تمرین برنامه نویسی شماره ۲

عنوان: پروژه ارزیابی کارایی شبکه محلی بی‌سیم

درس: شبکه‌های کامپیوتری

استاد راهنما: دکتر ناصر یزدانی[۱]

مسئول دستیاران: کاظم عیارزاده[۲]

دستیاران آموزشی: محمد سپهر بازرگان[۳]، سپهر جمالی[۴]

نیمسال دوم سال تحصیلی ۰۵-۱۴۰۴

[۱] نشانی پست الکترونیکی: yazdani@ut.ac.ir
[۲] نشانی پست الکترونیکی: ayarzadeh.km@ut.ac.ir
[۳] نشانی پست الکترونیکی: msepehr.bazargan@ut.ac.ir
[۴] نشانی پست الکترونیکی: sepehr.jamali@ut.ac.ir

فهرست مطالب

هدف پروژه ۳
فاز صفر: نصب ns-3 ..... ۳
فاز یک: پیاده‌سازی و شبیه‌سازی پروتکل Wi-Fi 5 (استاندارد IEEE 802.11ac) در محیط ns-3 ..... ۵
فاز دو:شبیه‌سازی فناوری‌های جدید Wi-Fi 6 (استاندارد IEEE 802.11ax) MU-MIMO و OFDMA ۸
فاز سه: پیاده‌سازی مکانیزم UORA از استاندارد IEEE 802.11ax در ns-3 ..... ۹
فاز چهار: (امتیازی) ۱۱
گزارش ۱۱
معیارهای نمره‌دهی ۱۱
نحوه تحویل ۱۲

هدف پروژه

این پروژه با هدف شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد فناوری Wi-Fi 6 (استاندارد IEEE 802.11ax) در محیط شبیه‌سازی ns-3 طراحی شده است. در این راستا، یک توپولوژی شبکه مشخص به‌عنوان سناریوی آزمایش در نظر گرفته می‌شود و رفتار شبکه تحت این استاندارد مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از پیاده‌سازی سناریو، معیارهای کارایی (Performance Metrics) نظیر گذردهی (Throughput)، تأخیر (Delay)، نرخ از دست رفتن بسته‌ها (Packet Loss) و دیگر متریک‌ها اندازه‌گیری و تحلیل می‌شوند. هدف نهایی پروژه، درک عمیق‌تر از ویژگی‌ها و بهبودهای ارائه‌شده توسط Wi-Fi 6 و ارزیابی تأثیر آن‌ها بر عملکرد شبکه در شرایط مختلف است. این پروژه دارای سه فاز - و فاز چهارم امتیازی - می‌باشد.

فاز صفر: نصب ns-3

برای نصب ns3 به سیستم Linux-based نیاز خواهید داشت. البته روی سیستم‌های دیگر نیز کار می‌کند ولی برخی مشکلاتی که در آن سیستم‌ها پیش می‌آید که در Linux بسیار کمتر رخ می‌دهد. برای دریافت پکیج‌های لینوکس می توانید از میرورهای داخلی استفاده کنید.

ابتدا باید پکیج های موردنیاز را مانند زیر نصب کنید:

```
sudo apt update
sudo apt upgrade -y
sudo apt install -y\
  gcc g++ python3 python3-dev python3-setuptools python3-pip\
  git mercurial qt5-default pkg-config sqlite3\
  python3-pygraphviz python3-pybind11 python3-pygccxml\
  castxml cmake libc6-dev libc6-dev-i386 gdb\
  libgtk-3-dev vtun lxc\
  libsqlite3-dev libxml2 libxml2-dev libxslt1-dev\
  libboost-all-dev\
  libssl-dev\
  wget unzip
```

سپس فایل ns3 قرار داده شده روی ایلرن را دانلود و اکسترکت کنید و داخل پوشه ns-allinone-3.xx فایل build.py را اجرا کنید.

نکاتی پیرامون اجرای کد در محیط ns-3

- ابتدا اطمینان حاصل کنید که در پوشه ns3-3.xx قرار دارید یا میتوانید با

```
echo "export PATH=$PATH:$HOME/ns-allinone-3.41/ns-3.41/build" >> ~/.bashrc
source ~/.bashrc
```

ns-3 را به PATH سیستم اضافه کنید تا از هر مسیر قابل اجرا باشد.

- فایل های کد خود را درون پوشه scratch با پسوند .cc قرار دهید.
- برای اجرای کد از دستور زیر استفاده کنید. (فرض کنید فایلی که میخواهیم اجرا کنیم filename.cc می باشد.)

```
./ns3 build
./ns3 run filename
```

توجه داشته باشید که پس از هر تغییر در کد، لازم است ابتدا پروژه را بیلد کنید و سپس اجرا نمایید. همچنین در دستور run نباید پسوند .cc را وارد کنید.

