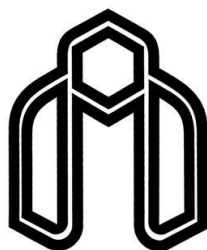


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مخابرات سیستم

بررسی کارایی ذخیره سازی محتوا در شبکه های ناهمگون بی سیم نسل پنجم

نگارنده:

فرشاد رستمی قادی

استاد راهنما:

دکتر محمدرضا جوان

تیر ۱۳۹۶

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

بهترین آموزگاران زندگی من، که بارقارشان محبت و با صبرشان ایستادگی را به من آموختند.

تقدیر و تشکر

از استاد محترم، جناب آقای دکتر محمد رضا جوان که صبورانه و مشتقانه مراد انجام این پایان نامه یاری نموده اند و در کمال

سه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کجی در این عرصه بر من دریغ نموده اند، کمال تشکر و سپاس گزاری را دارم.

تعهد نامه

اینجانب فرشاد رستمی قادی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش مخابرات دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی کارایی ذخیره‌سازی محتوا در شبکه‌های ناهمگون بی‌سیم نسل پنجم تحت راهنمایی آقای دکتر محمدرضا جوان متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ ۹۶/۶/۱۲

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

ذخیره‌سازی محتوا در ایستگاه‌های پایه کوچک و در اطراف کاربران، یک راه‌حل امیدوارکننده و کارآمد به‌منظور کاهش اثرات رشد ترافیک در شبکه‌های بی‌سیم می‌باشد. در این پایان‌نامه به بررسی عملکرد ذخیره‌سازی محتوا در یک شبکه سلولی ناهمگون دولایه می‌پردازیم. یک شبکه سلولی ناهمگون شامل مجموعه‌ای از ایستگاه‌های پایه بزرگ و ایستگاه‌های پایه کوچک با سطوح توان انتقال متفاوت می‌باشد که هدف اصلی آن کاهش فاصله بین کاربران و ایستگاه‌های پایه و همچنین افزایش سرعت و احتمال دسترسی موفق به محتوا می‌باشد. در این پایان‌نامه ایستگاه‌های پایه طبق فرایند نقطه‌ای پواسون در شبکه توزیع می‌شوند و درخواست کاربران نیز بر اساس مرتبه محبوبیت محتوا می‌باشد که طبق توزیع زیف مدل می‌گردد. نوآوری سیستم مدل پیشنهادی در مشارکت بین ایستگاه‌های پایه به‌منظور تحویل محتوا به کاربر می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر، کاربر درخواست دهنده محتوا هیچ‌گاه به‌طور مستقیم به ایستگاه پایه بزرگ متصل نمی‌شود و محتوا همواره از طریق ایستگاه پایه کوچک برای کاربر فراهم می‌شود. بنابراین به‌منظور بررسی عملکرد سیستم مدل پیشنهادی متوسط احتمال قطع را در یک فرم بسته بدست می‌آوریم. همچنین با فرض اینکه ارتباط بین نودهای شبکه بر اساس تکنیک درخواست تکرار خودکار می‌باشد، متوسط تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر را در یک انتقال موفق محتوا در یک فرم بسته بدست می‌آوریم. درنهایت با استفاده از نتایج شبیه‌سازی بدست آمده در سیستم مدل پیشنهادی، نشان می‌دهیم که با افزایش مرتبه محبوبیت محتوا و همچنین افزایش چگالی ایستگاه‌های پایه کوچک، متوسط احتمال قطع و متوسط تأخیر تجربه شده توسط کاربر کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: ذخیره‌سازی محتوا، شبکه سلولی ناهمگون، فرایند نقطه‌ای پواسون، توزیع زیف،

متوسط احتمال قطع، درخواست تکرار خودکار، متوسط تأخیر

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ پیشگفتار
۵	۲-۱ اهداف و فرضیات پایان نامه
۸	۳-۱ ساختار پایان نامه
۱۱	فصل ۲: مفاهیم پایه و مرور پژوهش‌های پیشین
۱۲	۱-۲ مقدمه
۱۲	۲-۲ شبکه‌های ناهمگون
۱۶	۳-۲ سیاست مشارکت کاربران
۱۹	۴-۲ حافظه پنهان
۲۱	۱-۴-۲ ذخیره‌سازی محتوا
۲۳	۵-۲ مدل‌سازی شبکه‌های سلولی تصادفی
۲۵	۱-۵-۲ روش هندسه تصادفی
۲۵	۶-۲ اصول هندسه تصادفی
۲۶	۱-۶-۲ فرایند نقطه‌ای

۲۷	..... نمادگذاری ۲-۶-۲
۲۸	..... فرایند نقطه‌ای پواسون ۳-۶-۲
۲۹	..... ویژگی‌های کلیدی در PPP ۴-۶-۲
۳۳	..... مروری بر پژوهش‌های پیشین ۷-۲
۴۱	فصل ۳: احتمال قطع در شبکه سلولی ناهمگون دولایه
۴۲	..... مقدمه ۱-۳
۴۲	..... سیستم مدل پیشنهادی ۲-۳
۴۵	..... مدل سیگنال ۳-۳
۴۷	..... بررسی کارایی سیستم ۴-۳
۴۷	..... توابع چگالی احتمال ۱-۴-۳
۴۸	..... توزیع درخواست محتوا ۲-۴-۳
۴۹	..... احتمال قطع ۳-۴-۳
۵۶	..... نتایج شبیه‌سازی ۵-۳
۵۹	فصل ۴: تأخیر در شبکه ناهمگون دولایه با استفاده از تکنیک درخواست تکرار خودکار
۶۰	..... مقدمه ۱-۴
۶۰	..... سیستم مدل پیشنهادی ۲-۴

۶۱	..... ۱-۲-۴ انواع تأخیر
۶۳	..... ۳-۴ تحلیل تأخیر
۷۴	..... ۵-۴ نتایج شبیه‌سازی
۸۱	..... فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده
۸۲	..... ۱-۵ نتیجه‌گیری و جمع‌بندی
۸۳	..... ۲-۵ پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده
۸۵	..... فهرست مراجع

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۱۴	شکل (۱-۲) شبکه سلولی ناهمگون شامل ایستگاه پایه بزرگ، ایستگاه‌های پایه کوچک
۱۸	شکل (۲-۲) نمایش شبکه ناهمگون با استفاده از دیاگرام ورونی
۲۴	شکل (۳-۲) مدل شبکه شش ضلعی
۲۷	شکل (۴-۲) انواع فرایندهای نقطه‌ای
۵۷	شکل (۱-۳) متوسط احتمال قطع بر حسب مقدار λ_{SBS} به ازای γ های مختلف
۵۸	شکل (۲-۳) متوسط احتمال قطع بر حسب مقدار آستانه SIR به ازای γ های مختلف
۷۶	شکل (۱-۴) تأخیر تجربه شده توسط کاربر در حالت اول به ازای مقادیر مختلف M و λ_{SBS}
۷۷	شکل (۲-۴) تأخیر تجربه شده توسط کاربر در حالت دوم به ازای مقادیر مختلف M و λ_{SBS}
۷۸	شکل (۳-۴) متوسط تأخیر تجربه شده توسط کاربر به ازای مقادیر مختلف M و λ_{SBS}
۷۹	شکل (۴-۴) متوسط تأخیر تجربه شده توسط کاربر به ازای مقادیر مختلف γ و λ_{SBS}

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۱۶	جدول (۱-۲) انواع نودها در شبکه سلولی ناهمگون
۷۵	جدول (۱-۴) مقادیر پارامترهای شبکه برای شبیه‌سازی

لیست اختصارات

5G	Fifth Generation
ICN	Information Centric Network
SBS	Small Base Station
SCN	Small Cell Network
MBS	Macro Base Station
FBS	Femto Base Station
PBS	Pico Base Station
HCN	Heterogeneous Cellular Network
ARQ	Automatic Repeat Request
PPP	Poisson Point Process
ACK	Acknowledgement
ACK	Negative Acknowledgement
CRE	Cell Range Expansion
CDN	Content Delivery Network
SINR	Signal-to-Interference-plus Noise Ratio
PP	Point Process
BPP	Binomial Point Process
PCP	Poisson Cluster Process
HCPP	Hard Core Point Process
LT	Laplace Transform
CDF	Cumulative Distribution Function
PDF	Probability Density Function
D2D	Device-to-Device
SAP	Small cell Access Point
CNA	Core Network Aggregator
SG	Small cell Gateway
I.I.D	Independent and Identically Distribution
SSD	Solid-State Disk

فصل ۱:

مقدمه

۱-۱ پیشگفتار

امروزه شاهد رشد چشم‌گیری در ترافیک اینترنت جهانی هستیم به طوری که انتظار می‌رود این روند در پنج سال آینده تا سه برابر، و از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱ با نرخ سالیانه ۲۴ درصد افزایش یابد [۱]. این روند بانفوذ بسته‌های باند پهن تلفن همراه و محبوبیت دستگاه‌های مدرن ارتباطی با صفحه‌نمایش بزرگ و دستگاه‌های چندرسانه‌ای امروزی مانند تلفن‌های هوشمند، تبلت‌ها و نوت‌بوک‌ها روز به روز در حال افزایش است. در حال حاضر اصلی‌ترین و مهم‌ترین عامل ایجاد ترافیک داده تلفن همراه، جریان‌های ویدئویی تلفن همراه می‌باشد، به طوری که در سال ۲۰۱۶ تقریباً ۶۰ درصد از این حجم ترافیک را به خود اختصاص داده است [۲]. همچنین در حال حاضر شبکه‌های اجتماعی با متوسط سهم ۱۵ درصد دومین عامل اصلی ترافیک داده می‌باشد [۳]. این تحولات نویدبخش ظهور یک عصر جدید در سیستم‌های ارتباطی است که با چالش‌های جدیدی برای تحویل و اشتراک‌گذاری محتوا در شبکه‌های بی‌سیم همراه می‌باشد.

برای مقابله با این افزایش بی‌رویه ترافیک جهانی، تمامی تلاش‌ها در جهت معرفی سیستم‌های مخابرات سلولی نسل پنجم^۱ در حال انجام است. به طوری که انتظار می‌رود این سیستم تا سال ۲۰۲۰ مورد استفاده

¹ Fifth Generation (5G)

قرار گیرد. سیستم نسل پنجم می‌بایست اتصال بی‌سیم سریع، انعطاف‌پذیر، قابل‌اعتماد و پایدار را فراهم کند و درعین حال ترافیک داده تلفن همراه را کنترل نماید [۴-۵].

روش‌های سنتی برای افزایش ظرفیت شبکه مانند ارتقاء فن‌آوری (به‌طور مثال از DSL به فیبر نوری و یا از WCDMA به LTE) در برخی موارد ممکن است پرهزینه و نیازمند زمان قابل‌توجه برای پیاده‌سازی باشد. به همین منظور در سال‌های اخیر، مفهوم جدیدی از شبکه‌ها، تحت عنوان شبکه‌های اطلاعات محور^۱ (ICN) پدیدار شده است، که هدف آن تغییر در راه دسترسی به محتوا در اینترنت به‌وسیله نام‌گذاری منحصربه‌فرد محتوا، تکرار و بازگردانی آن می‌باشد که اغلب سبب دسترسی به اطلاعات در سراسر شبکه می‌شود.

دراین‌بین یک روش جدید و جایگزین برای کاهش اثرات رشد ترافیک و به اشتراک‌گذاری بهتر محتوا، تکرار کردن محتویات محبوب^۲ (به‌عنوان مثال، فیلم، کلیپ‌های ویدئویی، اخبار روزانه و غیره) در حافظه‌های پنهان^۳ می‌باشد که در لبه شبکه^۴ و اطراف کاربران نصب شده است. به‌این ترتیب محتویات محبوب ذخیره‌شده می‌تواند به‌سرعت به درخواست‌کننده‌ها تحویل داده شود و سبب کاهش مصرف پهنای باند و افزایش ظرفیت

¹ Information Centric Network (ICN)

² Popular Content

³ Cache

⁴ Network Edge

در شبکه شود. بنابراین یکی از راه‌های مؤثر برای افزایش ظرفیت شبکه قرار دادن ایستگاه‌های پایه کوچک^۱ (SBS) بافاصله‌ی بسیار کمتر در اطراف کاربران می‌باشد، به‌طوری‌که اخیراً طراحان شبکه‌های بی‌سیم علاقه زیادی به به‌کارگیری آنتن‌ها، رله‌ها^۲ و نقاط دسترسی سلولی کوچک^۳ در خانه‌های مسکونی، متروها، شرکت‌ها و مناطق پرجمعیت دارند. این نوع از معماری شبکه که در آن هم اپراتور و هم کاربر مستقر شده‌اند، شبکه ناهمگون^۴ (HetNet) یا شبکه سلولی کوچک^۵ (SCN) گفته می‌شود [۶] و [۷].

یک شبکه ناهمگون شامل تعدادی ایستگاه پایه بزرگ^۶ (MBS) و ایستگاه پایه کوچک (شامل ایستگاه پایه فمتو^۷ (FBS) و ایستگاه پایه پیکو^۸ (PBS)) می‌باشد که در ساختار شبکه قرار گرفته‌اند. برخلاف SBSها، هر یک از MBSها دارای سطح انتقال توان بالا می‌باشند که به‌منظور ایجاد یک ناحیه پوشش پایه، به‌طور منظم در شبکه قرار می‌گیرند. ایده اصلی شبکه‌های ناهمگون بهبود کارایی طیفی در واحد سطح، با به‌کارگیری یک مجموعه متنوع و با توان انتقال پایین از SBSها می‌باشد که در داخل ناحیه تحت پوشش سلولی بزرگ قرار می‌گیرند. در واقع شبکه‌ی ناهمگون با استقرار نودهای مختلف در محدوده‌های محلی،

^۱ Small Base Station (SBS)

^۲ Relay

^۳ Access Point

^۴ Heterogeneous Network (HetNet)

^۵ Small Cell Network (SCN)

^۶ Macro Base Station (MBS)

^۷ Femto Base Station (FBS)

^۸ Pico Base Station (PBS)

سبب کاهش فاصله بین کاربران و ایستگاه‌های پایه می‌شود که به دنبال آن سرعت دسترسی کاربران به محتوای درخواستی افزایش یافته و تأخیر دسترسی به محتوا را کاهش می‌دهد [۸-۱۰].

۱-۲ اهداف و فرضیات پایان‌نامه

هدف اصلی این پایان‌نامه بررسی کارایی و عملکرد ذخیره‌سازی محتوا^۱ در شبکه‌ی سلولی ناهمگون^۲ (HCN) بی‌سیم می‌باشد. به همین منظور احتمال قطع دسترسی به محتوا، احتمال موفقیت در تحویل محتوا از سوی ایستگاه‌های پایه به کاربر درخواست‌کننده محتوا، محاسبه می‌شود. همچنین تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر در یک انتقال فرسو^۳ با استفاده از تکنیک درخواست تکرار خودکار^۴ (ARQ)، به‌طور مجزا محاسبه می‌گردد.

نوآوری سیستم مدل پیشنهادی در مشارکت بین ایستگاه‌های پایه به‌منظور تحویل محتوا به کاربر درخواست‌دهنده می‌باشد، به‌طوری‌که تاکنون در هیچ سیستم مدل دیگری، ذخیره‌سازی و تحویل محتوا به کاربران به‌صورت مشارکتی انجام نشده است. درواقع در سیستم مدل پیشنهادی کاربر درخواست‌دهنده

¹ Content Caching

² Heterogeneous Cellular Network (HCN)

³ Downlink

⁴ Automatic Repeat Request (ARQ)

محتوا هیچ‌گاه به‌طور مستقیم به ایستگاه پایه بزرگ متصل نمی‌شود و محتوا همواره از سوی ایستگاه پایه کوچک برای کاربر فراهم می‌شود.

در ابتدا یک شبکه ناهمگون دولایه در فضای اقلیدسی دوبعدی در یک انتقال فروسو شامل ایستگاه‌های پایه کوچک و ایستگاه‌های پایه بزرگ مطرح شده است. در سیستم مدل پیشنهادشده، MBSها و SBSها طبق فرآیند نقطه‌ای پواسون^۱ (PPP) با چگالی‌های مختلف توزیع شده‌اند، به‌طوری‌که تعداد SBSها نسبت به MBSها خیلی بیشتر است. برای هر یک از MBSها یک حافظه با ظرفیت بزرگ و معین در نظر گرفته شده و مجموعه تمامی محتویات در آن قرار داده شده است. در مقابل برای هر یک از SBSها یک حافظه با ظرفیت محدود و کوچک به‌منظور ذخیره‌سازی محتویات محبوب در نظر گرفته شده است. سیاست ذخیره‌سازی محتوا در SBSها بر اساس مرتبه محبوبیت محتویات می‌باشد که با استفاده از توزیع زیف^۲ مدل می‌گردد، به‌طوری‌که زیرمجموعه‌ای از محبوب‌ترین محتویات به‌صورت یکسان در SBSها ذخیره می‌شوند.

زمانی که کاربر فایلی را درخواست می‌کند ابتدا کاربر به نزدیک‌ترین SBS متصل می‌شود که در صورت وجود محتوای درخواستی در SBS، محتوای موردنظر به کاربر تحویل داده می‌شود. در غیر این صورت؛ اگر محتوای درخواستی در SBS وجود نداشته باشد، SBS به نزدیک‌ترین MBS متصل می‌شود. از آنجایی‌که

¹ Poisson Point Process (PPP)

² Zipf Distribution

MBS مجموعه‌ای از تمامی محتویات را در اختیار دارد، محتوای درخواستی را برای SBS ارسال می‌کند. بنابراین بعد از دریافت محتوا از سوی MBS، SBS محتوای دریافتی را برای کاربر ارسال می‌کند. در واقع در این سیستم مدل کاربر هیچ‌گاه به‌طور مستقیم به MBS متصل نمی‌شود.

در فصل بعدی به محاسبه متوسط تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر درخواست‌کننده محتوا می‌پردازیم. در فصل چهارم فرض می‌کنیم ارتباط بین MBS و SBS و ارتباط بین SBS با کاربر بر اساس تکنیک ARQ می‌باشد که در یک شکاف زمانی^۱ انجام می‌شود. زمانی که کاربر فایلی را درخواست می‌کند ابتدا درخواست او برای نزدیک‌ترین SBS ارسال می‌شود، در حالت اول اگر محتوای درخواستی در SBS وجود داشته باشد و با موفقیت کاربر تحویل داده شود، یک بیت تصدیق^۲ (ACK) با تأخیر و خطای ناچیز از سوی کاربر برای SBS ارسال می‌شود. در غیر این صورت اگر محتوای درخواستی با موفقیت تحویل داده نشود، SBS یک بیت عدم تصدیق^۳ (NACK) با همان ویژگی از سوی کاربر دریافت می‌کند.

در حالت دوم اگر محتوای درخواستی از سوی کاربر در SBS وجود نداشته باشد، SBS درخواست را برای نزدیک‌ترین MBS ارسال می‌کند. از آنجایی که MBS مجموعه‌ای از تمامی محتویات را در اختیار دارد، محتوا را برای SBS ارسال می‌کند. اگر محتوا با موفقیت به SBS تحویل داده شود، یک بیت ACK با تأخیر

^۱ Time Slot

^۲ Acknowledgement (ACK)

^۳ Negative Acknowledgement (NACK)

و خطای ناچیز از سوی SBS برای MBS ارسال می‌شود. در غیر این صورت اگر محتوای درخواستی با موفقیت تحویل داده نشود، MBS یک بیت NACK با همان ویژگی از SBS دریافت می‌کند. پس از اینکه محتوا با موفقیت به SBS تحویل داده شود، SBS محتوای دریافتی را برای کاربر ارسال می‌کند. در نتیجه مانند حالت اول اگر کاربر محتوا را دریافت نکند، یک پیام NACK برای SBS ارسال می‌کند. بنابراین SBS به محض دریافت پیام NACK، محتوا را مجدداً برای کاربر ارسال می‌کند تا اینکه محتوا با موفقیت به کاربر تحویل داده شود. فرض می‌کنیم تعداد مراحل تکنیک ARQ از MBS به SBS و از SBS به کاربر محدود می‌باشد. بنابراین یک قطع انتقال زمانی رخ می‌دهد که محتوا در تعداد مراحل از پیش تعریف شده ی ARQ، با موفقیت دریافت نشود.

۳-۱ ساختار پایان نامه

ساختار کلی این پایان نامه در پنج فصل دسته‌بندی می‌شود.

در فصل دوم (مفاهیم پایه و مروری بر کارهای پیشین) پیش‌زمینه‌های مورد نیاز جهت درک بهتر

مفاهیم اصلی استفاده شده در این پایان نامه بیان می‌شود. شبکه ناهمگون، ذخیره‌سازی محتوا، سیاست

مشارکت کاربران در شبکه و اصول هندسه تصادفی^۱ در این فصل توضیح داده می‌شود. همچنین در ادامه

^۱ Stochastic Geometry

مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌های مورد بحث و مسئله اصلی مورد مطالعه در این پایان‌نامه ارائه می‌شود و سپس ارتباط موضوع تحقیق با پژوهش‌ها و سیستم مدل‌های پیشین بیان می‌گردد.

