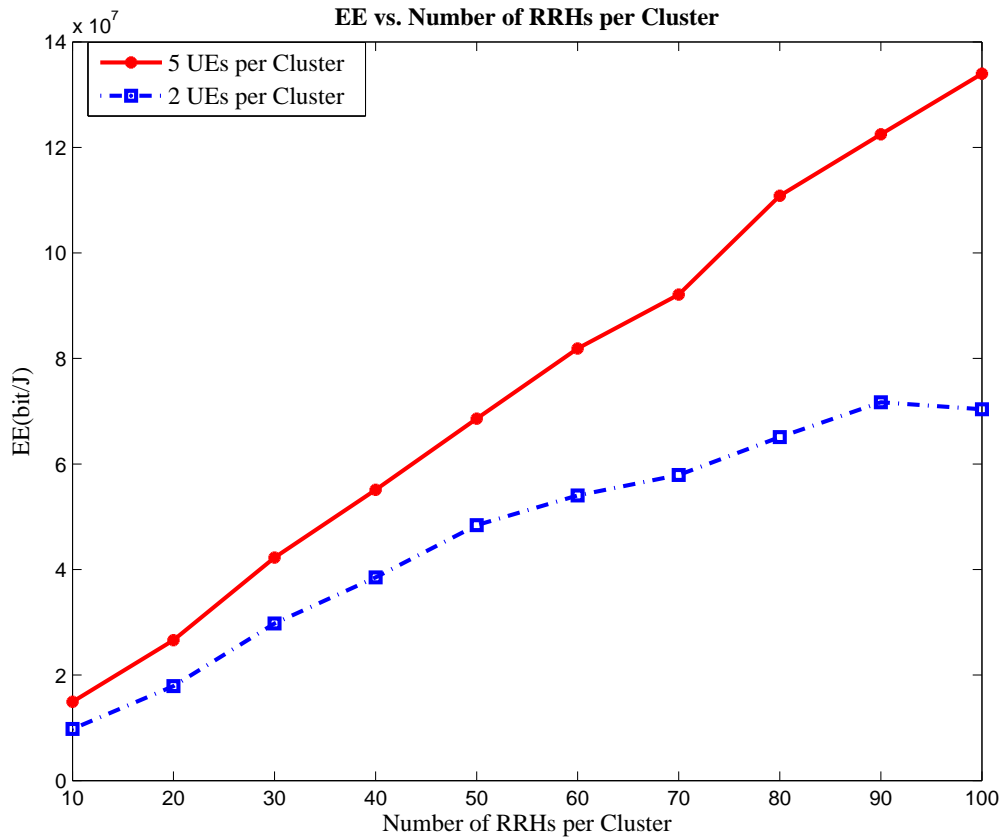
#### ۷-۲-۴ نتایج عددی

در این بخش، نتایج عددی را برای سیستم MIMO C-RAN با پارامترهای بیان شده در جدول ۴-۱ بیان می کنیم. از الگوریتم فصل سوم برای بدست آوردن نتایج عددی استفاده شده است.