فاز یک: پیاده‌سازی و شبیه‌سازی پروتکل Wi-Fi 5 (استاندارد IEEE 802.11ac) در محیط ns-3

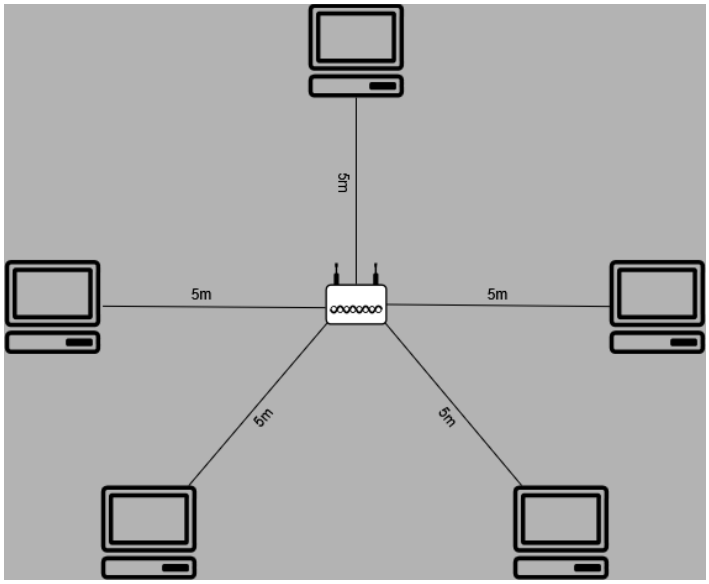
در این بخش با پیاده سازی لایه های شبکه طبق توپولوژی ارائه شده در محیط ns-3، عملکرد Wi-Fi 5 را با متریک‌های ارائه شده بررسی میکنیم.

هدف

هدف از این فاز، ایجاد یک سناریوی پایه (Baseline) برای اندازه‌گیری و مقایسه عملکرد شبکه در مراحل بعدی پروژه است، به‌طوری‌که بتوان تأثیر قابلیت‌ها و بهبودهای معرفی‌شده در Wi-Fi 6 را به‌صورت دقیق ارزیابی کرد. در این فاز با نحوه تعریف توپولوژی، پیکربندی نودها و جمع‌آوری معیارهای کارایی آشنا می‌شوید. خروجی این فاز شامل پیاده‌سازی صحیح سناریو با پروتکل Wi-Fi 5 و استخراج متریک‌های کلیدی مانند گذردهی، تأخیر و نرخ از دست رفتن بسته‌ها خواهد بود که به‌عنوان مبنای تحلیل در فازهای بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

توپولوژی شبکه

در این پروژه، شبکه به‌صورت توپولوژی ستاره‌ای (Star Topology) پیاده‌سازی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که یک اکسس پوینت (Access Point) در مرکز شبکه قرار گرفته و پنج ایستگاه (Station) در اطراف آن مستقر می‌شوند. تمامی ایستگاه‌ها در فاصله‌ای یکسان از اکسس‌پوینت قرار دارند و در طول زمان شبیه‌سازی دارای موقعیت ثابت هستند. هر یک از ایستگاه‌ها تنها به اکسس‌پوینت متصل بوده و هیچ‌گونه ارتباط مستقیمی میان ایستگاه‌ها برقرار نمی‌شود؛ به‌طوری‌که تمامی تبادلات داده در شبکه، صرفاً از طریق اکسس‌پوینت انجام می‌گیرد. در این مرحله شما فقط نودها را طبق تعریف قرار می‌دهید و در مراحل بعدی (پیاده سازی مک) نقش هر نود را به آن اختصاص می‌دهید.



شکل ۱: توپولوژی ستاره‌ای شبکه

لایه فیزیکی (Physical Layer)

پس از پیاده‌سازی توپولوژی و تعیین موقعیت نودها، لازم است در لایه فیزیکی ارتباط میان آن‌ها برقرار شود. در صورت عدم استفاده از این لایه، ارتباطات بی‌سیم رفتار واقع‌گرایانه‌ای نخواهند داشت و انتقال داده‌ها به‌صورت ایده‌آل و بدون در نظر گرفتن شرایط محیطی انجام می‌شود. بهره‌گیری از لایه فیزیکی باعث می‌شود اثر فاصله بین نودها بر کیفیت سیگنال لحاظ گردد، احتمال بروز برخورد (Collision) میان ارسال‌ها وجود داشته باشد، از دست رفتن بسته‌ها به‌صورت واقع‌بینانه شبیه‌سازی شود و در نتیجه متریک‌های ارزیابی قابل تحلیل باشند. همچنین در این پیاده‌سازی، تمامی نودها باید از یک پیکربندی مشترک در لایه فیزیکی استفاده کرده و به یک کانال بی‌سیم یکسان متصل شوند تا یک محیط انتقال مشترک ایجاد گردد.