در فصل سوم (احتمال قطع در شبکه سلولی ناهمگون دولایه) یک شبکه ناهمگون دولایه شامل

ایستگاه‌های پایه بزرگ و ایستگاه‌های پایه کوچک را در نظر می‌گیریم که هر کدام از نودها طبق فرآیند نقطه‌ای پواسون توزیع شده‌اند. فرض می‌کنیم ایستگاه‌های پایه کوچک قابلیت ذخیره‌سازی محتویات را دارند. همچنین ذخیره‌سازی محتوا را بر اساس درجه محبوبیت و بر اساس توزیع زیف مدل می‌کنیم. احتمال انتقال موفق محتوا و همچنین احتمال قطع انتقال محتوا از MBS به SBS و از SBS به کاربر نوعی را محاسبه می‌کنیم. در نهایت عملکرد سیستم مدل مطرح شده را با توجه به نتایج شبیه‌سازی ارزیابی می‌کنیم.

در فصل چهارم (تأخیر در شبکه ناهمگون دولایه با استفاده از تکنیک ARQ) به محاسبه متوسط

تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر درخواست‌کننده محتوا در شبکه سلولی می‌پردازیم. فرض می‌کنیم ارتباط بین MBS و SBS و ارتباط بین SBS با کاربر نوعی بر اساس تکنیک ARQ می‌باشد. همچنین فرض می‌کنیم هر مرحله درخواست تکرار خودکار به اندازه T_0 از زمان طول می‌کشد و حداکثر تعداد مراحل درخواست تکرار خودکار برای هر محتوای درخواستی از سوی کاربر برابر با مقدار مشخص M می‌باشد. در ادامه با استفاده از نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، سیستم مدل پیشنهادی را ارزیابی می‌کنیم.

در فصل پنجم (نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده)، مسائل بررسی‌شده در این

پایان‌نامه را جمع‌بندی می‌کنیم و سیستم‌مدل‌های دیگری را برای پژوهش‌های آینده ارائه می‌دهیم.

فصل ۲:

مفاهیم پایه و مرور پژوهش‌های پیشین

۲-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا به معرفی شبکه سلولی ناهمگون به عنوان یکی از کارآمدترین شبکه‌های سلولی برای پیاده‌سازی سیستم‌های نسل پنجم می‌پردازیم و عملکرد آن را با شبکه‌های سلولی سنتی مقایسه می‌کنیم. همچنین مفهوم حافظه پنهان و ذخیره‌سازی محتوا در شبکه‌های مخابراتی را مطرح می‌کنیم و مزایای ذخیره‌سازی محتوا و کارایی آن در شبکه‌های مخابراتی را بیان می‌کنیم. در ادامه به بررسی مفهوم هندسه تصادفی و ویژگی‌های آن، به عنوان یکی از اساسی‌ترین مفاهیم در شبکه‌های سلولی ناهمگون می‌پردازیم. در انتهای این فصل نیز مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه شبکه‌های سلولی ناهمگون، محدودیت‌های اساسی ذخیره‌سازی محتوا در شبکه‌های اطلاعات محور و تأثیر لینک‌های بک‌هال^۱ بر شبکه‌های بی‌سیم خواهیم داشت.

۲-۲ شبکه‌های ناهمگون

شبکه‌های سلولی سنتی، عموماً به صورت شبکه‌های همگن^۲ می‌باشند، به طوری که در آن مجموعه‌ای از ایستگاه‌های پایه با سطوح توان انتقال یکسان و لینک‌های بک‌هال مشابه طراحی می‌شوند. این ایستگاه‌های پایه، معمولاً با عنوان ایستگاه‌های پایه بزرگ شناخته می‌شوند که دارای اندازه‌های بزرگ، توان انتقال بالا و

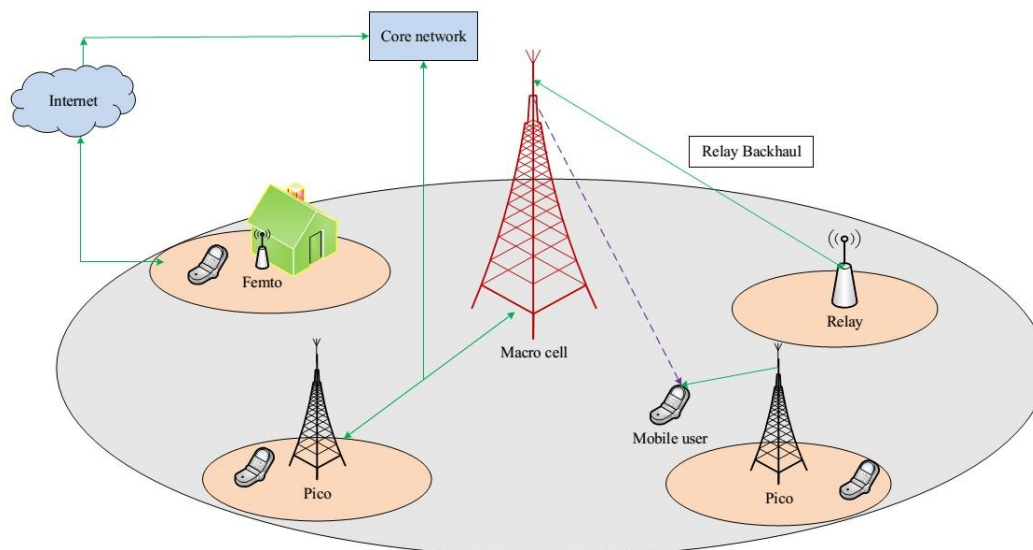
^۱ Backhaul

^۲ Homogenous Network

ناحیه سلولی تحت پوشش وسیع می‌باشند. مکان قرارگیری MBSها به‌طور دقیق و با دقت بالا در شبکه طراحی می‌شود، همچنین تنظیمات MBSها طوری انجام می‌شود که بیشترین ناحیه پوشش را داشته باشد و تداخل ناشی از سایر ایستگاه‌های پایه را کنترل نماید.

امروزه با افزایش تقاضا در داده‌های تلفن همراه، اپراتورهای شبکه‌های سلولی درصدد تقسیم سلولی نواحی و یا افزایش تعداد ایستگاه‌های پایه، به‌منظور افزایش ظرفیت شبکه می‌باشند. باین‌حال، افزایش به‌کارگیری و استقرار ایستگاه‌های پایه بزرگ در مناطق شهری، به دلیل موقعیت‌یابی مناسب برای MBSها، بسیار سخت و گران‌بها می‌باشد. علاوه براین، یکی دیگر از معایب شبکه‌های سلولی سنتی، پیچیدگی بیش‌ازحد در تجزیه و تحلیل تداخل درون شبکه‌ای می‌باشد. بنابراین، امروزه طراحی شبکه‌های سلولی سنتی، کارایی مناسبی در استقرار ایستگاه‌های پایه ندارد. به همین منظور و برای حل این مشکل، شبکه‌های جدیدی تحت عنوان شبکه‌های سلولی ناهمگون معرفی شدند [۱۱] و [۱۲]. ایده اصلی شبکه‌های ناهمگون بهبود کارایی طیفی در واحد سطح، با به‌کارگیری یک مجموعه‌ی متنوع و با توان انتقال پایین از ایستگاه‌های پایه کوچک می‌باشد که در داخل ناحیه تحت پوشش سلولی بزرگ قرار می‌گیرند. همچنین ایستگاه‌های پایه کوچک به‌طور نامنظم و تصادفی در شبکه مستقر می‌شوند. این نوع از مدل‌سازی در موقعیت‌یابی ایستگاه‌های پایه با استفاده از ابزار هندسه تصادفی انجام می‌شود.

بنابراین یکی از راه‌های مؤثر و بسیار کارآمد برای افزایش ظرفیت شبکه، کوچک‌تر کردن شعاع سلول‌ها با کاهش فاصله آن‌ها نسبت به کاربران می‌باشد. به طوری که شعاع سلول‌ها از صدها کیلومتر مربع در دهه هشتاد میلادی به کسری از مترمربع در عصر حاضر رسیده است. همین امر سبب شده است که طراحان شبکه‌های بی‌سیم علاقه زیادی به به‌کارگیری آنتن‌ها، رله‌ها و نقاط دسترسی سلولی کوچک (مانند میکرو، پیکو و فمتو) در خانه‌های مسکونی، متروها، شرکت‌ها و مناطق پرجمعیت داشته باشند. این نوع از معماری شبکه که در آن هم اپراتورها و یا کاربران مستقر شده‌اند، شبکه ناهمگون (HetNet) یا شبکه سلولی کوچک (SCN) گفته می‌شود [۶] و [۷]. شکل (۱-۲) یک شبکه‌ی سلولی ناهمگون را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۲) شبکه‌ی سلولی ناهمگون شامل ایستگاه پایه بزرگ، ایستگاه‌های پایه کوچک (پیکو، فمتو و رله).

این شبکه‌ی سلولی شامل تعدادی MBS و SBS می‌باشد که در ساختار شبکه قرار داده شده‌اند. هر یک از MBSها دارای سطح انتقال توان بالا و در حدود ۵ الی ۴۰ وات می‌باشند که به‌منظور ایجاد یک ناحیه پوشش پایه، به‌طور منظم در شبکه قرار می‌گیرند. درمقابل هر یک از SBSها (پیکو، فمتو، رله) دارای سطح انتقال توان پایین و در حدود ۱۰۰ میلی وات الی ۲ وات می‌باشند. PBSها معمولاً برای استقرار در فضای آزاد در نظر گرفته می‌شوند که سبب کاهش نقاط مرده^۱ (مناطق بدون پوشش) و هات اسپات^۲ (مکان‌هایی که ترافیک تقاضا بیشتر است) می‌شوند. بنابراین نحوه‌ی قرارگیری PBSها برنامه‌ریزی نشده و در صورت نیاز مورد استفاده قرار می‌گیرند. PBSها از نظر دسترسی و مشخصات بک‌ها معمولاً مشابه MBSها می‌باشند [۱۳]، با این تفاوت که PBSها در سطح پایینی از توان انتقال عمل می‌کنند. از طرف دیگر FBSها معمولاً برای استقرار در فضای داخلی در نظر گرفته می‌شوند و دارای سطح توان انتقال پایین می‌باشند [۱۴]. زمانی که استفاده از بک‌ها سیمی امکان‌پذیر نیست، از رله در شبکه استفاده می‌شود. بسته به اینکه اتصالات بک‌ها به‌عنوان لینک‌های اتصال در همان فرکانس و یا در فرکانس‌ها مختلف باشد، رله‌ها به دو دسته درون باند^۳ و خارج باند^۴ تقسیم می‌شوند [۱۵].

^۱ Dead-spot

^۲ Hot-spot

^۳ In-band

^۴ Out-of-band

به طور خلاصه انواع مختلف نودهای استفاده شده در یک شبکه‌ی ناهمگون در جدول (۱-۲) آورده شده است.

جدول (۱-۲) انواع نودها در شبکه سلولی ناهمگون.

نود	توان انتقال	مشخصات
Macro	۵ وات الی ۴۰ وات	دسترسی باز، بک‌هال اختصاصی، ناحیه پوشش ۱ الی ۳۵ کیلومتر
Pico	۲۵۰ میلی وات الی ۲ وات	مشخصات دسترسی و بک‌هال مشابه MBS، ناحیه پوشش ۰/۲ الی ۱ کیلومتر
Femto	کمتر از ۱۰۰ میلی وات	دسترسی بسته (اما می‌تواند باز یا ترکیبی باشد)، به‌کارگیری بک‌هال از طریق خط مشترک دیجیتال مصرف‌کننده و یا مودم‌های کابلی، ناحیه پوشش کمتر از ۱۰ متر
Relay	۲۵۰ میلی وات الی ۲ وات	بک‌هال بی‌سیم

۳-۲ سیاست مشارکت کاربران

مشارکت کاربران یا انتخاب سلول‌ها یکی از مسائل کلیدی در طراحی شبکه‌های سلولی ناهمگون می‌باشد.

روش‌های سنتی مشارکت کاربران که در آن یک کاربر تلفن همراه به ایستگاه پایه با قوی‌ترین سیگنال

دریافتی فروسو متصل است، ممکن است در شبکه‌های ناهمگون مناسب نباشد. اختلاف زیاد توان ارسالی

بین ایستگاه‌های پایه بزرگ و ایستگاه‌های پایه کوچک، به این معنی است که ناحیه تحت پوشش ایستگاه-

های پایه کوچک به‌طور بالقوه بسیار کوچک‌تر از ایستگاه‌های پایه بزرگ است. بنابراین مشارکت بر اساس

قوی‌ترین سیگنال دریافتی سبب می‌شود که بسیاری از کاربران مجذوب ایستگاه‌های پایه بزرگ شوند و تنها درصد کمی از کاربران به ایستگاه‌ها پایه کوچک متصل شوند. این وضعیت سبب انباشتگی بار در ایستگاه‌های پایه بزرگ شود، درحالی‌که سایر منابع که در نزدیکی کاربران قرار دارند به‌طور کامل مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. بنابراین، حتی اگر یک کاربر تلفن همراه قوی‌ترین سیگنال را از ایستگاه پایه بزرگ دریافت می‌کند، بهتر است به نزدیک‌ترین ایستگاه پایه کوچکی متصل شود که می‌تواند با بیشترین نرخ داده به کاربر تلفن همراه سرویس دهد. اتصال به نزدیک‌ترین ایستگاه پایه کوچک سبب کاهش بار روی ایستگاه‌های پایه بزرگ می‌شود، در نتیجه کاربران باقیمانده با نرخ بهتری سرویس‌دهی می‌شود.

سیاست بهینه مشارکت کاربران در شبکه‌های ناهمگون، سیاستی است که در آن نرخ داده تمام کاربران از طریق توزیع متعادل کاربران در تمامی لایه‌های شبکه، بیشترین مقدار ممکن شود. اما چنین مشارکت بهینه‌ای دارای محاسبات بسیار پیچیده می‌باشد [۱۶]. یک روش ساده و بسیار مؤثر گسترش محدوده سلولی^۱ (CRE) می‌باشد که ناحیه تحت پوشش ایستگاه‌های پایه کوچک و با توان پایین را گسترش می‌دهد [۱۱] و [۱۲]. به این نوع از سیاست مشارکت کاربران، مشارکت باپاس^۲ می‌گویند.

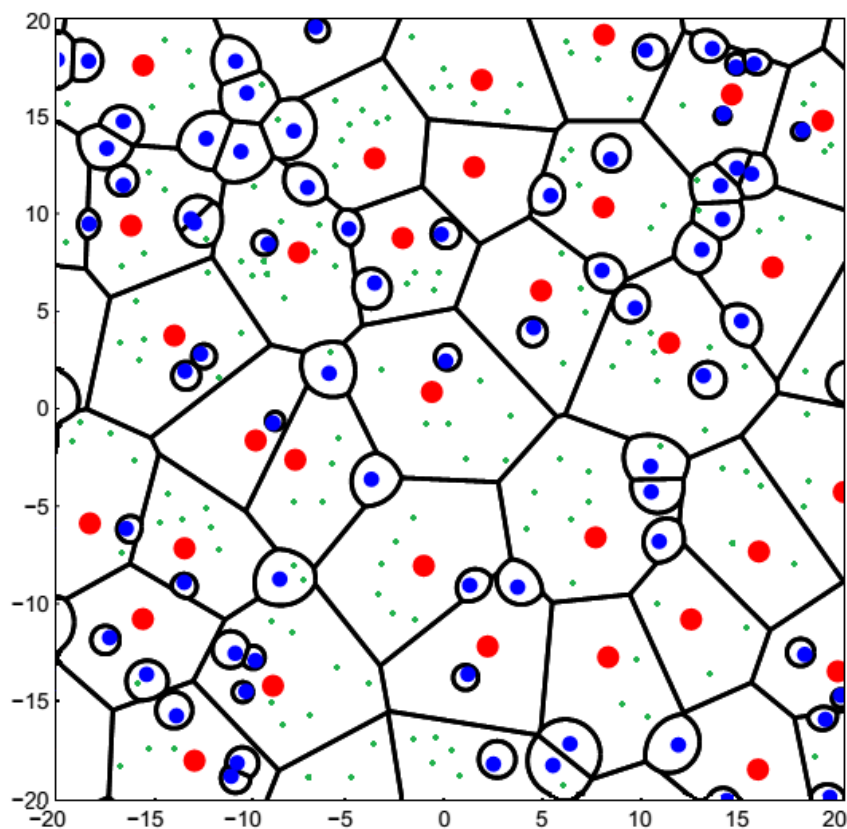
^۱ Cell range expansion (CRE)

^۲ Bias

سیاست مشارکت کاربران در این پایان نامه بدین صورت می باشد که هر یک از کاربران تلفن همراه به

نزدیک ترین ایستگاه پایه کوچک متصل می شوند. یعنی کاربران در سلول های دیاگرام ورونی^۱ با نزدیک ترین

ایستگاه پایه در ارتباط هستند که در شکل (۲-۲) نشان داده شده است.



شکل (۲-۲): نمایش شبکه ناهمگون با استفاده از دیاگرام ورونی. MBS (نقاط قرمز)، SBS (نقاط آبی) و کاربران (نقاط سبز) به صورت PPP توزیع شده اند و هر یک از کاربران به نزدیک ترین BS متصل می باشد [۹].

^۱ Voronoi Diagram

۲-۴ حافظه پنهان

حافظه پنهان قسمتی از حافظه است که محتویانی که ممکن است در آینده توسط سایر اجزای شبکه پردازش شوند را به صورت موقت در خود ذخیره می‌کند. این قسمت از حافظه به سرعت به درخواست‌های پردازشی شبکه پاسخ می‌دهد و سرعت دسترسی به اطلاعات را در سراسر شبکه بالا می‌برد. محتویات ذخیره‌شده در حافظه پنهان ممکن است داده‌هایی باشند که پس از پردازش (برای مثال پس از پردازش توسط واحد سخت‌افزار یا به صورت مجازی، پس از پردازش توسط سیستم‌عامل یا برنامه‌ها) به صورت مستقیم در این قسمت ذخیره شوند و یا داده‌هایی باشند که فقط نسخه‌ای از داده‌های اصلی (برای مثال داده‌های موجود در حافظه جانبی یا به صورت مجازی) را پوشش می‌دهند. حافظه پنهان به دو صورت سخت‌افزاری و مجازی در شبکه قرار می‌گیرد.

در نوع سخت‌افزاری، حافظه پنهان قسمتی از واحد سخت‌افزاری موردنظر (برای مثال CPU دارای این نوع حافظه یا هارددیسک‌ها دارای این نوع حافظه) است که عمل ذخیره‌سازی را برعهده دارد. مکانیزم، ساختار، سرعت و کارایی حافظه پنهان سخت‌افزاری با حافظه اصلی تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. تفاوت اصلی حافظه پنهان با حافظه اصلی، سرعت بالای ارسال اطلاعات در حافظه پنهان می‌باشد. همچنین به دلیل

قیمت و هزینه تهیه بسیار زیاد حافظه پنهان نسبت به سایر حافظه‌ها، همیشه و در همه‌جا از حافظه پنهان استفاده نمی‌شوند.

نحوه عملکرد حافظه پنهان مجازی با حافظه پنهان سخت‌افزاری متفاوت است. این نوع حافظه پنهان در واقع قسمتی از حافظه جانبی است که توسط برنامه‌ها مشخص می‌شود و برای دسترسی سریع‌تر به اطلاعات در سیستم، از این قسمت استفاده می‌کنند. این نوع حافظه پنهان به صورت محلی^۱ کارایی ندارد. برای مثال، برنامه‌هایی مانند مرورگرهای وب، قسمتی از حافظه جانبی را تحت عنوان حافظه پنهان وب برای ذخیره‌سازی موقت داده‌های وب (مانند صفحات وب، تصاویر، استایل‌ها و...) استفاده می‌کنند و زمانی که کاربر قصد مشاهده صفحه یا تصویر درخواست‌شده را داشته باشد که در حافظه پنهان وب مرورگر موجود باشد، مرورگر همان محتویات ذخیره‌شده را به کاربر نشان می‌دهد. در این فرآیند محتویات ذخیره‌شده از طریق اینترنت یا شبکه بارگیری نمی‌شوند، که این امر سبب کاهش ترافیک شبکه، پهنای باند مصرفی و بار روی سرور می‌شود و عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد. این قسمت از حافظه جانبی، تفاوتی زیادی با سایر قسمت‌های عادی حافظه ندارد و تنها توسط برنامه‌ها به عنوان حافظه پنهان مجازی استفاده می‌شوند.

^۱ Local

در واقع حافظه پنهان در مقایسه با حافظه‌های اصلی و جانبی، بسیار سریع‌تر عمل می‌کند، سرعت دسترسی به اطلاعات در سراسر سیستم را افزایش می‌دهد و عمل پردازش را بهبود می‌بخشد.