Table 4-1: پارامترهای شبیه سازی

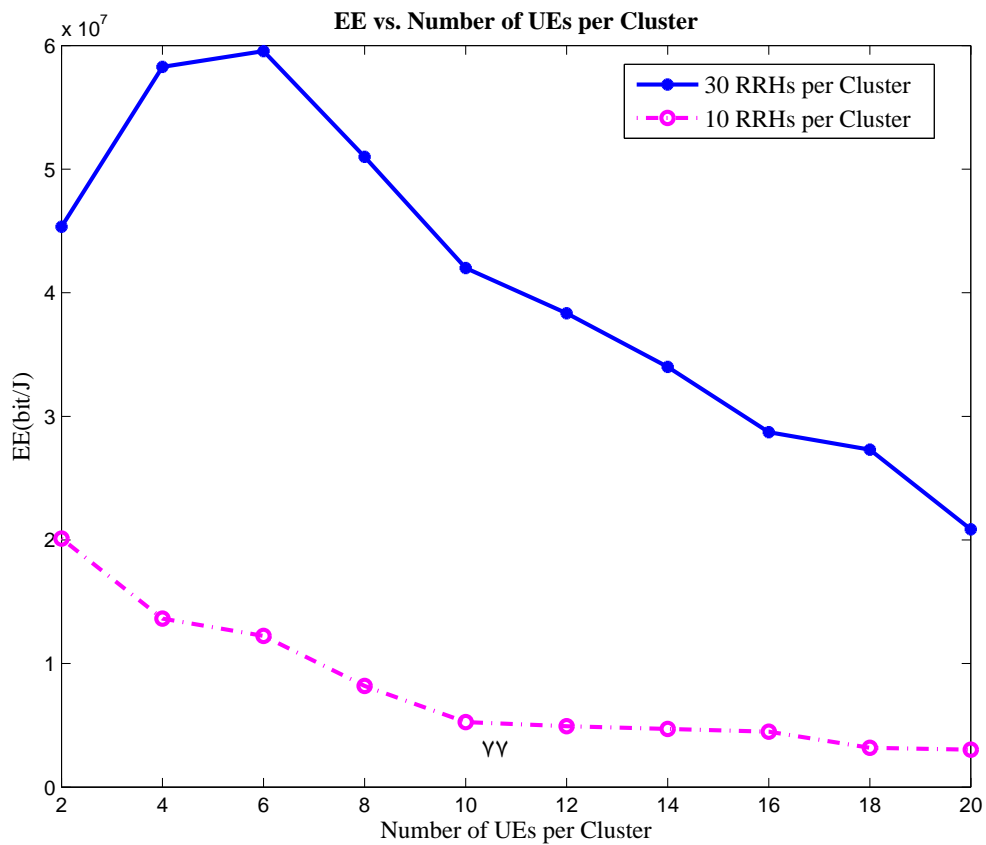
Parameter	Value
Number of cluster S	4
Noise power density	-174dBm
Bandwidth	120KHz
Maxmimun transmit Power	10dBm
Circuit Power of whole RRHs	10dBm
Variance of quantization noise	$10^{-4}$
Maxmimun fronthaul link's rate	5bits/sec/Hzm
Minimum data rate	1bits/sec/Hz

در شکل ۴-۱، بازدهی انرژی سیستم MIMO C-RAN بر اساس تعداد واحدهای رادیویی در هر خوشه برای مدل سیستم مورد نظر و برای دو تعداد کاربر متفاوت، رسم شده است. فرض اینجا بر این است که ۲ خوشه برای لینک فروسو و دو خوشه برای فراسو وجود دارد. همانطور که شکل نشان می دهد، با افزایش تعداد واحدهای رادیویی، بازدهی انرژی افزایش می یابد زیرا در اینجا با افزایش تعداد واحدهای رادیویی، مجموع توان کل افزایش می یابد در نتیجه نرخ انتقال داده نیز بیشتر می گردد و در نتیجه ی آن، بازدهی انرژی نیز افزایش یافته است. همچنین بازدهی انرژی برای تعداد کاربر بیشتر، به دلیل اینکه مجموع نرخ ها بیشتر می گردد، زیادتر می باشد.