پیاده سازی مک (MAC)

مک وظیفه تعیین قوانین دسترسی به محیط بی‌سیم را بر عهده دارد و در این بخش از پروژه باید بر اساس استاندارد Wi-Fi 5 (802.11ac) تنظیم گردد تا رفتار شبکه با مشخصات این استاندارد منطبق باشد. در این مرحله، مک به‌صورت مجزا برای ایستگاه‌ها و اکسس پوینت پیکربندی می‌شود. در سمت ایستگاه‌ها، مک به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که هر نود به‌عنوان یک کلاینت وای‌فای عمل کند و به یک SSID مشخص متصل شود؛ در سمت اکسس‌پوینت، مک به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که نود نقش AP را بر عهده بگیرد. همچنین ضروری است تمامی نودها از SSID یکسان استفاده کنند تا امکان اتصال موفق میان ایستگاه‌ها و اکسس‌پوینت فراهم شود. این لایه مکانیزم‌های کلیدی مانند CSMA/CA برای دسترسی به کانال، زمان‌بندی ارسال، و مدیریت برخوردها را نیز فراهم می‌کند که نقش اساسی در عملکرد صحیح و واقع‌گرایانه شبکه دارند.

مدل تحرک (Mobility Model)

در شبیه‌سازی انجام‌شده در محیط ns-3، استفاده از مدل تحرک به‌منظور تعیین موقعیت دقیق نودها و نحوه تغییر (یا عدم تغییر) آن‌ها در طول زمان امری ضروری است. هرچند مطابق توپولوژی تعریف‌شده، نودها در این سناریو دارای جابجایی نیستند، اما مشخص‌کردن صریح این موضوع از طریق انتخاب یک مدل تحرک مناسب برای عملکرد صحیح لایه فیزیکی الزامی است. در این راستا، برای تمامی نودها از مدل ConstantPositionMobilityModel استفاده می‌شود تا موقعیت آن‌ها در طول کل زمان شبیه‌سازی ثابت باقی بماند .بر این اساس، اکسس‌پوینت مطابق توپولوژی در مرکز مختصات و بدون تحرک قرار داده می‌شود. سپس پنج ایستگاه پیرامون آن و در فاصله‌ای ثابت برابر با ۵ متر، با توزیع یکنواخت روی یک دایره مستقر می‌گردند.

لایه شبکه (Network Layer)

در این مرحله، با استفاده از Internet Stack در شبیه‌ساز ns-3 ، یک استک کامل TCP/IP بر روی تمامی نودها نصب می‌شود تا امکان استفاده از قابلیت‌های لایه شبکه فراهم گردد. این استک شامل پروتکل‌هایی نظیر IPv4 و ARP بوده و بستر لازم برای اجرای پروتکل‌های لایه انتقال را مهیا می‌کند. پس از نصب استک، به هر نود یک آدرس IP یکتا در یک شبکه مشخص تخصیص داده می‌شود؛ به طوری که تمامی نودها در یک Subnet مشترک قرار می‌گیرند. یکی از راه‌های تخصیص IP این است که به اکسس پوینت آیپی xxx.xxx.xxx.0 و به نودهای بعدی آیپی xxx.xxx.xxx.1 تا آخرین نود، داده شود.

ارسال داده

در این بخش باید پکت های UDP از ایستگاه ها به اکسس پوینت ارسال شوند. ابتدا باید یک UdpEchoServer بسازید سپس آن را روی AP نصب کنید تا سرور توانایی ارسال و دریافت پکت داشته باشد. سپس سرور را از لحظه صفر شروع کرده و در زمان خاتمه سیمولیشن (۱۰ ثانیه) متوقف شود. سپس برای هر Station یک UdpEchoClient بسازید و بازه ارسال پکت را روی ۰.۵ ثانیه قرار دهید و سایز پکت برای STA های اول و سوم و پنجم برابر ۱۰۲۴ بایت و STA های دوم و چهارم برابر ۵۱۲ بایت قرار دهید و روی Station های متناسب نصب کنید. کلاینت‌ها نیز مانند سرور از لحظه صفر شروع به ارسال داده میکند و در زمان خاتمه سیمولیشن (۱۰ ثانیه) متوقف شوند.