۲-۴-۱ ذخیره‌سازی محتوا

ایده اصلی ذخیره‌سازی محتوا به اوایل دهه‌ی ۹۰ برمی‌گردد، زمانی که سرورهای پروکسی^۱ به‌عنوان حافظه‌های پنهان برای بهبود مقیاس‌پذیری شبکه جهانی وب مورد استفاده قرار می‌گرفتند [۱۷]. از آن زمان تاکنون معماری‌های مختلفی برای ذخیره‌سازی محتوا در سرورهای پروکسی و یا نودهای شبکه، انجام شده است. در سال‌های اخیر الگوریتم‌های مختلفی برای شبکه تحویل محتوا^۲ (CDN) و به‌منظور کاهش تاخیر دسترسی به محتوا معرفی شده است [۱۸]. علاوه بر این در سال‌های اخیر، مفهوم جدیدی از شبکه تحت عنوان شبکه‌های اطلاعات محور پدیدار شده است، که هدف آن تغییر در راه دسترسی به محتوا در اینترنت به‌وسیله نام‌گذاری منحصربه‌فرد محتوا، توزیع هوشمندانه محتوا در سراسر شبکه، تکرار و بازگردانی محتوا می‌باشد [۱۹]. همچنین برخلاف روش‌های سنتی که محتویات تنها از یک منبع قابل دسترسی بودند، ICN سبب دسترسی به اطلاعات در سراسر شبکه با منابع مختلف می‌شود.

^۱ Proxy Server

^۲ Content Delivery Network (CDN)

در واقع فرآیند ذخیره‌سازی محتوا، به ذخیره کردن محتویات در حافظه پنهان سیستم گفته می‌شود، تا در صورت نیاز به دسترسی به داده‌های موردنظر در آینده سرعت دسترسی به این محتویات بیشتر از حالت عادی باشد. زمانی که یک محتوا از سوی کاربر درخواست داده می‌شود، قبل از اینکه حافظه اصلی و یا هارددیسک جستجو شود، محتویات حافظه پنهان بررسی می‌شود، در صورتی که محتوای موردنظر در حافظه پنهان سیستم وجود داشته باشد، محتوا با سرعت بالا به کاربر تحویل داده می‌شود. اگر محتوای درخواستی از سوی کاربر در حافظه پنهان وجود داشته باشد، در اصطلاح فنی به آن Cache Hit گفته می‌شود. اگر محتوای درخواستی در حافظه پنهان سیستم وجود نداشته باشد، در اصطلاح فنی یک Cache Miss اتفاق افتاده است. در چنین حالتی محتوای درخواستی از محل اصلی ذخیره‌سازی آن درخواست داده شود که طبیعتاً این فرآیند زمان بیشتری را می‌طلبد [۲۰].

اگر محتویات (مانند صفحه‌ی وب و یا یک برنامه) تنها در یک سرور در دسترس قرار گیرد، کاربران با تأخیری معادل صدها میلی‌ثانیه و یا بیشتر در هنگام بارگیری محتوا مواجه می‌شوند. به همین منظور اپراتورهای شبکه برای کاهش زمان بارگیری محتویات و کاهش استرس در سرور مبدأ، سرورهای حافظه‌های پنهان را در سراسر شبکه توزیع می‌کنند.

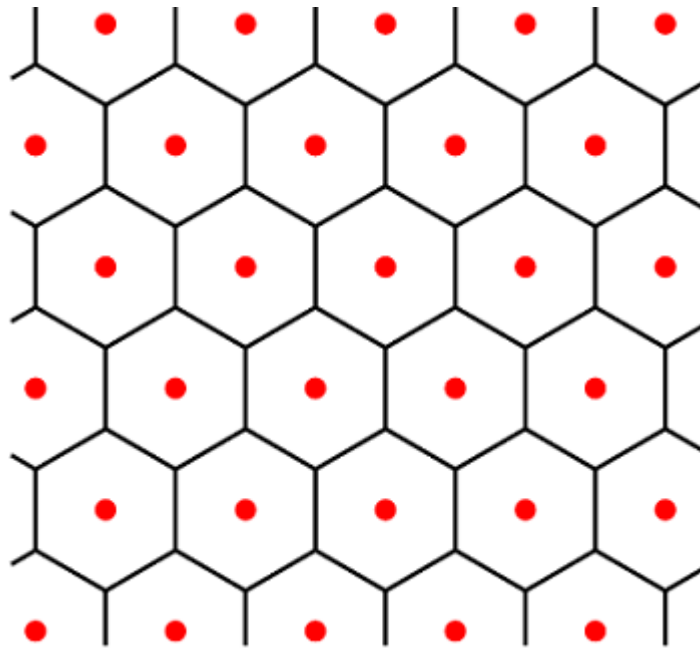
۲-۵ مدل سازی شبکه های سلولی تصادفی

در دهه ی اخیر با توجه به افزایش سرعت تقاضای ترافیک بزرگ و نرخ بالای داده، شبکه های بی سیم مانند شبکه های سلولی ناهمگون، شبکه های رادیو شناختی، شبکه های موردی^۱ بی سیم و غیره پدیدار شده اند که بخش عظیمی از تحقیقات دانشگاهی و صنعتی را به خود اختصاص داده است. روش های سنتی مدل سازی شبکه های سلولی عموماً به صورت تک بعدی و در برخی مدل ها به صورت دوبعدی در نظر گرفته می شدند که معمولاً ایستگاه های پایه بر روی یک شبکه شش ضلعی منظم در نظر گرفته می شدند [۲۱-۲۳]. شکل (۲-۳) یک شبکه شش ضلعی منظم را نشان می دهد. این دیدگاه نسبت به شبکه های سلولی بسیار ساده می باشد، زیرا نسبت سیگنال به تداخل و نویز^۲ (SINR) در حالت کلی برای موقعیت کاربر تصادفی در یک سلول به راحتی مشخص نمی باشد. همچنین برای دستیابی به نتایج کلی و عبارت SINR و مقادیر احتمال قطع، نیازمند شبیه سازی زمان بر و پیچیده مونت کارلو^۳ می باشد. بنابراین، امروزه هیچ یک از روش های سنتی مدل سازی شبکه های سلولی (برای مثال مدل Wyner و مدل شبکه منظم) مورد استفاده قرار نمی گیرند.

^۱ Ad Hoc Network

^۲ Signal-to-Interference-plus Noise Ratio (SINR)

^۳ Mont Carlo



شکل (۲-۳): مدل شبکه شش ضلعی. MBSها (نقاط قرمز) به صورت منظم توزیع شده‌اند [۸].

علاوه بر این در یک کانال بی‌سیم، افت مسیر^۱، محوشدگی^۲ و سایه‌اندازی^۳ سبب تداخل در سیگنال دریافتی در گیرنده می‌شوند. در شبکه‌های سلولی بی‌سیم، انتقال هم‌زمان محتوا از سوی نودهای قرار گرفته شده در موقعیت‌های مختلف، سبب ایجاد تداخل گسترده در سیگنال‌های دریافتی گیرنده می‌شود. همچنین افزایش توان انتقال در یک فرستنده دلخواه به نوبه خود باعث ایجاد تداخل بیشتر با گیرنده‌های ناخواسته می‌شود. علاوه بر این توزیع نودها در شبکه‌های سلولی امروزی دارای بی‌نظمی بیشتری نسبت به شبکه‌های سلولی سنتی می‌باشد، زیرا تراکم نودها برای مناطق مختلف متفاوت می‌باشد. بنابراین از آنجایی که تمامی این اثرات به شدت به موقعیت فضایی نودها در شبکه بستگی دارد، هندسه شبکه و موقعیت قرارگیری

^۱ Path-loss

^۲ Fading

^۳ Shadowing

ایستگاه‌های پایه یک فاکتور مهم و اساسی برای محاسبه SINR در گیرنده و همچنین نرخ دسترسی به محتوا می‌باشد.

۲-۵-۱ روش هندسه تصادفی

خوشبختانه هندسه تصادفی یک فرصت جدید و کارآمد برای مقابله با چالش‌های ذکرشده فراهم کرده است. با استفاده از ابزار قدرتمند از هندسه تصادفی، اتفاقی بودن یک شبکه سلولی به راحتی و با دقت کافی مدل‌سازی می‌شود. همچنین هندسه تصادفی ما را قادر می‌سازد که به مطالعه رفتار متوسط یک شبکه سلولی بی‌سیم به وسیله مدل‌سازی نوده‌های شبکه بر اساس توزیع‌های احتمال، بپردازیم. در طی سال‌های اخیر، محققان مطالعات گسترده‌ای در زمینه هندسه تصادفی به منظور بررسی کارایی امنیت شبکه و بهینه‌سازی پارامترهای شبکه سلولی تصادفی، انجام داده‌اند. در بخش بعدی مختصری از مفاهیم اساسی هندسه تصادفی را مطرح می‌کنیم [۸] و [۲۴].

۲-۶ اصول هندسه تصادفی

هندسه تصادفی یک شاخه غنی از مباحث احتمال کاربردی می‌باشد که به منظور مطالعه آثار تصادفی روی صفحه و یا در ابعاد بیشتر استفاده می‌شود. هندسه تصادفی کاربرد گسترده‌ای در علوم زیست‌شناسی،

ستاره‌شناسی و غیره دارد. در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای در زمینه هندسه تصادفی در پردازش تصویر و شبکه‌های مخابراتی، به‌منظور بهبود سیستم مدل‌های مختلف انجام شده است [۲۵].

در این بخش به تعریف و بیان ویژگی‌های قضایای موجود در هندسه تصادفی در این پایان‌نامه، شامل فرایند نقطه‌ای پواسون می‌پردازیم. فرآیند نقطه‌ای پواسون مورد بررسی در این پایان‌نامه به‌صورت ایستادن^۱ و همگن^۲ در نظر گرفته شده است، که یکی از مهم‌ترین فرایندهای نقطه‌ای فضایی برای مدل‌سازی موقعیت ایستگاه‌های پایه و کاربران در شبکه‌های سلولی می‌باشد.

۲-۶-۱ فرایند نقطه‌ای

هندسه تصادفی به‌طور ذاتی مربوط به نظریه فرایند نقطه‌ای^۳ (PP) تصادفی است. فرایند نقطه‌ای اساسی‌ترین هدف پژوهش در مطالعه مباحث هندسی تصادفی می‌باشد که تاکنون چهار دسته از فرایند نقطه‌ای با نام‌های BPP، PPP،^۴ PCP و^۵ HCPC^۶ برای مدل‌سازی شبکه‌های بی‌سیم مورد استفاده قرار گرفته است که در این بین، فرایند نقطه‌ای پواسون یک مدل پایه‌ای نسبت به سایر فرایندهای نقطه‌ای می‌باشد.

^۱ Stationary

^۲ Homogenous

^۳ Point Process (PP)

^۴ Binomial Point Process (BPP)

^۵ Poisson Cluster Process (PCP)

^۶ Hard Core Point Process (HCPC)

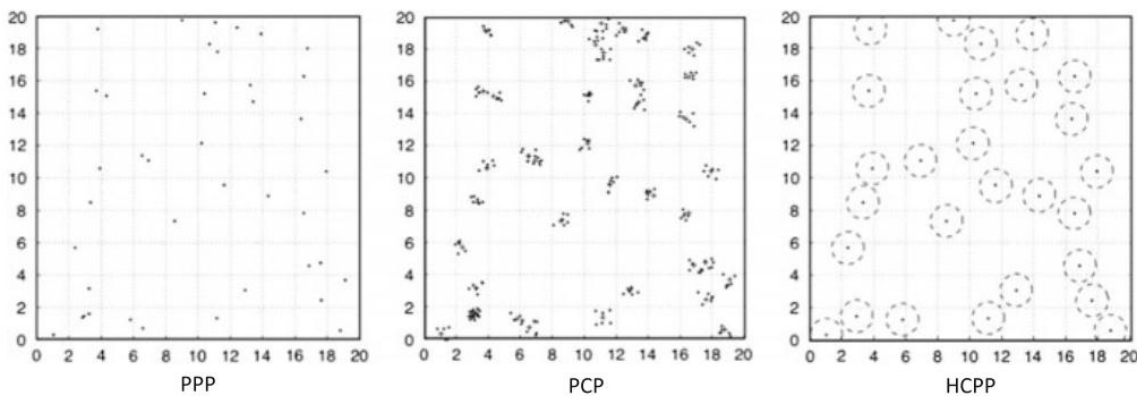
در واقع یعنی فرایند نقطه‌ای پواسون به راحتی می‌تواند به سایر فرایندهای نقطه‌ای تبدیل شود [۸] و [۲۶].

شکل (۲-۴) سه نوع از فرایندهای نقطه‌ای PPP، PCP و HCPP را نشان می‌دهد. بنابراین فرایند نقطه‌ای

پواسون با ارائه یک چهارچوب ریاضی مناسب در شبکه‌های بی‌سیم تصادفی، این امکان را برای ما فراهم

می‌کند تا به راحتی مقادیر احتمال قطع، SINR و سایر معیارهای کارایی شبکه را در یک فرم بسته بدست

آوریم.



شکل (۲-۴) انواع فرایندهای نقطه‌ای (PP) [۸].

۲-۶-۲ نمادگذاری

فضای اقلیدسی دوبعدی به صورت \mathbb{R}^2 و مجموعه اعداد حقیقی به صورت \mathbb{R}_+^2 تعریف می‌شود. مجموعه

تهی با ϕ نمایش داده می‌شود و A بیانگر ناحیه محدود در \mathbb{R}^2 و $|A|$ مساحت A می‌باشد. فاصله بین

المان‌های $s_i, s_j \in A$ با $|s_i - s_j|$ تعریف می‌شود که $\|\cdot\|$ بیانگر عملگر نرم اقلیدسی می‌باشد. تابع بیان شده

$f: A \rightarrow \mathbb{R}_+^2$ یا هم‌ارز $f(A)$ بیانگر نگاشتی از مجموعه دامنه $A \subset \mathbb{R}^2$ به اعداد حقیقی مثبت می‌باشد.

همچنین $\Phi(A)$ بیانگر فرآیند نقطه‌ای Φ روی A و یا تعدادی از نقاط Φ می‌باشد.

۳-۶-۲ فرایند نقطه‌ای پواسون

تعریف ۱-۲ (فرایند نقطه‌ای پواسون): یک فرایند نقطه‌ای Φ در ناحیه محدود $A \subset \mathbb{R}^2$ با چگالی

$\lambda > 0$ پواسون است اگر خواص زیر را داشته باشد:

(۱) برای هر مجموعه دلخواه از $A \subset \mathbb{R}^2$ ، $\Phi(A)$ دارای توزیع پواسون با مقدار میانگین $\lambda|A|$ باشد.

به‌عنوان مثال:

$$P_r(\Phi(A) = n) = \exp(-\lambda|A|) \frac{(\lambda|A|)^n}{n!} \quad (۱-۲)$$

(۲) تعداد نقاط برای هر دو زیرمجموعه غیرمشترک مستقل باشند. به‌عنوان مثال، مجموعه $\Phi(A_1)$ از

مجموعه $\Phi(A_2)$ برای $A_1 \subset A$ و $A_2 \subset A$ و $A_1 \cap A_2 = \emptyset$ مستقل است.

تعریف ۲-۲ (فرایند نقطه‌ای پواسون همگن): اگر پارامتر چگالی λ در فرایند نقطه‌ای پواسون مقداری

ثابت باشد، به آن فرایند نقطه‌ای پواسون همگن یا ایستان می‌گویند.

درواقع یعنی هیچ دو نقطه‌ای در یک مکان وجود ندارند. با استفاده از فرایند نقطه‌ای پواسون همگن، تجزیه و تحلیل ریاضی بسیار ساده می‌شود و به کمک آن تأثیر پارامترهای شبکه بر روی عملکرد شبکه به‌طور دقیق مشخص می‌شود.

از آنجایی که PPP یک فرایند ایستان و همگن در ناحیه محدود A فرض شده است، توزیع تمام نمونه‌ها از Φ در A یکسان می‌باشد. بنابراین مقدار چگالی λ ثابت است و تعداد متوسط نقاط در واحد سطح به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\lambda = \frac{\mathbb{E}[\Phi(A)]}{|A|} = \frac{\mathbb{E}[\Phi(A_1)]}{|A_1|} = \frac{\mathbb{E}[\Phi(A_2)]}{|A_2|} \quad (2-2)$$

۲-۶-۴ ویژگی‌های کلیدی در PPP

در این بخش چندین ویژگی کلیدی و قضایای مهم در فرایند نقطه‌ای پواسون را بیان می‌کنیم [۲۵] و [۲۶].

ویژگی ۱-۲ (توزیع نقاط در PPP): با فرض اینکه $\Phi(A)$ در ناحیه $A \subset \mathbb{R}^2$ و با چگالی λ یک فرآیند نقطه‌ای پواسون باشد، مشروط بر اینکه تعداد نقاط روی $\Phi(A)$ ثابت باشد، نقاط دارای توزیع مستقل و یکنواخت در A می‌باشد.

ویژگی ۱-۲ بیان می‌کند که انتخاب نقاط در $\Phi(A)$ به‌طور یکنواخت در ناحیه A توزیع شده است که

با استفاده از این ویژگی می‌توانیم دو قضیه بسیار مهم زیر را تعریف کنیم.

قضیه ۱-۲ (قضیه کمپل^۱ - جمع روی PPP): فرض کنید Φ یک فرایند نقطه‌ای پواسون با چگالی λ

می‌باشد و تابع $f(x)$ نقاط $x \in \Phi$ را روی اعداد حقیقی مثبت (به‌عنوان مثال $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}_+$) می‌نگارد.

بنابراین داریم:

$$\mathbb{E} \left[\sum_{x \in \Phi} f(x) \right] = \lambda \int f(x) dx \quad (۳-۲)$$

استفاده از قضیه کمپل سبب تسهیل در محاسبات مقدار میانگین و واریانس مجموع تداخل‌ها در شبکه

می‌شود.

مثال ۱-۲: با فرض اینکه Φ یک فرایند نقطه‌ای پواسون با چگالی λ باشد، مجموع تداخل ناشی از نودی

که در موقعیت $y \in R^2$ قرار دارد، برابر $I(y) = \sum_{x \in \Phi} l(x - y)$ می‌باشد که $l(x - y)$ بیانگر تابع افت

مسیر از x به y می‌باشد. مقدار میانگین و واریانس $I(y)$ با استفاده از قضیه کمپل به‌صورت زیر تعریف

می‌شود.

$$\mathbb{E}[I(y)] = \lambda \int l(x) dx \quad (۴-۲)$$

^۱ Campbell's Theorem

$$\mathbb{V}[I(y)] = \lambda \int l(x)^2 dx \quad (5-2)$$

قضیه ۲-۲ (تابع مولد احتمال^۱ (PGFL) - ضرب روی PPP): فرض کنید Φ یک فرایند نقطه‌ای پواسون

با چگالی λ می‌باشد و تابع $f(x)$ نقاط $x \in \Phi$ را روی اعداد حقیقی مثبت در بازه $[0,1]$ می‌نگارد

(برای مثال $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow [0,1]$). بنابراین داریم:

$$\mathbb{E} \left[\prod_{x \in \Phi} f(x) \right] = \exp \left(-\lambda \int [1 - f(x)] dx \right) \quad (6-2)$$

مهم‌ترین کاربرد تابع مولد احتمال در اثبات تبدیل لاپلاس تداخل $I(y)$ می‌باشد.

مثال ۲-۲ (تبدیل لاپلاس^۲ (LT)): با توجه به مقدار تداخل $I(y) = \sum_{x \in \Phi} l(x - y)$ ذکر شده در مثال

۱-۲ تبدیل لاپلاس $I(y)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathcal{L}_{I(y)}(s) = \mathbb{E}_{\Phi} [e^{-sI(y)}] = \exp \left(-\lambda \int (1 - e^{-sI(y)}) dx \right) \quad (7-2)$$

ویژگی ۲-۲ (برهم‌نهی^۳): برهم‌نهی چندین فرایند نقطه‌ای پواسون مستقل با چگالی λ_k همچنان یک

فرایند نقطه‌ای پواسون با مقدار $\sum_k \lambda_k$ می‌باشد.

^۱ Probability Generating Functional (PGFL)

^۲ Laplace transform (LT)

^۳ Superposition

ویژگی ۲-۲ در تحلیل تداخل شبکه‌های چندلایه مستقل مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مثال مجموع

تداخل کاربر تصادفی در شبکه سلولی ناهمگون K لایه به صورت $\sum_{k=1}^K \sum_{x \in \Phi_k} l_k(x)$ تعریف می‌شود که

Φ_k موقعیت ایستگاه‌های پایه ایجادکننده تداخل در لایه Kام با چگالی λ_k را مشخص می‌کند. بنابراین

تبدیل لاپلاس تداخل I به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\mathcal{L}_I(s) = \prod_{k=1}^K \mathbb{E}_{\Phi_k} \left[e^{-s \sum_{x \in \Phi_k} l_k(x)} \right] = \exp \left(- \sum_{k=1}^K \lambda_k \int (1 - e^{-s l_k(x)}) dx \right) \quad (۸-۲)$$

ویژگی ۳-۲ (توزیع فاصله تا نزدیک‌ترین نقطه در PPP): فرض کنید Φ یک فرایند نقطه‌ای پواسون با

چگالی λ در \mathbb{R}^2 می‌باشد. برای هر نقطه $x \in \mathbb{R}^2$ تابع توزیع تجمعی^۱ (CDF) فاصله d از x تا نزدیک‌ترین

نقطه در Φ برابر است با:

$$P_r(d > r) = \exp(-\lambda \pi r^2) \quad (۹-۲)$$

با توجه به ویژگی ۳-۲ تابع چگالی احتمال^۲ (PDF) نزدیک‌ترین فاصله نقطه r برای یک فرایند نقطه‌ای

پواسون به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$f_r(r) = \frac{dF_r(r)}{dr} = 2\pi r \exp(-\lambda \pi r^2) \quad (۱۰-۲)$$

^۱ Cumulative Distribution Function (CDF)

^۲ Probability Density Function (PDF)

که در این پایان‌نامه به‌منظور تعیین توزیع فاصله کاربران تا ایستگاه‌های پایه سرویس‌دهنده استفاده می‌شود.