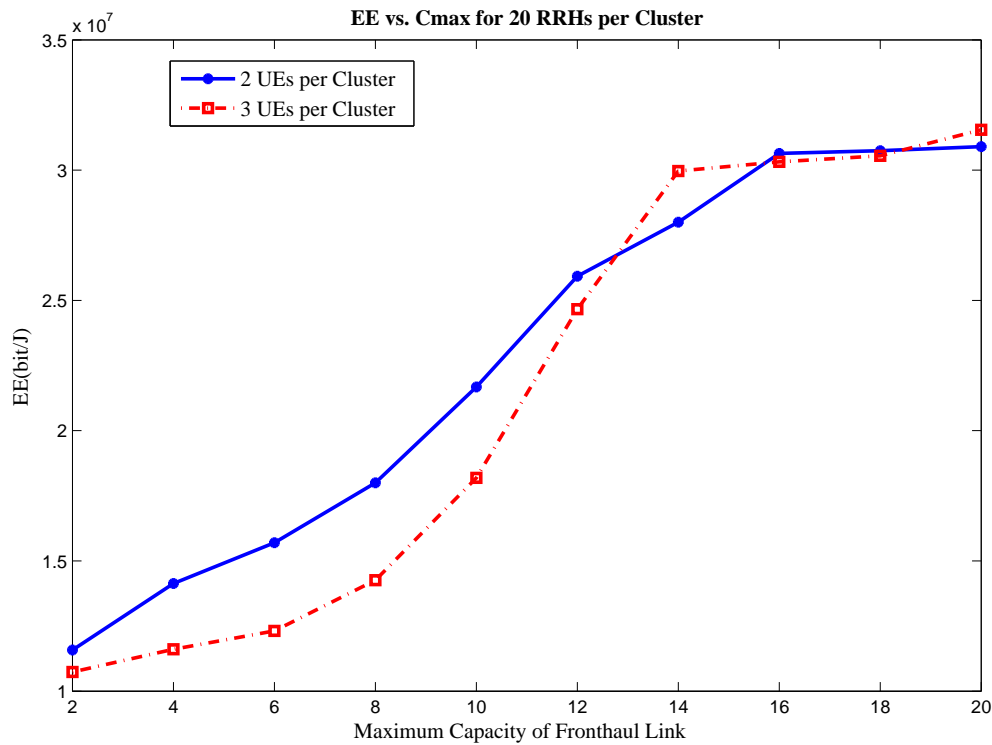


شکل ۴-۱: بازدهی انرژی با توجه به تغییرات تعداد واحدهای رادیویی در هر خوشه برای دو کاربر مختلف و پارامترهای

جدول ۴-۱



در شکل ۴-۲، بازدهی انرژی بر اساس تعداد کاربران در هر خوشه برای مدل سیستم مورد نظر و برای دو تعداد واحد رادیویی متفاوت، رسم شده است. همانطور که دیده می شود با افزایش تعداد کاربران، در حالتی که ۳۰ واحد رادیویی در هر خوشه داریم، ابتدا به دلیل افزایش کاربران و افزایش مجموع نرخ ها، بازدهی انرژی زیاد شده و در نتیجه ی آن شیب نمودار زیاد می شود ولی از یک مقدار به بعد تداخل بین کاربران افزایش می یابد و منجر به کاهش بازدهی انرژی می گردد. زمانی که تعداد کاربران زیاد نیست، تداخل بین کاربران تاثیر کمی می گذارد و با افزایش کاربران بازدهی انرژی بهبود می یابد ولی زمانی که تعداد کاربران از حدی بیشتر می شود، میزان تداخل به قدری زیاد شده که نرخ انتقال داده کاهش یافته و در نتیجه ی آن، بازدهی انرژی کاهش می یابد. در حالتی که ۱۰ واحد رادیویی در هر خوشه داریم، به دلیل اینکه میزان تداخل بین کاربران زیاد است و SINR کم است، شیب نمودار از ابتدا منفی است و بازدهی انرژی کم می گردد.



شکل ۴-۳: بازدهی انرژی با توجه به تغییرات ظرفیت پیشینه ی لینک fronthaul در هر خوشه برای دو تعداد کاربر مختلف و پارامترهای جدول ۴-۱

در شکل ۴-۳، بازدهی انرژی بر اساس تغییرات ظرفیت پیشینه ی لینک fronthaul در هر خوشه برای مدل سیستم مورد نظر و برای دو تعداد کاربر متفاوت، رسم شده است. همانطور که دیده می شود با افزایش این ظرفیت، بازدهی انرژی با شیب زیادی، افزایش یافته ولی از جایی به بعد شیب افزایش کم می گردد زیرا با افزایش پیشینه ی ظرفیت، تعداد بیت های بیشتری می تواند از این لینک عبور کند ولی از یک جایی به بعد، تعداد بیت هایی که در هر ثانیه وجود دارد از نرخ انتقال بیت کمتر است، پس با افزایش نرخ، بازدهی انرژی افزایش پیدا نمی کند.