قضیه ۲-۳ (قضیه Slivnyak): فرض کنید Φ یک فرایند نقطه‌ای پواسون با نقطه δ_x می‌باشد که در موقعیت x قرار دارد. اگر نقطه δ_x را از Φ حذف کنیم، توزیع فرایند نقطه‌ای پواسون کاهش‌یافته $\Phi - \delta_x$ ، همچنان با مقدار اصلی فرایند نقطه‌ای پواسون Φ برابر می‌باشد.

درواقع قضیه **Slivnyak** بیان می‌کند که افزودن و یا حذف یک کاربر در شبکه، توزیع کاربران دیگر را تغییر نمی‌دهد. بنابراین می‌توانیم کاربر درخواست‌دهنده محتوا را به‌صورت کاربر نوعی در مبدأ مختصات در نظر بگیریم و عملکرد کاربر را از لحاظ احتمال قطع و سایر پارامترهای شبکه بررسی کنیم.

۲-۷ مروری بر پژوهش‌های پیشین

در [۲۸-۳۳] مرور کلی بر ذخیره‌سازی محتوا در شبکه‌های اطلاعات محور و شبکه‌های محتوا محور به‌منظور معرفی کامل ویژگی‌ها و چالش‌های جدید ذخیره‌سازی محتوا انجام شده است. همچنین مکانیزم اشتراک‌گذاری محتوا، سیاست طراحی حافظه پنهان، الگوریتم‌های جایگذاری حافظه پنهان در نودهای مختلف و تکنیک‌های بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌های ICN، به‌طور کامل توضیح داده شده است.

نقش کلیدی و تکنیک‌های ذخیره‌سازی محتوا در شبکه‌های بی‌سیم نسل پنجم در [۳۴] و [۳۵] مورد بررسی قرار گرفته است. یک روش جدید ذخیره‌سازی محتوا بر اساس مفهوم شبکه‌های اطلاعات محور و شبکه‌های محتوا محور ارائه شده است. همچنین با استفاده از نتایج شبیه‌سازی عملکرد طرح پیشنهادی و مزایای ذخیره‌سازی محتوا در شبکه‌های نسل پنجم بررسی می‌کند.

در [۳۶] یک شبکه ناهمگون سه لایه شامل ایستگاه‌های پایه، رله‌ها و کاربران در نظر گرفته شده است، به طوری که برخی از کاربران قابلیت ذخیره‌سازی محتوا را دارند. همچنین حافظه در نظر گرفته شده برای رله‌ها و کاربران با قابلیت ذخیره‌سازی محتوا محدود بوده و تمامی نودها یک نوع از محتویات را در خود ذخیره می‌کنند. تعدادی از محتویات محبوب در حافظه رله‌ها و کاربرانی که قابلیت ذخیره‌سازی محتوا را دارند، ذخیره می‌شود. با توجه به قابلیت کاربر درخواست‌دهنده در ذخیره‌سازی محتوا و اینکه کدام نوع از نودها سرویس‌دهی می‌کنند، دسترسی کاربران به محتوا در چهار دسته کلاس‌بندی می‌شود. استقرار نودها در شبکه بر اساس فرایند نقطه‌ای پواسون مدل‌سازی می‌شود. زمانی که کاربر یک محتوا را درخواست می‌کند، ابتدا بررسی می‌شود که آیا حافظه ذخیره‌سازی در دسترس دستگاه‌های محلی می‌باشد. اگر محتوای درخواستی در حافظه ذخیره‌سازی آن وجود داشت، کاربر محتوای درخواستی را به راحتی دریافت می‌کند؛ در غیر این صورت کاربر به نزدیک‌ترین نود متصل می‌شود و محتوای درخواستی را دریافت می‌کند. در ادامه

نیز احتمال قطع، متوسط نرخ ارگودیک و تأخیر در انتقال فروسو در این شبکه را محاسبه می‌کند و همچنین نتایج عددی نشان می‌دهد که بازده سیستم در حضور کاربران با قابلیت ذخیره‌سازی در مقایسه با حالت بدون ذخیره‌سازی تا ۵۷ درصد بهبود می‌یابد.

از جمله پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه مبادلات مصرف پهنای باند در ذخیره‌سازی محتوا در شبکه‌های سلولی، می‌توان به [۳۷] اشاره کرد. در این مقاله یک شبکه سلولی کوچک با قابلیت ذخیره‌سازی محتوا تحت پوشش یک شبکه سلولی بزرگ در نظر گرفته شده است به طوری که زیرمجموعه‌ای از محتویات محبوب در SBSها ذخیره شده است. همچنین با در نظر گرفتن توزیع SBSها به صورت فرایند نقطه‌ای پواسون، احتمال قطع سرویس‌دهی به محتوای درخواستی با توجه به محدودیت‌های پهنای باند و تخصیص طیف محاسبه شده است. علاوه بر این تعداد SBSهای موردنیاز یک ذخیره‌سازی موفق برای انواع توزیع‌های محتوا مشخص شده است. بنابراین این مقاله یک بازنگری کلیدی بین اندازه حافظه پنهان، چگالی نودها و تخصیص طیف را بیان می‌کند، که این امر نشان می‌دهد که حافظه پنهان با اندازه بزرگ‌تر با استفاده از فاکتور دسترسی طیفی کوچک‌تر، می‌تواند اثربخشی بیشتری داشته باشد.

مشکل ذخیره‌سازی بهینه محتوا در یک شبکه سلولی تک‌لایه با فرض محدودیت ظرفیت لینک‌های بک‌هال و توزیع تصادفی SBSها در شبکه، در [۲۰] آورده شده است. همچنین احتمال قطع و متوسط نرخ

تحویل محتوا در یک فرم بسته محاسبه شده است. چالش اصلی مطرح شده در این مقاله پاسخ به این پرسش است که آیا برای افزایش احتمال انتقال موفق محتوا بهتر است اندازه ظرفیت حافظه SBSها افزایش یابد یا اینکه تعداد SBSها با ظرفیت ذخیره‌سازی کمتر محتوا در شبکه افزایش یابد. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مقادیر عددی نشان داده شده است که افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی محتوا در SBSها و بکارگیری آنها با تعداد مناسب در شبکه سبب کاهش هزینه اپراتورهای شبکه می‌شود.

ذخیره‌سازی محتوا به‌منظور کاهش تابع هزینه^۱ (به‌عنوان مثال انرژی، پهنای باند و ترافیک موردنیاز برای سرویس‌دهی به کاربران) در شبکه‌های سلولی کوچک در [۳۸] مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله دو سناریو در نظر گرفته شده است که در حالت اول ذخیره‌سازی محتوا در SBSها انجام شده است و در حالت دوم ذخیره‌سازی محتوا به‌طور مستقیم در پایانه کاربران انجام شده است که در آن اشتراک‌گذاری محتوا با استفاده از انتقال دستگاه به دستگاه^۲ انجام می‌شود. در هر دو سناریو، طراحی مشترک انتقال و سیاست‌های ذخیره‌سازی محتوا زمانی بررسی می‌شود که تقاضای کاربر از پیش شناخته شده باشد. همچنین یک مسئله بهینه‌سازی برای تعیین انتقال و ذخیره‌سازی بهینه بیان می‌شود که مقادیر تابع هزینه را به

^۱ Cost Function

^۲ Device-to-Device (D2D)

حداقل می‌رساند. همچنین نتایج عددی نشان می‌دهد که سیاست ذخیره‌سازی و طرح مشترک مطرح‌شده، به‌طور قابل‌توجهی هزینه کلی را کاهش می‌دهد و سبب بهبود سیستم مدل پیشنهادی می‌شود.

محدودیت‌های اساسی ذخیره‌سازی محتوا در [۳۹] به‌طور دقیق بررسی شده است. در این مقاله با ارائه یک رویکرد محبوب برای ذخیره‌سازی محتوا در شبکه‌های بی‌سیم، طراحی سیستم را در دو مرحله دسته‌بندی می‌کند. مرحله اول، مرحله جایگذاری محتوا می‌باشد که در آن به هر یک از حافظه‌های پنهان، در ساعات عدم اوج ترافیک شبکه یک مجموعه محتوای مناسب تخصیص داده می‌شود. سپس در مرحله تحویل محتوا محتویات غیر ذخیره شده زمانی که به‌وسیله کاربران درخواست شوند، ارسال می‌شوند. در این حالت دو نوع دستاورد ذخیره‌سازی محتوا با نام‌های ذخیره‌سازی محلی^۱ و ذخیره‌سازی سراسری^۲ تعریف می‌شود. دستاورد ذخیره‌سازی محلی زمانی بدست می‌آید که محتوای درخواستی به‌صورت محلی در حافظه پنهان (در کاربران و یا SBS و بدون اتصال به MBS) در دسترس باشد که این امر سبب کاهش ترافیک در لینک‌های بک‌هال و بهبود کیفیت سرویس‌دهی می‌شود. از طرف دیگر دستاورد ذخیره‌سازی سراسری اطلاعات چندرسانه‌ای کدگذاری شده در شبکه، در مرحله تحویل محتوا بدست می‌آید. درنهایت با استفاده از مباحث تئوری اطلاعات، ارزیابی و جداسازی این دو دستاورد به‌طور دقیق بررسی می‌شود.

^۱ Local Caching

^۲ Global Caching

یک روش جدید به منظور مدیریت تقاضا محتوای ویدئویی در شبکه‌های بی‌سیم در [۴۰] ارائه شده است. به همین منظور ایده ذخیره‌سازی محتوا در FBSها در این مقاله پیشنهاد شده است که در آن بک‌ها با نرخ پایین اما ظرفیت ذخیره‌سازی بالا برای انتقال محتوا به کاربران در یک انتقال کوتاه برد در نظر گرفته شده است. بررسی‌هایی که برای هر دو نوع ذخیره‌سازی کدگذاری شده و بدون کدگذاری در این مقاله انجام شده است نشان می‌دهد که تخصیص بهینه محتوا یک مسئله NP سخت می‌باشد، با این وجود حالت کدگذاری شده به عنوان یک مسئله محدب فرمول‌بندی می‌شود که می‌تواند به یک مسئله خطی کاهش یابد. الگوریتم ارائه‌شده و نتایج عددی حاصل از آن در حالت کدگذاری شده نشان می‌دهد که توانایی پخش محتوای ویدئویی با ضریب ۳ تا ۵ در محیط واقعی بهبود می‌یابد.

تأثیر بک‌هاال سیمی و بی‌سیم بر عملکرد شبکه‌های سلولی ناهمگون در [۴۱] مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور در این مقاله به محاسبه تأخیر ناشی از لینک‌های بک‌هاال به صورت سیمی و بی‌سیم، به عنوان یکی از پارامترهای بررسی کارایی سیستم پرداخته است. در این مقاله یک شبکه سلولی ناهمگون شامل تعدادی ایستگاه‌های پایه بزرگ و نقاط دسترسی سلولی کوچک^۱ (SAP) در نظر گرفته شده است. هر یک از کاربران تلفن همراه می‌توانند به صورت بی‌سیم به MBSها و یا SAPها متصل شوند. همچنین هر

^۱ Small cell Access Point (SAP)

یک از MBSها به وسیله فیبر اختصاصی به جمع کننده‌های شبکه اصلی^۱ (CNA) متصل می‌باشند. SAPها نیازمند بک‌هال سیمی و یا بی‌سیم به منظور اتصال به دروازه‌های سلولی کوچک^۲ (SG) می‌باشند که توسط فیبرهای اختصاصی به CANها متصل می‌شوند. هر یک از نودها با نزدیک‌ترین نود در ارتباط است و توزیع نودها به صورت PPP می‌باشد. در این مقاله دو نوع سیاست برای موقعیت قرارگیری کاربران، با نام‌های سیاست ساکن^۳ و سیاست تحرک بالا^۴ تعریف شده است. در حالت ساکن موقعیت کاربران تلفن همراه در تمامی زمان‌ها ثابت می‌باشد. در حالی که در سیاست تحرک بالا، در هر بازه زمانی موقعیت کاربران تلفن همراه به صورت PPP مدل می‌شود و با موقعیت آن‌ها در بازه‌های زمانی قبلی متفاوت می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای بک‌هال بی‌سیم افزایش تراکم SAPها در یک نقطه خاص مقرون به صرفه نمی‌باشد. علاوه بر این بک‌هال سیمی قابلیت اطمینان بیشتری به منظور بهبود عملکرد سیستم فراهم می‌کند. در حالی که بک‌هال بی‌سیم انعطاف‌پذیری بیشتری در انتخاب یک چگالی بهینه برای SAPها ارائه می‌دهد، اگرچه قابلیت اطمینان کمتری در مقایسه با بک‌هال سیمی دارد. بنابراین نوع اتصال لینک‌های بک‌هال نقش مهمی در کیفیت سرویس‌دهی به کاربران ایفا می‌کند.

^۱ Core Network Aggregator (CNA)

^۲ Small cell Gateway (SG)

^۳ Static

^۴ High-mobility

فصل ۳:

احتمال قطع در شبکه سلولی ناممکن دولایه

۳-۱ مقدمه

در این فصل کارایی ذخیره‌سازی محتوا در یک شبکه ناهمگون چندلایه، که در آن ایستگاه‌های پایه طبق فرآیند نقطه‌ای پواسون توزیع شده‌اند را مورد بررسی قرار می‌دهیم. به‌طور دقیق‌تر یک شبکه ناهمگون دولایه متشکل از ایستگاه‌های پایه کوچک و ایستگاه‌های پایه بزرگ در اختیار داریم. در ابتدا سیستم مدل پیشنهادی را مطرح می‌کنیم و رویکردهای آن را توضیح می‌دهیم. فرض می‌کنیم سلول‌های کوچک قابلیت ذخیره‌سازی محتویات محبوب را دارند و مجموعه‌ای از محتویات نیز در سلول‌های بزرگ قرار دارد. همچنین دو سیاست مختلف برای نحوه درخواست محتوا از سوی کاربران در نظر می‌گیریم. در ادامه احتمال انتقال موفق محتوا و همچنین متوسط احتمال قطع دسترسی به محتوا را برای یک انتقال فروسو، در یک فرم بسته بدست می‌آوریم. در پایان این فصل نیز با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی و روابط عملکرد شبکه را ارزیابی می‌کنیم.

۳-۲ سیستم مدل پیشنهادی

یک شبکه ناهمگون دولایه در فضای اقلیدسی دوبعدی R^2 را در یک انتقال فروسو شامل ایستگاه‌های پایه کوچک و ایستگاه‌های پایه بزرگ در نظر می‌گیریم. در این شبکه MBSها طبق فرآیند نقطه‌ای پواسون همگن و با $X_i = \Phi_{MBS}$ و چگالی λ_{MBS} توزیع شده‌اند، که X_i موقعیت فضایی MBS i ام را نشان می‌دهد.

همچنین SBSها نیز طبق فرآیند PPP و با $\Phi_{SBS} = Y_j$ و چگالی λ_{SBS} توزیع شده‌اند، که در آن Y_j موقعیت فضایی SBS جام را نشان می‌دهد. λ_{MBS} بیانگر تعداد MBSها در هر مترمربع و λ_{SBS} بیانگر تعداد SBS در هر مترمربع می‌باشد. همچنین فرض می‌کنیم مقدار λ_{SBS} خیلی بزرگ‌تر از λ_{MBS} می‌باشد

$$(\lambda_{SBS} \gg \lambda_{MBS}).$$

ایستگاه‌های پایه بزرگ و ایستگاه‌های پایه کوچک را در یک باند فرکانسی در نظر می‌گیریم و توان ارسالی برای هر MBS را با P_{MBS} و توان ارسالی هر SBS را با P_{SBS} نشان می‌دهیم. به هر یک از MBSها یک حافظه با ظرفیت بزرگ و معین برای ذخیره‌سازی فایل‌ها تخصیص می‌دهیم که در آن هر یک از محتویات دارای اندازه‌های یکسان می‌باشد. در مقابل به هر یک از SBSها یک حافظه با ظرفیت محدود و کوچک با اندازه S اختصاص می‌دهیم. مجموعه‌ای از محتویات محبوب را در حافظه MBSها ذخیره می‌کنیم. منظور ما از محتویات محبوب فایل‌هایی هستند که در یک دوره زمانی خاص از سوی کاربران بیشترین تقاضا را دارند. به‌عنوان مثال محتوای محبوب می‌تواند یک فایل ویدئویی از سایت یوتیوب باشد که نسبت به سایر فایل‌ها بازدیدکننده‌ی بیشتری را به خود اختصاص داده است. بنابراین با توجه به اندازه حافظه در نظر گرفته شده برای MBSها، مجموعه‌ای از این محتویات را بر اساس درجه محبوبیت هر کدام در حافظه

MBS ذخیره می‌کنیم. در ادامه زیرمجموعه‌ای از مجموعه محتویات قرار داده شده در MBSها را بر اساس بالاترین مرتبه‌ی محبوبیت انتخاب کرده و آن‌ها را در SBSها قرار می‌دهیم.

فرض می‌کنیم که $F = \{1, 2, \dots, |F|\}$ مجموعه محتویات ذخیره شده در MBS، با اندازه $|F|$ بر حسب بیت می‌باشد. در مقابل هر یک از SBSها دارای ظرفیت محدود ذخیره‌سازی محتوا به اندازه S می‌باشند که زیرمجموعه‌ای از محتویات مجموعه F را در خود ذخیره کرده‌اند. بنابراین با توجه به سیاست ذخیره‌سازی مبتنی بر محبوبیت، SBSها تعداد S تا از محبوب‌ترین محتویات را در خود ذخیره می‌کنند.

فرض می‌کنیم یک کاربر مرجع دستگاه مختصات قرار دارد و عملکرد سیستم را برای درخواست محتوا از سوی کاربر مرجع در یک بازه زمانی مستقل بررسی می‌کنیم. بنابراین دو نوع توزیع درخواست محتوا از سوی کاربران را تجزیه و تحلیل می‌کنیم.

الف) توزیع یکنواخت

ب) توزیع زیف

البته از آنجایی که اکثر کاربران علاقه‌مند به دریافت محتویات چندرسانه‌ای محبوب هستند و تنها بخش کمی از آن‌ها سایر فایل‌ها را ترجیح می‌دهند، لذا هرچه محبوبیت محتویات بیشتر شود احتمال درخواست

شدن آن فایل از سوی کاربران بیشتر خواهد بود؛ به همین منظور توزیع محتویات در SBSها را با توجه به محبوبیت محتویات و طبق توزیع زیف در نظر می‌گیریم که در این بین توزیع یکنواخت نیز یکی از حالات ممکن در توزیع زیف به ازای پارامتر توزیع زیف در یک مقدار خاص می‌باشد.

زمانی که یک کاربر فایلی را درخواست می‌کند دو حالت رخ می‌دهد. در حالت اول ابتدا باید بررسی شود که آیا محتوای درخواستی در نزدیک‌ترین SBS وجود دارد یا نه؛ بنابراین ابتدا کاربر به نزدیک‌ترین SBS متصل می‌شود و در صورت وجود محتوای درخواستی در SBS، کاربر با یک مقدار احتمال به محتوای مورد نظر خود دسترسی پیدا می‌کند. در حالت دوم اگر محتوای درخواستی از سوی کاربر نوعی در SBS وجود نداشت، SBS به نزدیک‌ترین MBS متصل می‌شود و با یک مقدار احتمال محتوای درخواستی را برای کاربر فراهم می‌کند. به عبارت ساده‌تر در این طرح پیشنهادی کاربر درخواست دهنده محتوا هیچ‌گاه مستقیماً به MBS متصل نمی‌شود، بلکه همواره محتوای درخواستی از طریق SBS به کاربر تحویل داده می‌شوند.

۳-۳ مدل سیگنال

توان دریافتی کاربر درخواست‌کننده محتوا با توجه به فرستنده $t \in \{SBS, MBS\}$ به صورت $P_t h_t l(r)$

می‌باشد که در آن P_t توان ارسالی (P_{SBS} یا P_{MBS}) است و $h_t \sim \exp(1)$ ضریب توان محو شونده کانال

بین نود فرستنده t و نود دریافت کننده می باشد. همچنین $l(r) = ||r_t||^{-\alpha}$ تابع منحصر به فرد افت مسیر با $\alpha > 2$ است و $||r_t||$ فاصله نود درخواست کننده محتوا با نزدیک ترین نود سرویس دهنده می باشد.