## ۳-۴ نتیجه گیری

در این فصل، مدل سیستم جدیدی که همزمان شامل چندین خوشه ی لینک فروسو و فراسو است، بیان شده است و همزمان مجموع نرخ های قابل دسترسی بر روی توان کل خوشه های لینک فراسو و فروسو بیشینه شده است و نمودارهای آن را بر حسب تعداد کاربران و واحدهای رادیویی رسم شده اند. با توجه به نمودارها، با افزایش تعداد واحدهای رادیویی توان ارسالی افزایش یافته و بازدهی انرژی بهبود می یابد. همچنین با افزایش کاربران ابتدا بازدهی انرژی بهبود یافته زیرا مجموع توان افزایش می یابد ولی از حدی به بعد، تاثیر تداخل بین کاربران زیاد شده و بازدهی کاهش می یابد.

## فصل پنجم

# نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این فصل، ابتدا مروری بر کارهای انجام شده صورت گرفته، سپس به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری آنها پرداخته شده است. در نهایت پیشنهادات خود را برای کارهای آتی بیان نموده ایم.

## ۵-۱ مروری بر کارهای صورت گرفته

در این پروژه، ابتدا در فصل اول به بررسی ساختار سنتی ایستگاه پایه و واحد رادیویی پرداخته شده و سپس به دلیل نیاز به ساختاری جدید برای غلبه بر مشکلات آن، ساختار جدیدی به نام C-RAN که پژوهشگران در حال پرداختن به آن هستند، بیان شده است. همچنین مزایا و معایب این ساختار جدید شرح داده شده و ساختارهای دیگر H-CRAN و F-RAN نیز در ادامه توضیح داده شده است. در فصل دوم یکی از چالش‌های این ساختار که در مقالات مختلف آورده شده، شرح داده شده است که در رابطه با تخصیص منابع در لینک فراسو و فروسو می‌باشد. در فصل سوم و چهارم نیز مدل سیستم‌های جدیدی تشریح گردیده است که در ادامه خلاصه‌ای از آن شرح داده می‌شود. در فصل سوم مدل سیستمی که شامل تعدادی خوشه است در نظر گرفته شده و همچنین ظرفیت لینک fronthaul نیز محدود می‌باشد. در لینک فراسو و فروسو این مدل سیستم ارائه شده و الگوریتم تخصیص منابع بر روی آن صورت گرفته شده است. در فصل چهارم مدل سیستم فصل سوم با فرض TDD در نظر گرفته شده است. در این مدل سیستم چندین خوشه در لینک فروسو و چندین خوشه ی دیگر در همان زمان در لینک فراسو عمل می‌کنند. تداخل این دو دسته خوشه بر یکدیگر اثر می‌گذارد. حال تخصیص منابع به طور همزمان بر روی هر دو خوشه صورت می‌گیرد.

## ۵-۲ نتیجه‌گیری

با توجه به نمودارهای رسم شده در فصل‌های ۲ و ۳ و ۴، می‌توان فهمید که با افزایش تعداد واحدهای رادیویی، بازدهی انرژی بهبود می‌یابد. همچنین در مدل سیستم‌های گفته شده، پیش‌گذاری MMSE بازدهی انرژی بیشتری نسبت به MRT دارند. علاوه بر این با افزایش تعداد کاربران، ابتدا به علت افزایش مجموع نرخ‌های قابل دسترس، بازدهی انرژی بیشتر شده و سپس به دلیل افزایش تداخل بین کاربران و محسوس شدن آن، بازدهی انرژی کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش بیشینه ی ظرفیت لینک fronthaul، بازدهی انرژی افزایش پیدا می‌کند و سپس شیب افزایش بازدهی انرژی کم شده و در نهایت به مقدار خاصی میل می‌کند. علاوه بر این، هر چه قدر نویز کوانتیزاسیون کمتر باشد، بازدهی انرژی بهتر می‌گردد زیرا با کاهش نویز کوانتیزاسیون، مقدار ظرفیت لینک fronthaul بیشتر شده و خطای ناشی از فشرده‌سازی کمتر می‌شود و در نتیجه ی آن بازدهی انرژی بهبود می‌یابد.

## ۵-۳ پیشنهادات

در این بخش به بیان پیشنهادات برای کارهای آتی پرداخته شده است. یکی از کارهایی که در ادامه می‌توان انجام داد، تولید الگوریتم‌های بهینه سازی دیگر می‌باشد که منجر به بهبود بیشتر بازدهی انرژی می‌شود. همچنین الگوریتم‌های غیر محدب نیز می‌تواند مسیر بعدی این پروژه باشد. علاوه بر این



مدل سیستم های D2D نیز یکی دیگر از زمینه های کاری آتی می باشد که در راستای سیستم های F-RAN است. به علاوه استفاده از روش های یادگیری ماشین در زمینه ی خوشه سازی نیز می تواند یکی از کارهای آتی این پروژه باشد. همچنین می توان خوشه سازی و پیش کدگذاری و یا پرتو دهی را به طور همزمان با روش های تخصیص منابع برای فصل ۴ انجام داد [۴۲]. یکی دیگر از کارهای قابل انجام، این است که بتوان دریافت که به ازای هر کاربر چند واحد رادیویی نیاز است که بازدهی انرژی به بیشینه مقدار خود برسد و از آن تعداد واحد رادیویی به بعد، مقدار بازدهی انرژی تغییر چندانی نکند. همچنین می توان فصل چهارم را با روش ECF<sup>۱</sup> فشرده سازی کرد و با روش CFE<sup>۲</sup> مقایسه نمود [۱۷].

---

<sup>۱</sup> Esitimation-Compress and Forward

<sup>۲</sup> Compress-Forward Estimation

- [1] Y. Cai, F. R. Yu, and S. Bu, "Cloud radio access networks (c-ran) in mobile cloud computing systems," in *Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2014 IEEE Conference on*. IEEE, 2014, pp. 369–374.
- [2] A. Checko, H. L. Christiansen, Y. Yan, L. Scolari, G. Kardaras, M. S. Berger, and L. Dittmann, "Cloud ran for mobile networks—a technology overview," *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 405–426, 2015.
- [3] "MS Windows NT kernel description," <https://www.slideshare.net/Netmanias/201207c-ran-brief-introduction>, accessed: 2017-08-14.
- [4] *Cloud Radio Access Networks: Challenges and (Some) Solutions*, 2015.
- [5] M. Peng, Y. Li, J. Jiang, J. Li, and C. Wang, "Heterogeneous cloud radio access networks: A new perspective for enhancing spectral and energy efficiencies," *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 126–135, 2014.
- [6] M. Peng, S. Yan, K. Zhang, and C. Wang, "Fog-computing-based radio access networks: issues and challenges," *IEEE Network*, vol. 30, no. 4, pp. 46–53, 2016.
- [7] K. Wang, M. Zhao, and W. Zhou, "Graph-based dynamic frequency reuse in cloud-ran," in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014 IEEE*. IEEE, 2014, pp. 105–110.
- [8] S.-H. Park, O. Simeone, O. Sahin, and S. S. Shitz, "Fronthaul compression for cloud radio access networks: Signal processing advances inspired by network information theory," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 31, no. 6, pp. 69–79, 2014.
- [9] P.-R. Li, T.-S. Chang, and K.-T. Feng, "Energy-efficient power allocation for distributed large-scale mimo cloud radio access networks," pp. 1856–1861, 2014.
- [10] S. Namba, T. Matsunaka, T. Warabino, S. Kaneko, and Y. Kishi, "Colony-ran architecture for future cellular network," pp. 1–8, 2012.