ضریب توان محو شونده یک متغیر تصادفی نمایی (محو شونده رایلی) با توزیع مستقل همانی^۱ (I.I.D) با مقدار $\mathbb{E}[h_t] = 1$ می باشد. فرض می کنیم که شبکه دارای تداخل محدود می باشد و همچنین نویز قابل چشم پوشی است، به همین منظور SIR را برای کاربر نوعی متصل به نزدیک ترین SBS، به صورت زیر تعریف می کنیم.

$$SIR_{u,SBS} = \frac{P_{SBS} h_{SBS} r_{SBS}^{-\alpha}}{I_{t,u,SBS}} \quad (۱-۳)$$

که در رابطه (۱-۳) $I_{t,u,SBS}$ مجموع تداخل ناشی از تمام SBS ها به جز SBS سیگنالینگ و تداخل تجمعی ناشی از تمام MBS ها می باشد و به صورت زیر تعریف می شود.

$$I_{t,u,SBS} = \sum_{Y_j \in \Phi_{SBS} \setminus \{Y\}} P_{SBS} h_{SBS} Y_j^{-\alpha} + \sum_{X_i \in \Phi_{MBS}} P_{MBS} h_{MBS} X_i^{-\alpha} \quad (۲-۳)$$

به همین ترتیب SIR را برای SBS متصل به نزدیک ترین MBS، به صورت زیر تعریف می کنیم.

$$SIR_{SBS,MBS} = \frac{P_{MBS} h_{MBS} r_{MBS}^{-\alpha}}{I_{t,SBS,MBS}} \quad (۳-۳)$$

^۱ Independent and Identically Distribution (I.I.D)

که در رابطه (۲-۳) $I_{t_{SBS,MBS}}$ مجموع تداخل ناشی از تمامی MBS ها به جز MBS سیگنالینگ و تداخل

تجمعی ناشی از سایر SBS ها می باشد و به صورت زیر تعریف می شود.

$$I_{t_{SBS,MBS}} = \sum_{X_i \in \Phi_{MBS} \setminus \{X\}} P_{MBS} h_{MBS} X_i^{-\alpha} + \sum_{Y_j \in \Phi_{SBS}} P_{SBS} h_{SBS} Y_j^{-\alpha} \quad (۴-۳)$$

۴-۳ بررسی کارایی سیستم

۱-۴-۳ توابع چگالی احتمال

با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش ۲-۵-۳ و از آنجایی که موقعیت قرارگیری کاربر نوعی، ایستگاه-

های پایه بزرگ و کوچک طبق توزیع همگن PPP می باشد، بنابراین احتمال اینکه n نود در ناحیه A به

شعاع r قرار بگیرند طبق رابطه زیر بدست می آید.

$$\mathbb{P}(n \text{ in } \Phi_i | A = \pi r^2) = e^{-\pi r^2 \lambda_i} \frac{(\pi r^2 \lambda_i)^n}{n!} \quad (۵-۳)$$

که در رابطه فوق $n = 0, 1, 2, \dots$ و $i = MBS, SBS$ می باشد.

برای محاسبه تابع چگالی احتمال فاصله کاربر درخواست دهنده تا نزدیک ترین SBS سرویس دهنده در

رابطه (۵-۳) به ازای n عدد صفر را قرار می دهیم، زیرا هیچ نود دیگری نباید در فاصله کمتر از x قرار

گیرد. بنابراین احتمال اینکه فاصله بین کاربر درخواست دهنده و نزدیک ترین SBS بزرگ تر از r_1 باشد برابر

است با:

$$P(x > r_1) = e^{-\pi\lambda_{SBS}r_1^2} \quad (6-3)$$

بنابراین تابع توزیع تجمعی برابر $F_1(r_1) = 1 - e^{-\pi\lambda_{SBS}r_1^2}$ می‌باشد و تابع چگالی احتمال فاصله کاربر

درخواست دهنده تا نزدیک‌ترین SBS سرویس‌دهنده به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$f_1(r_1) = \frac{\partial F_1(r_1)}{\partial r_1} = \frac{\partial(1 - e^{-\pi\lambda_{SBS}r_1^2})}{\partial r_1} = 2\pi\lambda_{SBS}r_1 e^{-\pi\lambda_{SBS}r_1^2} \quad (7-3)$$

به همین ترتیب و به‌طور مشابه احتمال اینکه فاصله بین SBS و نزدیک‌ترین MBS بزرگ‌تر از r_2 باشد

برابر است با:

$$P(x > r_2) = e^{-\pi\lambda_{MBS}r_2^2} \quad (8-3)$$

بنابراین تابع چگالی احتمال فاصله SBS تا نزدیک‌ترین MBS سرویس‌دهنده برابر است با:

$$f_2(r_2) = \frac{\partial F_1(r_2)}{\partial r_2} = \frac{\partial(1 - e^{-\pi\lambda_{MBS}r_2^2})}{\partial r_2} = 2\pi\lambda_{MBS}r_2 e^{-\pi\lambda_{MBS}r_2^2} \quad (9-3)$$

۳-۴-۲ توزیع درخواست محتوا

فرض می‌کنیم که f بیانگر مرتبه محبوبیت محتویات باشد، به طوری $f = 1$ محبوب‌ترین محتوا و

$f = 2$ دومین محتوای محبوب می‌باشد و این روند تا آخرین محتوای محبوب ادامه داشته باشد. بنابراین

تعداد S تا از محبوب‌ترین محتویات در SBSها ذخیره می‌شوند.

همچنین فرض می‌کنیم درخواست کاربران بر اساس مرتبه محبوبیت محتوا انجام می‌شود. از این رو

درخواست محتوا از سوی کاربران را با توجه به مرتبه محبوبیت، طبق توزیع زیف مدل می‌کنیم. بنابراین q_f

بیانگر درخواست کاربران بر اساس توزیع زیف می‌باشد که به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$q_f = \frac{f^{-\gamma}}{\sum_{i=1}^{|f|} i^{-\gamma}} \quad (10-3)$$

که در رابطه (۱۰-۳)، γ بیانگر انحراف توزیع محبوبیت فایل می‌باشد و مقداری مثبت است. همچنین به

ازای $\gamma = 0$ محبوبیت فایل‌ها یکسان می‌باشد. به عبارت دیگر به ازای $\gamma = 0$ توزیع زیف به توزیع یکنواخت

تبدیل می‌شود.

۳-۴-۳ احتمال قطع

در حالت کلی فرض می‌کنیم که $\mathcal{M}(f)$ پیشامد آن باشد که محتوای درخواستی f با موفقیت منتقل

شود. بنابراین احتمال قطع در انتقال محتوای f به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\mathbb{P}_{out} = 1 - \mathbb{P}[\mathcal{M}(f)] \quad (11-3)$$

که با داشتن مقدار آستانه T ، $\mathbb{P}[\mathcal{M}(f)]$ به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\mathbb{P}[\mathcal{M}(f)] = \mathbb{P}(SIR > T) \quad (12-3)$$

بنابراین با جایگذاری رابطه‌ی (۱۲-۳) در رابطه‌ی (۱۱-۳)، احتمال قطع محتوای f به صورت زیر بازنویسی

می‌شود.

$$\mathbb{P}_{out} = 1 - \mathbb{P}(SIR > T) \quad (۱۳-۳)$$

احتمال انتقال موفق با توجه به متغیرهای تصادفی r_1 و r_2 محاسبه می‌شود که این متغیرهای تصادفی

نشان‌دهنده فاصله بین کاربر و SBS و همچنین فاصله بین SBS از MBS می‌باشد. بنابراین احتمال انتقال

موفق از SBS به کاربر درخواست دهنده محتوا را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم.

$$\mathbb{P}[SIR_{u,SBS} > T | r_1] = \mathbb{P}\left[\frac{P_{SBS} h_{SBS} r_1^{-\alpha}}{I_{t_u,SBS}} > T \mid r_1\right] \quad (۱۴-۳)$$

$$= \mathbb{P}\left[h_{SBS} > \frac{TI_{t_u,SBS} r_1^\alpha}{P_{SBS}} \mid r_1\right] \quad (۱۵-۳)$$

$$= E_{I_t} \left[\mathbb{P}\left[h_{SBS} > \frac{TI_{t_u,SBS} r_1^\alpha}{P_{SBS}} \mid r_1, I_{t_u,SBS}\right] \right] \quad (۱۶-۳)$$

$$= E_{I_t} \left[\exp\left(-\frac{TI_{t_u,SBS} r_1^\alpha}{P_{SBS}}\right) \mid r_1 \right] \quad (۱۷-۳)$$

$$= \mathcal{L}_{I_{t_u,SBS}}\left(\frac{Tr_1^\alpha}{P_{SBS}}\right) \quad (۱۸-۳)$$

که در روابط بالا، (۱۴-۳) با توجه به رابطه‌ی (۱-۳) بدست می‌آید. همچنین رابطه‌ی (۱۶-۳) از متوسط

گیری روی مجموع تداخل‌ها و رابطه‌ی (۱۷-۳) با توجه به اینکه h یک متغیر تصادفی نمایی با میانگین یک

می‌باشد، بدست آمده است. رابطه (۱۸-۳) نیز با استفاده از تعریف تبدیل لاپلاس به صورت

$$\mathcal{L}_{I_{t_u,SBS}} = \mathbb{E}_{I_{t_u,SBS}} [e^{-sI_{t_u,SBS}}]$$

به همین ترتیب و به طور مشابه احتمال انتقال موفق از MBS به SBS را می توان به صورت زیر محاسبه

می کنیم.

$$\mathbb{P}[SIR_{SBS,MBS} > T | r_2] = \mathbb{P}\left[\frac{P_{MBS} h_{MBS} r_2^{-\alpha}}{I_{t_{MBS}}} > T \mid r_2\right] \quad (۱۹-۳)$$

$$= \mathbb{P}\left[h_{MBS} > \frac{TI_{t_{SBS,MBS}} r_2^\alpha}{P_{MBS}} \mid r_2\right] \quad (۲۰-۳)$$

$$= E_{I_t}[\mathbb{P}[h_{MBS} > \frac{TI_{t_{SBS,MBS}} r_2^\alpha}{P_{MBS}} \mid r_2, I_{t_{SBS,MBS}}]] \quad (۲۱-۳)$$

$$= E_{I_t}\left[\exp\left(-\frac{TI_{t_{SBS,MBS}} r_2^\alpha}{P_{MBS}}\right) \mid r_2\right] \quad (۲۲-۳)$$

$$= \mathcal{L}_{I_{t_{SBS,MBS}}}\left(\frac{Tr_2^\alpha}{P_{MBS}}\right) \quad (۲۳-۳)$$

قضیه ۳-۱. با فرض تعریف فاصله های تصادفی r_2, r_1 که به ترتیب فاصله تصادفی کاربر از SBS و SBS

از MBS می باشد، تبدیل لاپلاس ناشی از تداخل تجربه شده توسط کاربر از SBS و همچنین تبدیل لاپلاس

ناشی از تداخل تجربه شده توسط SBS از MBS را به صورت زیر تعریف می کنیم.

$$\mathcal{L}_{I_{t_{u,SBS}}}\left(\frac{Tr_1^\alpha}{P_{SBS}}\right) = \exp\left(-\pi r_1^2 \left[\lambda_{SBS} \omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{MBS}}{P_{SBS}}\right)^{\frac{2}{\alpha}} \lambda_{MBS} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha)\right]\right) \quad (۲۴-۳)$$

$$\mathcal{L}_{I_{t_{SBS,MBS}}}\left(\frac{Tr_2^\alpha}{P_{MBS}}\right) = \exp\left(-\pi r_2^2 \left[\lambda_{MBS} \omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{SBS}}{P_{MBS}}\right)^{\frac{2}{\alpha}} \lambda_{SBS} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha)\right]\right) \quad (۲۵-۳)$$

که در روابط فوق $\omega(\alpha, T)$ و $\theta(\alpha)$ را به صورت زیر تعریف می کنیم.

$$\omega(\alpha, T) = T^{\frac{2}{\alpha}} \int_{T^{-\frac{2}{\alpha}}}^{\infty} \frac{1}{1+u^2} du \quad (۲۶-۳)$$

$$\theta(\alpha) = \frac{\frac{2\pi}{\alpha}}{\sin\left(\frac{2\pi}{\alpha}\right)} \quad (27-3)$$

اثبات قضیه ۳-۱ با استفاده از تعریف PGFL، i.i.d بودن Φ_{SBS} و Φ_{MBS} و توزیع نمایی تداخل بدست

می آید [۹].

قضیه ۳-۲. با توجه به مقدار آستانه و با فرض اینکه محتوای درخواستی f در SBS موجود باشد،

احتمال قطع در انتقال محتوا بین SBS و کاربر به صورت زیر تعریف می شود.

$$\mathbb{P}_{out1} = \left[1 - \frac{1}{1 + \omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{MBS}}{P_{SBS}}\right)^{\frac{2}{\alpha}} \frac{\lambda_{MBS}}{\lambda_{SBS}} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha)} \right] \quad (28-3)$$

اثبات.

$$P_{out1} = P(SIR_{u,SBS} < T) \quad (29-3)$$

$$= \left[\int_0^{\infty} \left[1 - \mathcal{L}_{I_{t_u,SBS}} \left(\frac{Tr_1^\alpha}{P_{SBS}} \right) \right] f_1(r_1) dr_1 \right] \quad (30-3)$$

$$= \int_0^{\infty} f_1(r_1) dr_1 - \int_0^{\infty} \mathcal{L}_{I_{t_u,SBS}} \left(\frac{Tr_1^\alpha}{P_{SBS}} \right) f_1(r_1) dr_1 \quad (31-3)$$

$$= \int_0^{\infty} 2\pi\lambda_{SBS}r_1 e^{-\pi\lambda_{SBS}r_1^2} dr_1 - \int_0^{\infty} \mathcal{L}_{I_{t_u,SBS}} \left(\frac{Tr_1^\alpha}{P_{SBS}} \right) f_1(r_1) dr_1 \quad (32-3)$$

حال می بایست انتگرال های رابطه ی (۳۲-۳) را محاسبه کنیم. از این انتگرال اول را i و انتگرال دوم را

ii می نامیم و هریک را جداگانه محاسبه می کنیم.

محاسبه انتگرال i با استفاده از تغییر متغیر $2\pi\lambda_{SBS}r_1 dr_1 = du \Rightarrow \pi\lambda_{SBS}r_1^2 = u$ داریم.

$$i) \int_0^{\infty} 2\pi\lambda_{SBS}r_1 e^{-\pi\lambda_{SBS}r_1^2} dr_1 = \int_0^{\infty} e^{-u} du = 1 \quad (33-3)$$

(ii) محاسبه انتگرال

$$ii) \int_0^{\infty} \mathcal{L}_{I_{t_u, SBS}} \left(\frac{Tr_1^\alpha}{P_{SBS}} \right) f_1(r_1) dr_1 \quad (34-3)$$

$$= \int_0^{\infty} 2\pi\lambda_{SBS}r_1 e^{-\pi\lambda_{SBS}r_1^2} e^{-\pi r_1^2 \left[\lambda_{SBS}\omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{MBS}}{P_{SBS}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \lambda_{MBS} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha) \right]} dr_1 \quad (35-3)$$

$$= \int_0^{\infty} 2\pi\lambda_{SBS}r_1 e^{-\pi r_1^2 \lambda_{SBS} \left[\omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{MBS}}{P_{SBS}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \frac{\lambda_{MBS}}{\lambda_{SBS}} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha) + 1 \right]} dr_1 \quad (36-3)$$

$$= \int_0^{\infty} \exp \left(-u \left[\omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{MBS}}{P_{SBS}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \frac{\lambda_{MBS}}{\lambda_{SBS}} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha) + 1 \right] \right) du \quad (37-3)$$

$$= \frac{1}{1 + \omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{MBS}}{P_{SBS}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \frac{\lambda_{MBS}}{\lambda_{SBS}} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha)} \quad (38-3)$$

در نتیجه با جایگذاری روابط (33-3) و (38-3) در معادله (32-3)، اثبات کامل می‌شود.

قضیه 3-3. با توجه به مقدار آستانه و با فرض اینکه محتوای درخواستی f در SBS موجود نباشد،

احتمال قطع در انتقال محتوا بین MBS و کاربر به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\mathbb{P}_{out2} = \left[1 - \left(\frac{1}{1 + \omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{MBS}}{P_{SBS}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \frac{\lambda_{MBS}}{\lambda_{SBS}} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha)} \right) \right. \\ \left. \times \left(\frac{1}{1 + \omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{SBS}}{P_{MBS}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \frac{\lambda_{SBS}}{\lambda_{MBS}} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha)} \right) \right] \quad (39-3)$$

اثبات.

$$\mathbb{P}_{out2} = \mathbb{P}(SIR_{u,SBS} \cup SIR_{SBS,MBS} < T) \quad (40-3)$$

$$= \mathbb{P}(SIR_{u,SBS} < T) + \mathbb{P}(SIR_{SBS,MBS} < T) \quad (41-3)$$

$$- \mathbb{P}(SIR_{u,SBS} < T)\mathbb{P}(SIR_{SBS,MBS} < T)$$

$$= \int_0^\infty \left[1 - \mathcal{L}_{I_{t_u,SBS}} \left(\frac{Tr_1^\alpha}{P_{SBS}} \right) \right] f_1(r_1) dr_1$$

$$+ \int_0^\infty \left[1 - \mathcal{L}_{I_{t_{SBS,MBS}}} \left(\frac{Tr_2^\alpha}{P_{MBS}} \right) \right] f_2(r_2) dr_2 \quad (42-3)$$

$$- \left[\int_0^\infty \left[1 - \mathcal{L}_{I_{t_u,SBS}} \left(\frac{Tr_1^\alpha}{P_{SBS}} \right) \right] f_1(r_1) dr_1 \right.$$

$$\left. \times \int_0^\infty \left[1 - \mathcal{L}_{I_{t_{SBS,MBS}}} \left(\frac{Tr_2^\alpha}{P_{MBS}} \right) \right] f_2(r_2) dr_2 \right]$$

عبارت رابطه (42-3) را B می‌نامیم. برای محاسبه انتگرال‌های رابطه‌ی (42-3) از نتایج حاصل از حل

انتگرال‌های قضیه 3-1 استفاده می‌کنیم. انتگرال اول موجود در B دقیقاً انتگرال حل شده در اثبات قضیه

3-1 می‌باشد و نیازی به حل مجدد آن نیست. انتگرال دوم موجود در B نیز مشابه انتگرال اول بوده و به‌طور

خلاصه و به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم.

$$\int_0^\infty \left[1 - \mathcal{L}_{I_{t_{SBS,MBS}}} \left(\frac{Tr_2^\alpha}{P_{MBS}} \right) \right] f_2(r_2) dr_2 \quad (43-3)$$

$$= 1 - \frac{1}{1 + \omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{SBS}}{P_{MBS}} \right)^\alpha \frac{\lambda_{SBS}}{\lambda_{MBS}} T^\alpha \theta(\alpha)} \quad (44-3)$$

بنابراین با جایگذاری جواب انتگرال‌ها در رابطه‌ی (42-3) عبارت B به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$B = 1 - \frac{1}{1 + \omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{MBS}}{P_{SBS}} \right)^\alpha \frac{\lambda_{MBS}}{\lambda_{SBS}} T^\alpha \theta(\alpha)} \quad (45-3)$$

$$\begin{aligned}
& +1 - \frac{1}{1 + \omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{SBS}}{P_{MBS}}\right)^\alpha \frac{\lambda_{SBS}}{\lambda_{MBS}} T^\alpha \theta(\alpha)} \\
& - \left[\left(1 - \frac{1}{1 + \omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{MBS}}{P_{SBS}}\right)^\alpha \frac{\lambda_{MBS}}{\lambda_{SBS}} T^\alpha \theta(\alpha)} \right) \right. \\
& \quad \left. \times \left(1 - \frac{1}{1 + \omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{SBS}}{P_{MBS}}\right)^\alpha \frac{\lambda_{SBS}}{\lambda_{MBS}} T^\alpha \theta(\alpha)} \right) \right]
\end{aligned}$$

در نتیجه با انجام ساده‌سازی‌های لازم در رابطه (۳-۴۵) اثبات تکمیل می‌شود و به رابطه (۳-۳۹) می‌رسیم.

رسیم.

قضیه ۳-۴. در صورتی که کاربری محتوای f را درخواست می‌کند، احتمال قطع در انتقال محتوا

به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\mathbb{P}_{out} = \begin{cases} \mathbb{P}_{out1} & , \quad \forall f \in SBS \\ \mathbb{P}_{out2} & , \quad \forall f \notin SBS \end{cases} \quad (۳-۴۶)$$

اثبات.

اگر محتوای درخواستی f در SBS وجود داشته باشد اما به کاربر درخواست دهنده نرسد و قطع رخ

دهد از رابطه (۳-۲۸) استفاده می‌شود. در غیر این صورت اگر محتوای f در SBS موجود نباشد، MBS به

SBS سرویس می‌دهد و سپس SBS آن را به کاربر می‌رساند. احتمال قطع این حالت نیز طبق رابطه

(۳-۳۹) بدست می‌آید. بنابراین احتمال قطع محتوای درخواستی f به صورت رابطه (۳-۴۶) بدست می‌آید.

همچنین متوسط احتمال قطع برابر است با:

$$\mathbb{P}_{out,ave} = \sum_{f \in F} q_f \mathbb{P}_{out} \quad (47-3)$$

۳-۵ نتایج شبیه‌سازی

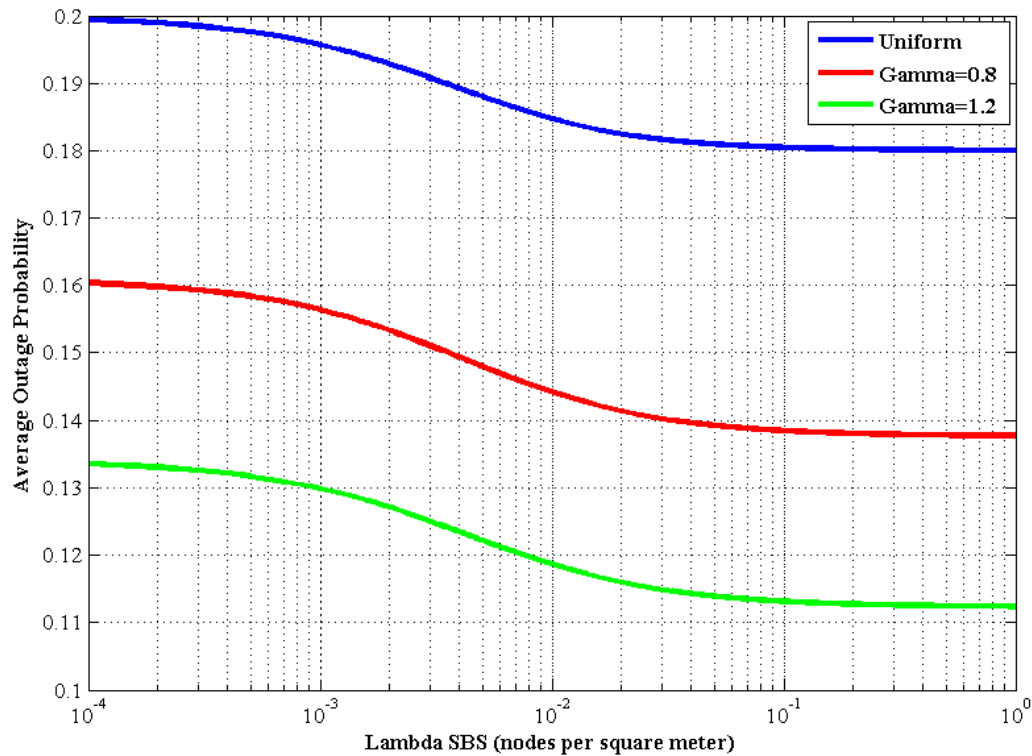
در این بخش عملکرد طرح پیشنهادی را با استفاده از شبیه‌سازی روابط بدست آمده از بخش‌های قبلی بررسی می‌کنیم. در واقع شبیه‌سازی انجام شده به ازای درخواست‌های متفاوت کاربر، برای محتویات مختلف از مجموعه F می‌باشد. به ازای هر درخواست محتوا از سوی کاربر مقادیر q_f محاسبه شده و با توجه به وجود و یا عدم وجود فایل درخواستی در SBS، نمودار احتمال قطع متوسط برحسب مقدار آستانه SIR و برحسب چگالی SBSها رسم شده است. فرض می‌کنیم که توان ارسالی MBS برابر 45 dbm و توان ارسالی SBS برابر 28 dbm باشد و نسبت فایل‌های ذخیره شده در SBS به فایل‌های موجود در MBS برابر 0.3 می‌باشد و مقدار T برابر عدد 10 باشد. همچنین فرض می‌کنیم $\alpha = 4$ و $\lambda_{MBS} = 10^{-4}$ می‌باشد و λ_{SBS} از 10^{-4} تا 10^0 تغییر می‌کند.

شکل (۳-۱) مقدار متوسط احتمال قطع را برحسب λ_{SBS} و به ازای مقادیر مختلف γ نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل (۳-۱) نشان داده شده است با افزایش چگالی SBSها، متوسط احتمال قطع کاهش

می‌یابد. زیرا هرچه λ_{SBS} افزایش می‌یابد، احتمال داشتن SBS ای با کانالی با کیفیت مناسب، در اتصال به

کاربر و در اتصال به MBS افزایش می‌یابد.



شکل (۱-۳) احتمال قطع متوسط برحسب مقدار λ_{SBS} به ازای γ های مختلف

همچنین در شکل (۱-۳) نشان داده شده است که هرچه مرتبه محبوبیت افزایش می‌یابد، متوسط

احتمال قطع کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش مرتبه محبوبیت، احتمال درخواست شدن محتویات محبوب از

سوی کاربران افزایش می‌یابد و از آنجایی که محبوب‌ترین محتویات در SBS وجود دارند، SBS مستقیماً به

کاربر سرویس‌دهی می‌کند و نیاز در اتصال از SBS به MBS کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، به‌منظور

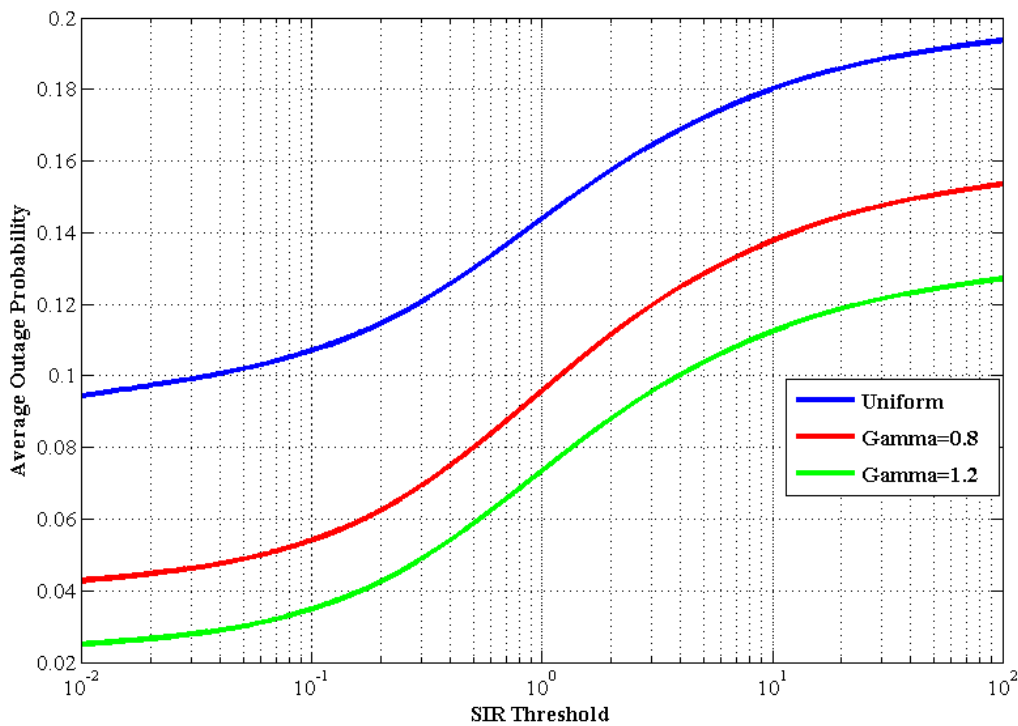
محاسبه متوسط احتمال قطع در این حالت، لینک بین SBS و MBS اهمیت کمتری پیدا می‌کند و تنها

لینک بین کاربر و SBS لحاظ می‌گردد که در نتیجه این امر سبب کاهش متوسط احتمال قطع می‌شود.

شکل (۲-۳) نیز مقدار احتمال قطع متوسط را برحسب مقدار آستانه SIR و به ازای γ های مختلف نشان

می‌دهد. بدیهی است که با افزایش مقدار آستانه SIR، متوسط احتمال قطع نیز افزایش می‌یابد، به طوری که

توزیع یکنواخت دارای بیشترین مقدار متوسط احتمال قطع می‌باشد.



شکل (۲-۳) احتمال قطع متوسط برحسب مقدار آستانه SIR به ازای γ های مختلف

فصل ۴:

تاخیر در شبکه نامحکون دولایه با استفاده از تکنیک

درخواست تکرار خودکار

۴-۱ مقدمه

در این فصل به بررسی یکی دیگر از پارامترهای سیستم مدل پیشنهادی در شبکه سلولی ناهمگون می‌پردازیم. در واقع در این فصل به محاسبه متوسط تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر درخواست دهنده محتوا در یک انتقال فرسوس، با استفاده از تکنیک درخواست تکرار خودکار می‌پردازیم. یک شبکه سلولی دولایه شامل ایستگاه‌های پایه بزرگ و ایستگاه‌های پایه کوچک در نظر می‌گیریم که طبق فرآیند نقطه‌ای پواسون توزیع شده‌اند. همچنین فرض می‌کنیم سلول‌های کوچک قابلیت ذخیره‌سازی محتویات محبوب را دارند و مجموعه‌ای از محتویات نیز در سلول‌های بزرگ قرار دارد. در ادامه نیز تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر در انتقال موفق محتوا را برای دو حالت ممکن در یک فرم بسته بدست می‌آوریم. در پایان این فصل نیز با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی و روابط عملکرد شبکه را ارزیابی می‌کنیم.

۴-۲ سیستم مدل پیشنهادی

یک شبکه سلولی ناهمگون دولایه شامل ایستگاه‌های پایه بزرگ و ایستگاه‌های پایه کوچک در نظر می‌گیریم که طبق فرآیند نقطه‌ای پواسون توزیع شده‌اند. فرض می‌کنیم ارتباط بین MBS و SBS و ارتباط بین SBS با کاربر بر اساس تکنیک ARQ می‌باشد که در یک شکاف زمانی انجام می‌شود. همچنین فرض

می‌کنیم SBSها قابلیت ذخیره‌سازی محتویات محبوب را دارند و MBS مجموعه‌ای از تمامی محتویات را در اختیار دارد. علاوه بر این فرض می‌کنیم درخواست محتوا از سوی کاربران طبق توزیع زیف مدل می‌شود.

۴-۲-۱ انواع تأخیر

به‌طور کلی تأخیر تجربه‌شده کاربر از سوی ایستگاه‌های پایه، در فرآیند درخواست محتوا تا رسیدن محتوا به کاربر را به دو صورت زیر تعریف می‌کنیم.

الف) تأخیر ناشی از انتقال فروسو: زمانی که کاربر نوعی فایلی را درخواست می‌دهد ایستگاه‌های

سلولی کوچک و بزرگ موظف به رساندن محتوا به کاربر می‌باشند. تأخیر موجود در انتقال فروسو در شبکه‌های بی‌سیم، غالباً به دلیل تداخل ناشی از انتقال هم‌زمان و محوشدگی کانال به وجود می‌آید.

ب) تأخیر ناشی از ذخیره‌سازی محتوا: در فرآیند تحویل محتوا به کاربر از سوی ایستگاه‌های پایه

سلولی کوچک، اگر فایل درخواستی در سلول‌های کوچک وجود داشته باشد، ابتدا می‌بایست فایل از حافظه از پیش تعیین‌شده در سلول‌های کوچک فراخوانی شود. در واقع این تأخیر ناشی از فراخوانی فایل‌ها از حافظه‌ی پنهان می‌باشد که به نوع حافظه و مکانیزم تعیین‌شده در ذخیره‌سازی (به‌عنوان مثال دیسک سخت، دیسک حالت جامد^۱ (SSD)) بستگی دارد. بنابراین تأخیر ناشی از ذخیره‌سازی محتوا را به‌صورت یک متغیر

^۱ Solid-State Disk (SSD)

تصادفی با توزیع نمایی و با میانگین $\bar{\mu}_c$ تعریف می‌کنیم که متناسب با نوع حافظه و مکانیزم ذخیره‌سازی می‌باشد. همچنین به این نکته نیز باید اشاره کرد که تأخیر ناشی از ذخیره‌سازی محتوا در مقایسه با تأخیر ناشی از انتقال فرسو بسیار ناچیز است که حتی می‌توان از مقدار آن در محاسبه صرف‌نظر کرد.

هنگامی که کاربر فایلی را درخواست می‌کند ابتدا درخواست او برای نزدیک‌ترین SBS ارسال می‌شود که در این آنجا دو حالت اتفاق می‌افتد:

حالت اول) محتوای درخواستی از سوی کاربر در SBS وجود داشته باشد، از این‌رو SBS محتوای درخواستی را برای کاربر ارسال می‌کند.

حالت دوم) محتوای درخواستی از سوی کاربر در SBS وجود نداشته باشد، از این‌رو SBS درخواست را به نزدیک‌ترین MBS ارسال می‌کند و فایل درخواستی را از MBS دریافت می‌کند. به محض دریافت محتوا از سوی MBS، SBS محتوای دریافتی را برای کاربر ارسال می‌کند.

برای محاسبه‌ی تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر در هر یک از حالت‌های نامبرده شده، ابتدا نتایج ناشی از قضیه ۱-۳ را به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

نتیجه ۴-۱. احتمال انتقال موفق محتوا از نزدیک‌ترین SBS به کاربر نوعی که در موقعیت r_1 نسبت به

آن مستقر است، با فرض ناچیز بودن نویز (مدل تداخل محدود) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathbb{P}_{SBS,u}(r_1) = \exp\left(-\pi r_1^2 \left[\lambda_{SBS} \omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{MBS}}{P_{SBS}}\right)^{\frac{2}{\alpha}} \lambda_{MBS} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha) \right]\right) \quad (1-4)$$

نتیجه ۴-۲. احتمال انتقال موفق محتوا از نزدیک‌ترین MBS به SBS که در موقعیت r_2 نسبت به آن

مستقر است، با فرض ناچیز بودن نویز (مدل تداخل محدود) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathbb{P}_{MBS,SBS}(r_2) = \exp\left(-\pi r_2^2 \left[\lambda_{MBS} \omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{SBS}}{P_{MBS}}\right)^{\frac{2}{\alpha}} \lambda_{SBS} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha) \right]\right) \quad (2-4)$$

۴-۳ تحلیل تأخیر

محاسبه‌ی تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر در حالت اول (وجود فایل درخواستی در SBS): برای

محاسبه‌ی تأخیر ناشی از انتقال محتوا از SBS به کاربر، یک پروتکل درخواست تکرار خودکار ساده در نظر

می‌گیریم، که در آن محتویات درخواستی از سوی کاربر بارها و بارها ارسال می‌شود تا اینکه محتوا با موفقیت

تحویل داده شود. همچنین باید این نکته را در نظر بگیریم که موفقیت و یا عدم موفقیت در تحویل محتوا از

سوی ایستگاه‌های پایه، به بیشتر بودن مقدار SINR (SIR در سیستم مدل پیشنهادی) از مقدار آستانه از

پیش تعریف‌شده و فیدبک بستگی دارد. اگر محتوای درخواستی با موفقیت تحویل داده شود، یک بیت ACK

با تأخیر و خطای ناچیز از سوی کاربر برای SBS ارسال می‌شود. در غیر این صورت اگر محتوای درخواستی با موفقیت به کاربر تحویل داده نشود، SBS یک بیت NACK با همان ویژگی از سوی کاربر دریافت می‌کند. فرض می‌کنیم هر یک از تلاش‌ها برای درخواست فایل از سوی کاربر به اندازه T_0 از زمان طول بکشد. همچنین فرض می‌کنیم یک قطع انتقال زمانی رخ می‌دهد که محتوای درخواستی بعد از M بار تلاش در درخواست محتوا از سوی کاربر، با موفقیت تحویل داده نشود. بنابراین در حالت اول تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر ناشی از انتقال فرسو از SBS به کاربر را D_{u1} می‌نامیم.

قضیه ۴-۱. در صورت وجود محتوای درخواستی در SBS، متوسط تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر

به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\bar{D}_{u1} = T_0 \sum_{i=0}^{M-1} \binom{M}{i+1} (-1)^i \frac{1}{1 + i \left[\omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{MBS}}{P_{SBS}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \frac{\lambda_{MBS}}{\lambda_{SBS}} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha) \right]} \quad (3-4)$$

اثبات.

متوسط تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر را زمانی که محتوای درخواستی در SBS موجود باشد، به صورت

زیر تعریف می‌کنیم.

$$\bar{D}_{u1} = \mathbb{E}[D_{u1}] \quad (4-4)$$

برای محاسبه‌ی $\mathbb{E}[D_{u1}]$ می‌دانیم تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر در این حالت برابر حاصل ضرب مقدار تأخیر در هر مرحله در احتمال وقوع آن مرحله می‌باشد. در مرحله اول حداقل مقدار تأخیر برابر T_0 با احتمال $\mathbb{P}_{SBS,u}(r_1)$ می‌باشد. در مرحله‌ی دوم مقدار تأخیر برابر $2T_0$ می‌باشد، که احتمال وقوع آن به صورت $(1 - \mathbb{P}_{SBS,u}(r_1))\mathbb{P}_{SBS,u}(r_1)$ است، به طوری که یکبار عدم موفقیت در انتقال محتوا و یکبار موفقیت در انتقال رخ می‌دهد. به همین ترتیب مرحله‌ی سوم با مقدار تأخیر $3T_0$ با مقادیر احتمال دو بار عدم موفقیت در انتقال محتوا و یکبار موفقیت در انتقال محتوا محاسبه می‌شود. به همین ترتیب و با ادامه این روند می‌توان $\mathbb{E}[D_{u1}|r_1]$ را به صورت زیر نوشت. همچنین برای سهولت در نگارش $\mathbb{P}_{SBS,u}(r_1)$ را P_1 می‌نامیم.

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[D_{u1}|r_1] &= T_0P_1 + 2T_0(1 - P_1)P_1 + 3T_0(1 - P_1)^2P_1 + 4T_0(1 - P_1)^3P_1 + \\ &\quad \dots + MT_0(1 - P_1)^{M-1}P_1 + MT_0(1 - P_1)^M \quad (5-4) \\ &= T_0 + (1 - P_1)[T_0 + (1 - P_1)(T_0 + \dots)] \quad (6-4) \\ &= T_0[1 + (1 - P_1) + (1 - P_1)^2 + \dots + (1 - P_1)^{M-1}] \quad (7-4) \\ &= T_0 \frac{1 - (1 - P_1)^M}{P_1} \quad (8-4) \end{aligned}$$

حال متوسط تأخیر انتقال فرسو از SBS را با توجه به قانون امید ریاضی کل به صورت زیر محاسبه می‌کنیم.

$$\mathbb{E}[D_{u1}] = \mathbb{E}[\mathbb{E}[D_{u1}|r_1]] \quad (9-4)$$

$$= T_0 \int_0^{\infty} \frac{1 - (1 - P_1)^M}{P_1} f_1(r_1) dr_1 \quad (۱۰-۴)$$

برای حل انتگرال رابطه‌ی (۱۰-۴) ابتدا عبارت $(1 - \mathbb{P}_{SBS,u}(r_1))^M$ را با استفاده از تعریف بسط

دوجمله‌ای به صورت زیر ساده می‌کنیم.

$$(1 - P_1)^M = \sum_{i=0}^M \binom{M}{i} (-1)^i P_1^i \quad (۱۱-۴)$$

و همچنین داریم:

$$1 - (1 - P_1)^M = \sum_{i=0}^{M-1} \binom{M}{i+1} (-1)^i P_1^{i+1} \quad (۱۲-۴)$$

بنابراین با جایگذاری رابطه (۱۲-۴) در رابطه‌ی (۱۰-۴) و جابجایی عملگرهای خطی، داریم:

$$\mathbb{E}[D_{u1}] = T_0 \sum_{i=0}^{M-1} \binom{M}{i+1} (-1)^i \int_0^{\infty} P_1^i f_1(r_1) dr_1 \quad (۱۳-۴)$$

انتگرال رابطه‌ی (۱۳-۴) را A_i می‌نامیم و آن را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم.

$$A_i = \int_0^{\infty} P_1^i f_1(r_1) dr_1 \quad (۱۴-۴)$$

$$= \int_0^{\infty} 2\pi\lambda_{SBS}r_1 e^{-\pi\lambda_{SBS}r_1^2} e^{-\pi r_1^2 i \left[\lambda_{SBS}\omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{MBS}}{P_{SBS}}\right)^{\frac{2}{\alpha}} \lambda_{MBS} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha) \right]} dr_1 \quad (۱۵-۴)$$

با استفاده از تغییر متغیر $\pi\lambda_{SBS}r_1^2 = u \Rightarrow 2\pi\lambda_{SBS}r_1 dr_1 = du$ داریم:

$$A_i = \int_0^{\infty} \exp\left(-u \left(1 + i \left[\omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{MBS}}{P_{SBS}}\right)^{\frac{2}{\alpha}} \frac{\lambda_{MBS}}{\lambda_{SBS}} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha)\right]\right)\right) du \quad (۱۶-۴)$$

$$= \frac{1}{1 + i \left[\omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{MBS}}{P_{SBS}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \frac{\lambda_{MBS}}{\lambda_{SBS}} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha) \right]} \quad (17-4)$$

حال با جایگذاری حاصل انتگرال از رابطه‌ی (۴-۱۷)، در رابطه‌ی (۴-۱۳) به رابطه‌ی (۴-۳) می‌رسیم.

محاسبه‌ی تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر در حالت دوم (عدم وجود فایل درخواستی در SBS):

در حالت دوم برای محاسبه تأخیر ناشی از انتقال فرسو از MBS به SBS و سپس از SBS به کاربر مانند

حالت اول یک پروتکل ارسال مجدد ساده در نظر می‌گیریم، که در آن محتویات درخواستی از سوی SBS

بارها و بارها ارسال می‌شود تا اینکه محتوا با موفقیت به SBS تحویل داده شود. از آنجایی که MBS مجموعه‌ای

از تمامی محتویات را در اختیار دارد، محتوای درخواستی را برای SBS ارسال می‌کند. اگر محتوای درخواستی

با موفقیت به SBS تحویل داده شود، یک بیت ACK با تأخیر و خطای ناچیز از سوی SBS برای MBS

ارسال می‌شود. در غیر این صورت اگر محتوای درخواستی با موفقیت به SBS تحویل داده نشود، MBS یک

بیت NACK با همان ویژگی از سوی SBS دریافت می‌کند.