- [11] M. Atayi, "Optimization of energy consumption in cloud radio access network," Master's thesis, Amirkabir University, 2016-2017.
- [12] S.-H. Park, O. Simeone, and S. S. Shitz, "Joint optimization of cloud and edge processing for fog radio access networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 11, pp. 7621–7632, 2016.
- [13] Y.-Y. Shih, W.-H. Chung, A.-C. Pang, T.-C. Chiu, and H.-Y. Wei, "Enabling low-latency applications in fog-radio access networks," *IEEE Network*, vol. 31, no. 1, pp. 52–58, 2017.
- [14] M. Peng, C. Wang, V. Lau, and H. V. Poor, "Fronthaul-constrained cloud radio access networks: Insights and challenges," *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 2, pp. 152–160, 2015.
- [15] K.-G. Nguyen, Q.-D. Vu, M. Juntti, and L.-N. Tran, "Energy efficient precoding c-ran downlink with compression at fronthaul," *arXiv preprint arXiv:1703.05996*, 2017.
- [16] O. Simeone, J. Kang, J. Kang, and S. Shamai, "Cloud radio access networks: Uplink channel estimation and downlink precoding," *Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementations*, pp. 429–455, 2016.
- [17] J. Kang, O. Simeone, J. Kang, and S. S. Shitz, "Joint signal and channel state information compression for the backhaul of uplink network mimo systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 3, pp. 1555–1567, 2014.
- [18] J. Kang, O. Simeone, J. Kang, and S. Shamai, "Joint precoding and fronthaul optimization for c-rans in ergodic fading channels," pp. 2683–2688, 2015.
- [19] A. El Gamal and Y.-H. Kim, *Network information theory*. Cambridge university press, 2011.
- [20] T. M. Cover and J. A. Thomas, *Elements of information theory*. John Wiley & Sons, 2012.
- [21] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Cell-free massive mimo versus small cells," *arXiv preprint arXiv:1602.08232*, 2016.

- [22] C. Yoon and D.-H. Cho, "Energy efficient beamforming and power allocation in dynamic tdd based c-ran system," *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 10, pp. 1806–1809, 2015.
- [23] Y.-C. Tsou, P.-R. Li, J.-H. Chu, and K.-T. Feng, "Joint clusterization and power allocation for cloud radio access networks," pp. 1–5, 2015.
- [24] V. Kawadia and P. Kumar, "Power control and clustering in ad hoc networks," in *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies*, vol. 1. IEEE, 2003, pp. 459–469.
- [25] A. Li, Y. Sun, X. Xu, and C. Yuan, "Joint remote radio head selection and user association in cloud radio access networks," in *Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [26] J. Zhang, Y. Jiang, P. Li, F. Zheng, and X. You, "Energy efficient power allocation in massive mimo systems based on standard interference function," in *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2016 IEEE 83rd*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [27] S. Luo, R. Zhang, and T. J. Lim, "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.
- [28] S. Wang, L. Chen, X. Chen, and G. Wei, "Joint quantisation levels and power optimisation in uplink network multiple-input and multiple-output under constraint backhaul," *IET Communications*, vol. 9, no. 16, pp. 2041–2047, 2015.
- [29] L. Liu, S. Bi, and R. Zhang, "Joint power control and fronthaul rate allocation for throughput maximization in ofdma-based cloud radio access network," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 11, pp. 4097–4110, 2015.
- [30] L. Liu and R. Zhang, "Optimized uplink transmission in multi-antenna c-ran with spatial compression and forward," *IEEE transactions on signal processing*, vol. 63, no. 19, pp. 5083–5095, 2015.
- [31] S. Luo, R. Zhang, and T. J. Lim, "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.