فرض می‌کنیم هر یک از تلاش‌ها برای درخواست محتوا از سوی SBS به MBS به اندازه T_0 از زمان

طول بکشد. همچنین فرض می‌کنیم یک قطع انتقال زمانی رخ می‌دهد که محتوای درخواستی بعد از M

بار تلاش در درخواست محتوا از سوی کاربر، با موفقیت تحویل داده نشود. پس از اینکه محتوای درخواستی

به SBS تحویل داده شد، MBS ارسال محتوا را متوقف می‌کند. حال محتوای درخواستی در SBS موجود

است و SBS محتوای دریافتی را برای کاربر ارسال می‌کند. بنابراین در ادامه مانند حالت اول اگر کاربر محتوا را دریافت نکند، یک پیام NACK برای SBS ارسال می‌کند. بنابراین SBS به محض دریافت پیام NACK، محتوا را مجدداً برای کاربر ارسال می‌کند تا اینکه محتوا با موفقیت به کاربر تحویل داده شود. بنابراین تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر در انتقال فرسوز از MBS به SBS و سپس از SBS به کاربر را D_{u2} می‌نامیم.

قضیه ۴-۲. در صورت عدم وجود محتوای درخواستی در SBS، متوسط تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر

به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} \bar{D}_{u2} = T_0 \sum_{n=0}^{M-1} \sum_{k=0}^n (n+2) & \left(\sum_{i=0}^{n-k} \binom{n-k}{i} (-1)^i Z_i \sum_{j=0}^k (-1)^j \binom{k}{j} W_j \right) \\ & + T_0 W M \sum_{i=0}^M \binom{M}{i} (-1)^i A_i + T_0 M \sum_{i=0}^M \binom{M}{i} (-1)^i B_i \end{aligned} \quad (18-4)$$

که در رابطه (۱۸-۴)، Z_i و W_j و همچنین B_i و W به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$Z_i = \frac{1}{1 + (i+1) \left[\omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{MBS}}{P_{SBS}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \frac{\lambda_{MBS}}{\lambda_{SBS}} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha) \right]} \quad (19-4)$$

$$W_j = \frac{1}{1 + (j+1) \left[\omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{SBS}}{P_{MBS}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \frac{\lambda_{SBS}}{\lambda_{MBS}} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha) \right]} \quad (20-4)$$

$$B_i = \frac{1}{1 + i \left[\omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{SBS}}{P_{MBS}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \frac{\lambda_{SBS}}{\lambda_{MBS}} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha) \right]} \quad (21-4)$$

$$W = \frac{1}{1 + \omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{SBS}}{P_{MBS}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \frac{\lambda_{SBS}}{\lambda_{MBS}} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha)} \quad (22-4)$$

اثبات.

متوسط تأخیر تجربه شده توسط کاربر را زمانی که محتوای درخواستی در SBS موجود نباشد، به صورت

زیر تعریف می کنیم.

$$\bar{D}_{u2} = \mathbb{E}[D_{u2}] \quad (۲۳-۴)$$

برای محاسبه ی $\mathbb{E}[D_{u2}]$ نیز مانند حالت قبل می بایست مقدار تأخیر هر مرحله را در احتمال وقوع آن

مرحله ضرب کنیم و در نهایت تمامی مراحل را با هم جمع کنیم. در این حالت، در مرحله اول حداقل مقدار

تأخیر برابر $2T_0$ می باشد و احتمال وقوع برابر $\mathbb{P}_{MBS,SBS}(r_2)\mathbb{P}_{SBS,u}(r_1)$ می باشد. در مرحله ی دوم مقدار

تأخیر برابر $3T_0$ می باشد و احتمال وقوع این مرحله برابر $\mathbb{P}_{MBS,SBS}(r_2)\mathbb{P}_{SBS,u}(r_1)(1 - \mathbb{P}_{SBS,u}(r_1))$

می باشد که به صورت دو انتقال موفق محتوا و یک عدم انتقال موفق محتوا تعریف می شود.

همچنین به این نکته باید توجه داشت که این عدم موفقیت در انتقال محتوا در کدام مرحله اتفاق

افتاده است، یعنی در این مرحله دو حالت اتفاق می افتد: (۱) یک عدم انتقال موفق محتوا از SBS به کاربر یا

(۲) یک عدم انتقال موفق محتوا از MBS به SBS. در مرحله سوم مقدار تأخیر برابر $4T_0$ و احتمال وقوع

به صورت دو انتقال موفق و دو عدم انتقال موفق می باشد، که در این صورت سه حالت اتفاق می افتد (۱) دو

عدم انتقال موفق محتوا از SBS به کاربر یا (۲) یک عدم انتقال موفق محتوا از SBS به کاربر و یک عدم

انتقال موفق محتوا از MBS به SBS یا ۳) دو عدم انتقال موفق محتوا از MBS به SBS. بنابراین تمامی حالات ممکن در هر مرحله را در نظر می‌گیریم.

از این رو این روند را برای M مرحله ادامه می‌دهیم و آن را به صورت زیر محاسبه کنیم و در یک فرم

بسته قرار می‌دهیم. همچنین برای سهولت در نگارش $\mathbb{P}_{SBS,u}(r_1)$ و $\mathbb{P}_{MBS,SBS}(r_2)$ را به ترتیب P_1 و P_2 می‌نامیم.

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[D_{u2}|r_2, r_1] &= 2T_0P_1P_2 + 3T_0P_1P_2(1 - P_1) + 3T_0P_1P_2(1 - P_2) \\ &\quad + 4T_0P_1P_2(1 - P_1)^2 + 4T_0P_1P_2(1 - P_1)(1 - P_2) \\ &\quad + 4T_0P_1P_2(1 - P_2)^2 + \dots + MT_0(1 - P_1)^MP_2 + MT_0(1 - P_2)^M \quad (24-4) \\ &= T_0P_1P_2[2 + 3(1 - P_1) + 3(1 - P_2) + 4(1 - P_1)^2 \\ &\quad + 4(1 - P_1)(1 - P_2) + 4(1 - P_2)^2 + \dots +] \\ &\quad + MT_0(1 - P_1)^MP_2 + MT_0(1 - P_2)^M \quad (25-4) \\ &= T_0P_1P_2 \left[\sum_{n=0}^{M-1} \sum_{k=0}^n (n+2)(1 - P_1)^{n-k}(1 - P_2)^k \right] \\ &\quad + T_0M(1 - P_1)^MP_2 + T_0M(1 - P_2)^M \quad (26-4) \end{aligned}$$

حال متوسط تأخیر انتقال فرسوسو از MBS به SBS و از SBS به کاربر را با توجه به قانون امید ریاضی

کل به صورت زیر محاسبه می‌کنیم.

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[D_{u2}] &= \mathbb{E}[\mathbb{E}[D_{u2}|r_2, r_1]] \quad (27-4) \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty T_0P_1P_2 \left[\sum_{n=0}^{M-1} \sum_{k=0}^n (n+2)(1 - P_1)^{n-k}(1 - P_2)^k \right] f_1(r_1)f_2(r_2)dr_1dr_2 \end{aligned}$$

$$+T_0M \int_0^\infty \int_0^\infty (1-P_1)^M P_2 f_1(r_1) f_2(r_2) dr_1 dr_2 + T_0M \int_0^\infty (1-P_2)^M f_2(r_2) dr_2 \quad (28-4)$$

در رابطه (28-4) مقادیر $(1-P_1)^{n-k}$ و $(1-P_2)^k$ و همچنین مقادیر $(1-P_1)^M$ و $(1-P_2)^M$ را

با معادل بسط دوجمله‌ای آن‌ها جایگذاری می‌کنیم.

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[D_{u2}] &= \int_0^\infty \int_0^\infty T_0 \left[\sum_{n=0}^{M-1} \sum_{k=0}^n (n+2) \right. \\ &\quad \times \left. \left(\sum_{i=0}^{n-k} \binom{n-k}{i} (-1)^i P_1^{i+1} \sum_{j=0}^k \binom{k}{j} (-1)^j P_2^{j+1} \right) \right] f_1(r_1) f_2(r_2) dr_1 dr_2 \\ &\quad + T_0M \int_0^\infty \int_0^\infty P_2 \sum_{i=0}^M \binom{M}{i} (-1)^i P_1^i f_1(r_1) f_2(r_2) dr_1 dr_2 \\ &\quad + T_0M \int_0^\infty \sum_{i=0}^M \binom{M}{i} (-1)^i P_2^i f_2(r_2) dr_2 \end{aligned} \quad (29-4)$$

با استفاده از خاصیت جابجایی عملگرهای خطی داریم:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[D_{u2}] &= T_0 \sum_{n=0}^{M-1} \sum_{k=0}^n (n+2) \left(\sum_{i=0}^{n-k} \binom{n-k}{i} (-1)^i \int_0^\infty P_1^{i+1} f_1(r_1) dr_1 \right. \\ &\quad \times \left. \sum_{j=0}^k \binom{k}{j} (-1)^j \int_0^\infty P_2^{j+1} f_2(r_2) dr_2 \right) \\ &\quad + T_0M \int_0^\infty P_2 f_2(r_2) dr_2 \times \sum_{i=0}^M \binom{M}{i} (-1)^i \int_0^\infty P_1^i f_1(r_1) dr_1 \\ &\quad + T_0M \sum_{i=0}^M \binom{M}{i} (-1)^i \int_0^\infty P_2^i f_2(r_2) dr_2 \end{aligned} \quad (30-4)$$

انتگرال‌های موجود در رابطه‌ی (۴-۳۰) را به ترتیب Z_i و W_j و W و A_i و B_i می‌نامیم و هرکدام را

جداگانه محاسبه می‌کنیم.

محاسبه‌ی Z_i :

$$Z_i = \int_0^{\infty} P_1^{i+1} f_1(r_1) dr_1 \quad (۴-۳۱)$$

$$= \int_0^{\infty} 2\pi\lambda_{SBS} r_1 e^{-\pi\lambda_{SBS} r_1^2} e^{-\pi r_1^2 (i+1) \left[\lambda_{SBS} \omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{MBS}}{P_{SBS}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \lambda_{MBS} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha) \right]} dr_1 \quad (۴-۳۲)$$

با استفاده از تغییر متغیر $2\pi\lambda_{SBS} r_1 dr_1 = du \Rightarrow \pi\lambda_{SBS} r_1^2 = u$ داریم:

$$Z_i = \int_0^{\infty} \exp \left(-u \left(1 + (i+1) \left[\omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{MBS}}{P_{SBS}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \frac{\lambda_{MBS}}{\lambda_{SBS}} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha) \right] \right) \right) du$$

$$= \frac{1}{1 + (i+1) \left[\omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{MBS}}{P_{SBS}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \frac{\lambda_{MBS}}{\lambda_{SBS}} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha) \right]} \quad (۴-۳۳)$$

محاسبه‌ی W_j :

$$W_j = \int_0^{\infty} P_2^{j+1} f_2(r_2) dr_2 \quad (۴-۳۴)$$

$$= \int_0^{\infty} 2\pi\lambda_{MBS} r_2 e^{-\pi\lambda_{MBS} r_2^2} e^{-\pi r_2^2 (j+1) \left[\lambda_{MBS} \omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{SBS}}{P_{MBS}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \lambda_{SBS} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha) \right]} dr_2 \quad (۴-۳۵)$$

با استفاده از تغییر متغیر $2\pi\lambda_{MBS} r_2 dr_2 = dv \Rightarrow \pi\lambda_{MBS} r_2^2 = v$ داریم:

$$W_j = \int_0^{\infty} \exp \left(-v \left(1 + (j+1) \left[\omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{SBS}}{P_{MBS}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \frac{\lambda_{SBS}}{\lambda_{MBS}} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha) \right] \right) \right) dv \quad (۴-۳۶)$$

$$= \frac{1}{1 + (j + 1) \left[\omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{SBS}}{P_{MBS}} \right)^2 \frac{\lambda_{SBS}}{\lambda_{MBS}} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha) \right]} \quad (37-4)$$

انتگرال W پیش‌تر و در فصل سوم به‌طور کامل حل شده است. همچنین انتگرال A_i طبق رابطه

(4-17) محاسبه شده است و انتگرال B_i نیز روند حل مشابه انتگرال A_i دارد، به همین منظور و برای پرهیز

از تکرار از حل آن خودداری می‌کنیم و صرفاً جواب نهایی انتگرال را به‌صورت زیر می‌نویسیم.

$$B_i = \frac{1}{1 + i \left[\omega(\alpha, T) + \left(\frac{P_{SBS}}{P_{MBS}} \right)^2 \frac{\lambda_{SBS}}{\lambda_{MBS}} T^{\frac{2}{\alpha}} \theta(\alpha) \right]} \quad (38-4)$$

بنابراین با جایگذاری حاصل انتگرال‌ها در رابطه (4-30)، اثبات عبارت $\mathbb{E}[D_{u2}]$ تکمیل می‌شود.

قضیه 4-3. متوسط تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر در انتقال محتوا از سوی ایستگاه‌های پایه به کاربر

به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\bar{D}_u = \begin{cases} \bar{D}_{u1} & , \quad \forall f \in SBS \\ \bar{D}_{u2} & , \quad \forall f \notin SBS \end{cases} \quad (39-4)$$

اثبات.

اگر محتوای درخواستی f در SBS وجود داشته باشد و بعد از M مرحله ARQ کاربر محتوا را دریافت

کند، از رابطه (4-3) استفاده می‌شود. در غیر این صورت اگر محتوای f در SBS موجود نباشد، MBS به

SBS سرویس می‌دهد و سپس SBS آن را به کاربر می‌رساند. در این حالت متوسط تأخیر از رابطه

(۱۸-۴) بدست می‌آید. بنابراین متوسط تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر درخواست دهنده محتوا از رابطه

(۳۹-۴) بدست می‌آید.

همچنین متوسط تأخیر با توجه درخواست کاربران به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\bar{D}_{u,ave} = \sum_{f \in F} q_f \bar{D}_u \quad (۴۰-۴)$$

۵-۴ نتایج شبیه‌سازی

در این بخش از پایان‌نامه برای درک بهتر نتایج تئوری بدست آمده از بخش‌های قبل، به بررسی نتایج

عددی شبکه ناهمگون ارائه‌شده در این فصل می‌پردازیم. همچنین تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر درخواست

دهنده را به ازای پارامترهای مختلف شبکه شبیه‌سازی می‌کنیم و سپس نتایج حاصل از این شبیه‌سازی را

تحلیل می‌کنیم. به همین منظور مقادیر پارامترهای لازم برای شبیه‌سازی را در جدول (۱-۴) آورده‌ایم.

جدول (۱-۴) مقادیر پارامترهای شبکه برای شبیه‌سازی

مقدار	پارامتر
10^{-4}	λ_{MBS} : چگالی ایستگاه پایه بزرگ
از 10^{-4} تا 10^{-1}	λ_{SBS} : چگالی ایستگاه پایه کوچک
45 dbm	P_{MBS} : توان ارسالی ایستگاه پایه بزرگ
28 dbm	P_{SBS} : توان ارسالی ایستگاه پایه کوچک
3, 6, 9	M : تعداد مراحل ARQ
0.8, 1.2	γ : انحراف توزیع محبوبیت محتوا
4	α : ضریب افت مسیر
10	مقدار آستانه T :

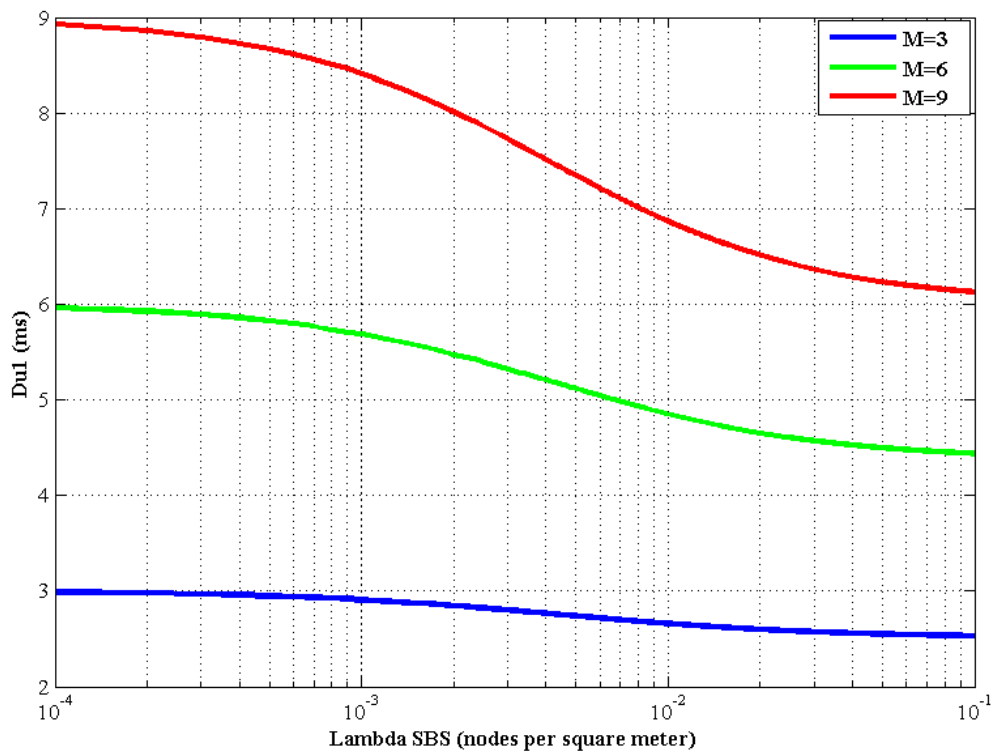
شکل (۱-۴) مقدار تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر درخواست دهنده محتوا را در حالت اول (وجود فایل

درخواستی در SBS) و به ازای مقادیر مختلف مراحل ARQ نشان می‌دهد. در واقع این شکل بیانگر رابطه

(۳-۴) به ازای مقادیر مختلف λ_{SBS} می‌باشد. بدیهی است که هرچه تعداد مراحل ARQ افزایش یابد تأخیر

تجربه‌شده توسط کاربر افزایش می‌یابد. همچنین همان‌طور که در شکل (۱-۴) مشخص است، افزایش تعداد

ایستگاه‌های پایه کوچک سبب کاهش تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر می‌شود. چراکه با افزایش ایستگاه پایه، احتمال داشتن نزدیک‌ترین SBS به کاربر و کانالی باکیفیت مناسب افزایش می‌یابد. در نتیجه احتمال دسترسی کاربر به محتوای درخواستی افزایش می‌یابد و تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر کاهش می‌یابد.



شکل (۱-۴) تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر در حالت اول به ازای مقادیر مختلف λ_{SBS} و M

در شکل (۲-۴) تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر درخواست دهنده محتوا در حالت دوم (عدم وجود فایل

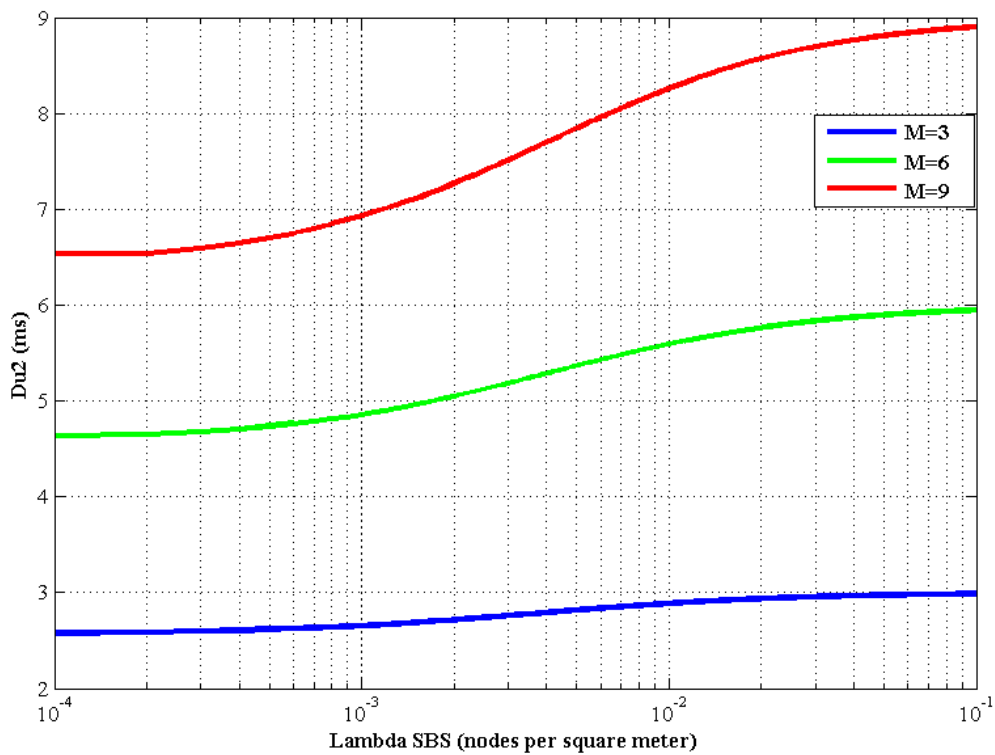
درخواستی در SBS) و به ازای مقادیر مختلف مراحل ARQ رسم شده است. در واقع این شکل بیانگر رابطه

(۱۸-۴) به ازای مقادیر مختلف λ_{SBS} می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشخص است با افزایش تعداد

ایستگاه‌های پایه کوچک در مراحل مختلف ARQ، تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر افزایش می‌یابد. دلیل این

امر می‌تواند اثر غالب افزایش تداخل ایجاد شده ناشی از سایر SBSها در این حالت باشد، به‌طوری‌که با

افزایش λ_{SBS} به سمت بی‌نهایت، تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر در حالت دوم به سمت M میل می‌کند.

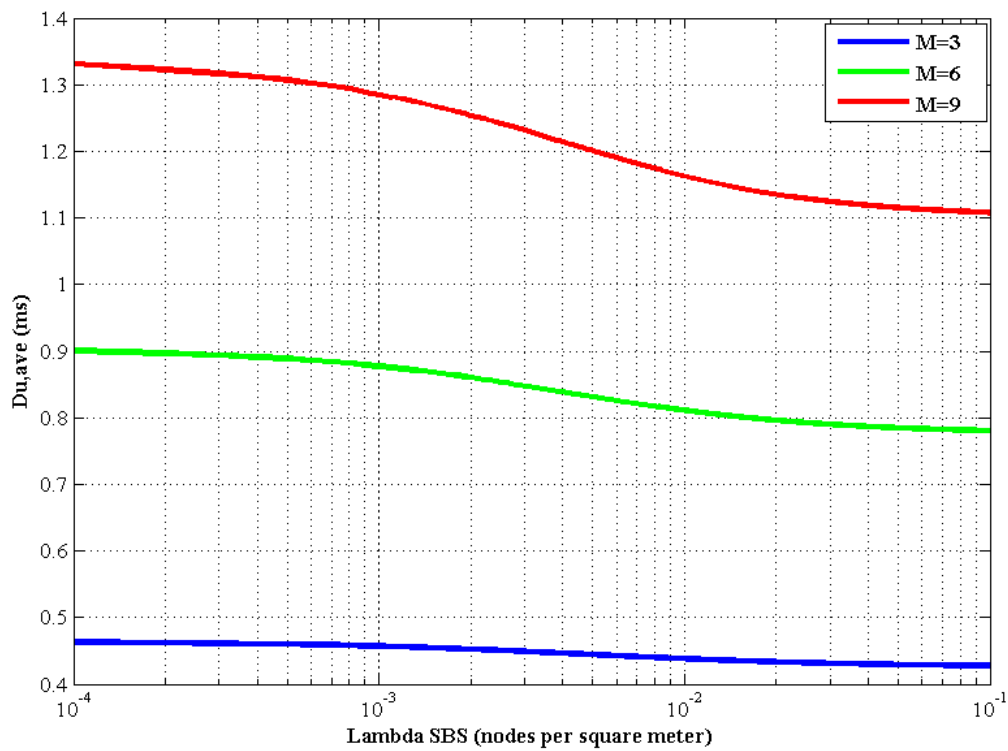


شکل (۲-۴) تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر در حالت دوم به ازای مقادیر مختلف λ_{SBS} و M

شکل (۳-۴) بیانگر متوسط تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر به ازای مقادیر مختلف λ_{SBS} و M می‌باشد که

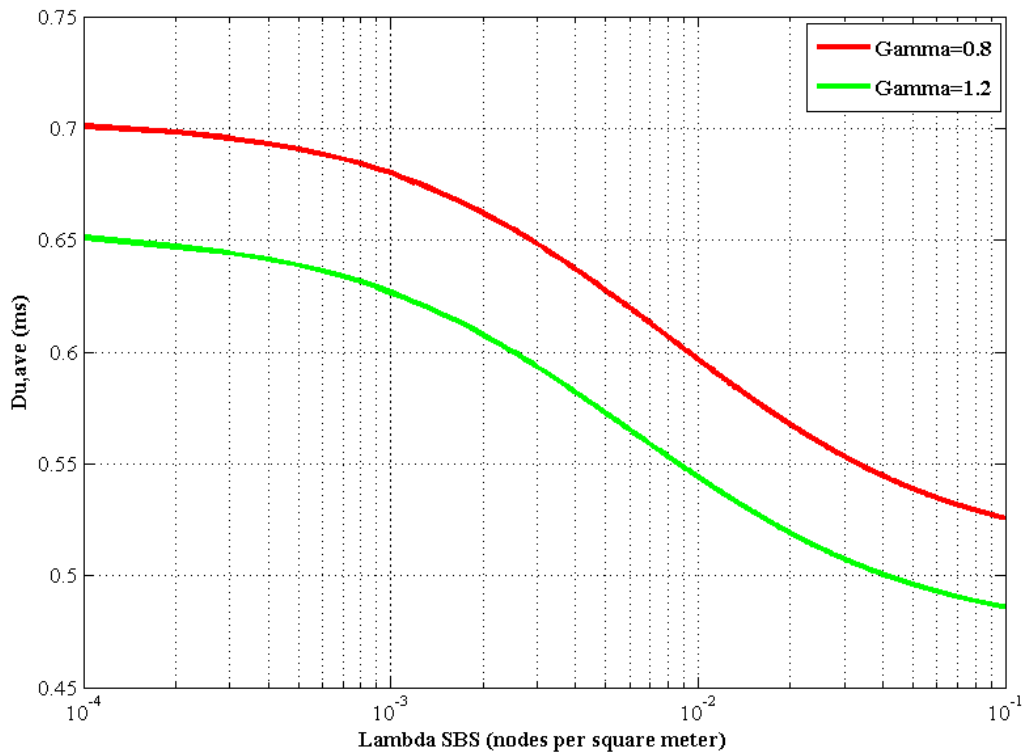
با توجه به رابطه (۴-۴۰) رسم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است به ازای افزایش چگالی

ایستگاه‌های پایه کوچک متوسط تأخیر تجربه‌شده کاربر کاهش می‌یابد. چراکه افزایش چگالی ایستگاه‌های پایه کوچک می‌تواند شانس داشتن یک SBS با کانالی باکیفیت مناسب را افزایش دهد. علاوه بر این، احتمال وجود SBS ای که هم به کاربر و هم به MBS نزدیک باشد افزایش می‌یابد، که این امر می‌تواند سبب کاهش احتمال قطع در هر دو لینک شود و در نتیجه متوسط تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر کاهش می‌یابد. همچنین بدیهی است که افزایش تعداد مراحل ARQ سبب افزایش متوسط تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر می‌شود.



شکل (۳-۴) متوسط تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر به ازای مقادیر مختلف λ_{SBS} و M

یکی دیگر از پارامترهایی که می‌تواند بر تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر درخواست دهنده محتوا تأثیرگذار باشد، مرتبه محبوبیت محتوا می‌باشد. شکل (۴-۴) متوسط تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر درخواست دهنده محتوا را به ازای مقادیر مختلف γ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است هرچه درخواست کاربران با درجه محبوبیت بیشتری انجام شود، متوسط تأخیر تجربه‌شده توسط آن‌ها کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که به ازای تعداد مراحل مشخص ARQ ($M=6$) در شکل (۴-۴)، متوسط تأخیر به ازای $\gamma = 1.2$ در مقایسه با $\gamma = 0.8$ کمتر می‌باشد.



شکل (۴-۴) متوسط تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر به ازای مقادیر مختلف λ_{SBS} و γ

فصل ۵:

نیجگیری و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های

آینده

۵-۱ نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

با توجه به افزایش تقاضا در داده‌های تلفن همراه، اپراتورهای شبکه نیازمند یک شبکه مخابراتی کارآمد، قابل‌اعتماد و پایدار به‌منظور افزایش کیفیت سرویس‌دهی به کاربران می‌باشند. در این بین یک روش جدید و مناسب برای کاهش اثرات رشد ترافیک و اشتراک‌گذاری بهتر محتوا، تکرار کردن محتویات محبوب در حافظه‌های پنهان و در اطراف کاربران می‌باشد. به همین منظور شبکه‌های سلولی ناهمگون با هدف کاهش فاصله کاربران به ایستگاه‌های پایه، افزایش سرعت دسترسی به محتوا و ایجاد یک انتقال مخابراتی قابل‌اعتماد معرفی شده‌اند.

هدف اصلی این پایان‌نامه ذخیره‌سازی محتوا در ایستگاه‌های پایه کوچک به‌منظور کاهش احتمال قطع در انتقال محتوا و کاهش تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر در فرایند درخواست تا تحویل محتوا به کاربر بوده است. در ابتدا یک شبکه سلولی ناهمگون دولایه به‌صورت مشارکتی در نظر گرفته شده است که در آن ایستگاه‌های پایه برای سرویس‌دهی به کاربران با یکدیگر همکاری می‌کنند. به همین منظور به بررسی عملکرد سیستم مدل پیشنهادی با محاسبه متوسط احتمال قطع در انتقال محتوا پرداخته‌ایم و نشان دادیم که هرچه توزیع درخواست محتوا بر اساس مرتبه محبوبیت صورت گیرد، متوسط احتمال قطع در انتقال محتوا کاهش می‌یابد. همچنین نشان دادیم که یکی دیگر از راه‌های افزایش احتمال دسترسی به محتوا،

افزایش تعداد ایستگاه‌های پایه کوچک می‌باشد. در ادامه به محاسبه تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر درخواست دهنده محتوا با استفاده از تکنیک ARQ در دو حالت پرداخته‌ایم. با استفاده از روابط تئوری بدست آمده برای پارامتر تأخیر و نتایج حاصل از شبیه‌سازی آن‌ها نشان داده‌ایم که به ازای افزایش ایستگاه‌های پایه کوچک، متوسط تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر کاهش می‌یابد و سیستم مدل پیشنهادی عملکرد قابل قبولی نسبت به پارامتر تأخیر دارد. همچنین در ادامه نشان داده‌ایم که هرچه توزیع درخواست محتوا بر اساس مرتبه محبوبیت صورت گیرد، متوسط تأخیر تجربه‌شده توسط کاربر کاهش می‌یابد.

بنابراین با توجه به نوآوری سیستم مدل پیشنهادی که در آن ایستگاه‌های پایه به‌منظور سرویس‌دهی به کاربر به‌صورت مشارکتی در نظر گرفته شده‌اند و همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی روابط تئوری، نتیجه می‌گیریم که سیستم مدل پیشنهادی می‌تواند یک سیستم کارآمد و قابل‌اعتماد به‌منظور ذخیره‌سازی و اشتراک محتوا در شبکه‌های سلولی ناهمگون باشد.

۲-۵ پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده

شبکه‌های سلولی ناهمگون و ذخیره‌سازی محتوا اهمیت فراوانی در سیستم مخابراتی به‌منظور افزایش ظرفیت شبکه و کاهش رشد ترافیک دارند. به همین منظور مطالعات گسترده‌ای درباره سیاست‌های ذخیره‌سازی محتوا، نحوه قرارگیری ایستگاه‌های پایه، استفاده بهینه از پهنای باند و تأثیر لینک‌های بک‌هال

بر عملکرد شبکه‌های ناهمگون در حال انجام است. در این قسمت پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده ارائه می‌کنیم.

- در نظر گرفتن مسیر اتصال مستقیم از کاربر به ایستگاه‌های پایه بزرگ در سیستم مدل پیشنهادی علاوه بر وجود مسیر غیرمستقیم به منظور بررسی کارایی شبکه ناهمگون.
- استفاده از ارتباط دستگاه به دستگاه در سیستم مدل پیشنهادی به طوری که برخی از کاربران قابلیت ذخیره‌سازی محتویات را داشته باشند.
- عدم قطعیت در پارامترها و توزیع‌های موجود در سیستم مدل پیشنهادی.
- در نظر گرفتن حافظه پنهان به منظور ذخیره‌سازی محتوا در وسایل نقلیه عمومی (مانند مترو و اتوبوس‌های تندرو) که در یک مسیر مشخص در حال حرکت می‌باشند. این امر می‌تواند سبب کاهش استفاده از ایستگاه‌های پایه کوچک در شبکه و در نتیجه کاهش تداخل و افزایش احتمال دسترسی به محتوا می‌شود.

فهرست مراجع

- [1] Cisco, Visual Networking Index: The Zettabyte Era:Trends and Analysis, june 2017.
- [2] Cisco, “Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021,” White Paper, March 2017.
- [3] Ericsson, “5G radio access - research and vision,” White Paper, 2012
- [4] M. Gregori, J. Gómez-Vilardebó, J. Matamoros, and D. Gündüz, “Wireless content caching for small cell and D2D networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 5, pp. 1222-1234, 2016.
- [5] E. Baştuğ, M. Bennis, and M. Debbah, “Proactive caching in 5G small cell networks,” *Towards 5G: Applications, Requirements and Candidate Technologies*, pp. 78-98, 2016.
- [6] J. G. Andrews, H. Claussen, M. Dohler, S. Rangan, and M. C. Reed, “Femtocells: Past, present, and future,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 30, no. 3, pp. 497-508, 2012.
- [7] J. G. Andrews, “Seven ways that HetNets are a cellular paradigm shift,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 3, pp. 136-144, 2013.
- [8] H. ElSawy, E. Hossain, and M. Haenggi, “Stochastic geometry for modeling, analysis, and design of multi-tier and cognitive cellular wireless networks: A survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 996-1019, 2013.
- [9] J. G. Andrews, F. Baccelli, and R. K. Ganti, “A tractable approach to coverage and rate in cellular networks,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, no. 11, pp. 3122-3134, 2011.
- [10] Q. Ye, B. Rong, Y. Chen, M. Al-Shalash, C. Caramanis, and J .G. Andrews, “User association for load balancing in heterogeneous cellular networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 6, pp. 2706-2716, 2013.
- [11] A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei, T. Ji, T. Luo, M. Vajapeyam, T. Yoo, O. Song , and D. Malladi, “A survey on 3GPP heterogeneous networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 3, 2011.
- [12] D. Lopez-Perez, I. Guvenc, G. De la Roche, M. Kountouris, T. Q. Quek, and J. Zhang, “Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 3, 2011.
- [13] S. Landstrom, H. Murai, and A. Simonsson, “Deployment aspects of LTE pico nodes,” in *Communications Workshops (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, 2011, pp. 1-5.
- [14] G. De La Roche, A. Valcarce, D. López-Pérez, and J. Zhang, “Access control mechanisms for femtocells,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 1, 2010.

- [15] J. Gora and S. Redana, "In-band and out-band relaying configurations for dual-carrier LTE-advanced system," in *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011 IEEE 22nd International Symposium on*, 2011, pp. 1820-1824.
- [16] Q. Ye, B. Rong, Y. Chen, M. Al-Shalash, C. Caramanis, and J. G. Andrews, "User association for load balancing in heterogeneous cellular networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 6, pp. 2706-2716, 2013.
- [17] L. A. Belady, "A study of replacement algorithms for a virtual-storage computer," *IBM Systems journal*, vol. 5, no. 2, pp. 78-101, 1966.
- [18] J. Wang, "A survey of web caching schemes for the internet," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 29, no. 5, pp. 36-46, 1999.
- [19] A. Araldo, M. Mangili, F. Martignon, and D. Rossi, "Cost-aware caching: optimizing cache provisioning and object placement in ICN," in *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2014 IEEE*, 2014, pp. 1108-1113.
- [20] E. Baştuğ, M. Bennis, M. Kountouris, and M. Debbah, "Cache-enabled small cell networks: Modeling and tradeoffs," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2015, no. 1, p. 41, 2015.
- [21] A. D. Wyner, "Shannon-theoretic approach to a Gaussian cellular multiple-access channel," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 40, no. 6, pp. 1713-1727, 1994.
- [22] S. Shamai and A. D. Wyner, "Information-theoretic considerations for symmetric, cellular, multiple-access fading channels. I," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 43, no. 6, pp. 1877-1894, 1997.
- [23] J. Xu, J. Zhang, and J. G. Andrews, "On the accuracy of the Wyner model in cellular networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 9, pp. 3098-3109, 2011.
- [24] M. Haenggi, J. G. Andrews, F. Baccelli, O. Dousse, and M. Franceschetti, "Stochastic geometry and random graphs for the analysis and design of wireless networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, no. 7, 2009.
- [25] M. Haenggi, *Stochastic geometry for wireless networks*: Cambridge University Press, 2012.
- [26] F. Baccelli, B. Blaszczyszyn, and P. Muhlethaler, "Stochastic analysis of spatial and opportunistic Aloha," *IEEE journal on selected areas in communications*, vol. 27, no. 7, 2009.

- [27] F. Baccelli and B. Błaszczyszyn, “Stochastic geometry and wireless networks: Volume II Applications,” *Foundations and Trends® in Networking*, vol. 4, no. 1–2, pp. 1-312, 2010.
- [28] G. Zhang, Y. Li, and T. Lin, “Caching in information centric networking: A survey,” *Computer Networks*, vol. 57, no. 16, pp. 3128-3141, 2013.
- [29] Y. Wang, Z. Li, G. Tyson, S. Uhlig, and G. Xie, “Design and evaluation of the optimal cache allocation for content-centric networking,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. 65, no. 1, pp. 95-107, 2016.
- [30] C. Fang, F. R. Yu, T. Huang, J. Liu, and Y. Liu, “A Survey of Green Information-Centric Networking: Research Issues and Challenges,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1455-1472, 2015.
- [31] C. Fang, F. R. Yu, T. Huang, J. Liu, and Y. Liu, “A survey of energy-efficient caching in information-centric networking,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 11, pp. 122-129, 2014.
- [32] I. Abdullahi, S. Arif, and S. Hassan, “Survey on caching approaches in Information Centric Networking,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 56, pp. 48-59, 2015.
- [33] H. Liu, Z. Chen, X. Tian, X. Wang, and M. Tao, “On content-centric wireless delivery networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 118-125, 2014.
- [34] E. Bastug, M. Bennis, and M. Debbah, “Living on the edge: The role of proactive caching in 5G wireless networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 8, pp. 82-89, 2014.
- [35] X. Wang, M. Chen, T. Taleb, A. Ksentini, and V. Leung, “Cache in the air: exploiting content caching and delivery techniques for 5G systems,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 131-139, 2014.
- [36] C. Yang, Y. Yao, Z. Chen, and B. Xia, “Analysis on cache-enabled wireless heterogeneous networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 1, pp. 131-145, 2016.
- [37] S. Tamoor-ul-Hassan, M. Bennis, P. H. Nardelli, and M. Latva-Aho, “Caching in wireless small cell networks: A storage-bandwidth tradeoff,” *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 6, pp. 1175-1178, 2016.
- [38] M. Gregori, J. Gómez-Vilardebó, J. Matamoros, and D. Gündüz, “Wireless content caching for small cell and D2D networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 5, pp. 1222-1234, 2016.

- [39] M. A. Maddah-Ali and U. Niesen, "Fundamental limits of caching," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 60, no. 5, pp. 2856-2867, 2014.
- [40] N. Golrezaei, K. Shanmugam, A. G. Dimakis, A. F. Molisch, and G. Caire, "Femtocaching: Wireless video content delivery through distributed caching helpers," in *INFOCOM, 2012 Proceedings IEEE*, 2012, pp. 1107-1115.
- [41] D. C. Chen, T. Q. Quek, and M. Kountouris, "Backhauling in heterogeneous cellular networks: Modeling and tradeoffs," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 6, pp. 3194-3206, 2015.

Abstarct

Content caching at small base stations and around users is a promising and efficient way to reduce the effects of traffic growth on wireless networks. In this thesis, we focus on performance analysis of content caching in the two-tier heterogeneous cellular network. A heterogeneous cellular network is including the set of macro base stations and small base stations with different transmission power levels, the main purpose of which is to reduce the distance between users and base stations, as well as increase the speed and the probability of successful access to the content. In this thesis, the base stations are distributed according to the Poisson point process and user requests are based on content popularity, which is modeled according to the Zipf distribution. The innovation of proposed system model is the cooperation between base stations, in order to deliver the content to the user. In the other words, the Applicant user will never connect directly to the macro base station and the content is always provided to the user via the small base station. Therefore, in order to performance analysis of proposed system model, we obtain the average outage probability in a closed form. Also, assuming that the communication between the network nodes is based on the automated repeat request method, we obtain the average delay experienced by the user in a successful transmission of content in a closed form. Finally, using the obtained simulation results in the proposed system model, we illustrate that by increasing the popularity of content and also increasing the density of small base stations, the average outage probability and average delay experienced by user decreases.

Keyword: content caching, heterogeneous cellular network, Poisson point process, Zipf distribution, average outage probability, automatic repeat request, average delay



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical Engineering and Robotic

M.Sc. Thesis in Communication Systems Engineering

**Performance Analysis of Content Caching in Fifth Generation
Wireless Heterogeneous Networks**

By:

Farshad Rostami Ghadi

Supervisor:

Dr Mohammad Reza Javan

July 2017