- [32] Y. Mo, M. Peng, H. Xiang, Y. Sun, and X. Ji, "Resource allocation in cloud radio access networks with device-to-device communications," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 1250–1262, 2017.
- [33] Z. Wang and Y. Sun, "Mode selection and resource allocation in uplink device-to-device enabled cloud radio access networks," in *Communications Workshops (ICC Workshops), 2017 IEEE International Conference on*. IEEE, 2017, pp. 1341–1345.
- [34] C.-H. Yu, K. Doppler, C. B. Ribeiro, and O. Tirkkonen, "Resource sharing optimization for device-to-device communication underlying cellular networks," *IEEE Transactions on Wireless communications*, vol. 10, no. 8, pp. 2752–2763, 2011.
- [35] M. Hong, R. Sun, H. Baligh, and Z.-Q. Luo, "Joint base station clustering and beamformer design for partial coordinated transmission in heterogeneous networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 2, pp. 226–240, 2013.
- [36] L. Liu and R. Zhang, "Downlink sinr balancing in c-ran under limited fronthaul capacity," in *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2016 IEEE International Conference on*. IEEE, 2016, pp. 3506–3510.
- [37] M. K. Motalleb, A. Kabiri, and M. J. Emadi, "Optimal power allocation for distributed mimo c-ran system with limited fronthaul capacity," in *Electrical Engineering (ICEE), 2017 Iranian Conference on*. IEEE, 2017, pp. 1978–1982.
- [38] P. Salehi, "Digital communications 5e," 2008.
- [39] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex optimization*. Cambridge university press, 2004.
- [40] M. Peng, K. Zhang, J. Jiang, J. Wang, and W. Wang, "Energy-efficient resource assignment and power allocation in heterogeneous cloud radio access networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 11, pp. 5275–5287, 2015.

- 
- [41] Z. Shen, A. Khoryaev, E. Eriksson, and X. Pan, "Dynamic uplink-downlink configuration and interference management in td-lte," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 11, 2012.
- [42] Y. Chen, X. Wen, Z. Lu, and H. Shao, "Energy efficient clustering and beamforming for cloud radio access networks," *Mobile Networks and Applications*, vol. 22, no. 3, pp. 589–601, 2017.

## Abstract

Since more rate and speed is needed in technology, new generation of technology is considered that new concepts such as CRAN, mm wave, Massive MIMO and etc are defined. Cloud radio access networks generate a new architecture for 5G that is proposed to enhance both spectral efficiency and energy efficiency. The architecture of CRAN and the difference between this architecture and traditional one is expressed. Also some system models such as clustering and limited fronthaul capacity is considered. In addition, D2D system in C-RAN is described too. The optimal power allocation for the downlink and uplink of Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Cloud Radio Access Network (C-RAN) with limited fronthaul capacity in terms of maximizing Energy Efficiency (EE) is investigated. In the considered system, in downlink the compressed and precoded message generated by Central Unit (CU) is transmitted to Remote Radio Heads (RRHs) via a fronthaul link with limited capacity, and the RRHs and Users Equipments (UEs) are assumed to be clustered into  $S$  cluster sets. In uplink, the received message by RRHs which are clustered into  $S$  clusters, is transmitted through fronthaul link to CU and in CU beamforming vector is applied to the message. Here, we use an iterative algorithm with Lagrangian function to optimize the EE. Also both uplink and downlink clusters are considered in a system model and optimization is done for both together.

### Key Words:

Cloud Radio Access Network, Multiple-Input Multiple-Output, Energy efficiency, Clusterization, Power allocation, Lagrangian function.



**Amirkabir University of Technology  
(Tehran Polytechnic)**

**Department of Electrical Engineering**

**MSc Thesis**

# **Improveing the performance of Cloud Radio Access Network with distributed cooperation**

**By**

**Mojdeh Karbalaee Motalleb**

**Supervisor**

**Dr. Mohammad Javad Emadi**

**Advisor**

**Dr. Abbas Mohammadi**

**Month 6 & Year 1396**