قبل از اجرای برنامه با استفاده دستور زیر:

```
export NS_LOG=UdpEchoClientApplication=info:UdpEchoServerApplication=info
```

لاگ های مربوط به ترافیک UDP را فعال کنید تا از صحت اتصال نودها اطمینان حاصل شود.

متریک‌های ارزیابی

- مقادیر گذردهی و تاخیر را به ازای هر جریان (flow) به دست آورید. (منظور از flow ارتباط هر یک از STA ها با AP می باشد.)
- مقادیر گذردهی میانگین و تاخیر میانگین را به دست آورید.
- Jain’s Fairness Index را حساب کنید.

این شاخص میزان دسترسی STA ها به AP را مشخص میکند.

$$J = \frac{(\sum_{i=0}^{4} Throughput_i)^2}{5 \times \sum_{i=0}^{4} Throughput_i^2}$$

برای محاسبه این مقادیر می‌توانید از کتابخانه ns3/flow-monitor-module.h استفاده کنید.

- پارامتر نویز را بیشتر کنید و دوباره مقادیر ارزیابی بالا را به دست آورید.

فاز دو: شبیه‌سازی فناوری‌های جدید Wi-Fi 6 (استاندارد IEEE 802.11ax) MU-MIMO و OFDMA

در این فاز از پروژه به پیاده سازی سناریو دقیقا مشابه با فاز قبلی اما با پرتوکل Wi-Fi 6 (استاندارد IEEE 802.11ax) می‌پردازیم.

هدف

هدف پیاده‌سازی و تحلیل عملکرد OFDMA و MU-MIMO در استاندارد IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) در محیط شبیه‌سازی ns-3 می‌باشد. این فاز بیشتر از پیاده سازی، بر روی مقایسه پرفورمنس متریک‌های بررسی شده در دو فاز با یکدیگر است. شما باید با ذکر دلیل علت تغییر و یا عدم تغییر پرفورمنس در استفاده از پروتوکل Wi-Fi 6 و پروتوکل Wi-Fi 5 را در گزارش بیاورید.

پیاده‌سازی

در این بخش با پیاده سازی لایه های شبکه طبق توپولوژی ارائه شده در محیط ns-3، عملکرد Wi-Fi 6 را با متریک های ارائه شده بررسی میکنیم و سپس با نتایجی که از فاز قبلی و پیاده سازی با Wi-Fi 5 داشتیم، مقایسه می‌کنیم. توجه داشته باشید که از OFDMA و MU-MIMO در استاندارد IEEE 802.11ax استفاده کنید. با استفاده از SetRemoteStationManager مطمئن شوید که DataMode و Control Mode روی MCSهای مناسب قرار گرفته‌اند. تفاوت DataMode و Control Mode را بیان کنید و نقش MCS را در آن دو بررسی گنید. (جهت مطالعه بیشتر درمورد MCSها، کاربرد آنها و همینطور مقدار استاندارد استفاده شده برای Wi-fi 6 مطالعه کنید)

فاز سه: پیاده‌سازی مکانیزم UORA از استاندارد IEEE 802.11ax در ns-3

در این فاز، هدف پیاده‌سازی و تحلیل عملکرد UORA در استاندارد IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) در محیط شبیه‌سازی ns-3 می‌باشد. برخلاف دو فاز قبلی که به‌عنوان سناریوی پایه با Wi-Fi 5 و مکانیزم‌های اولیه Wi-Fi 6 در نظر گرفته شد، در این مرحله قابلیت‌های پیشرفته Wi-Fi 6 از جمله موارد زیر بررسی قرار می‌گیرند:

- OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
- UORA (Uplink OFDMA Random Access)
- MU-EDCA (Multi-User Enhanced Distributed Channel Access)
- BSRP (Buffer Status Report Polling)

هدف

هدف اصلی این فاز، درک عمیق نحوه تخصیص منابع (RU)، دسترسی تصادفی در uplink، و تأثیر این مکانیزم UORA بر معیارهای کارایی شبکه است. در این فاز با توپولوژی و پیکربندی جدید نودها و تفاوت‌های نحوه دسترسی به منابع آشنا می‌شوید. خروجی این فاز شامل پیاده‌سازی صحیح سناریوی آپ‌لینک با پروتکل Wi-Fi 6 و استخراج متریک‌های کلیدی مانند گذردهی، تأخیر و نرخ از دست رفتن بسته‌ها در مقایسه با روش‌های دسترسی قبلی خواهد بود.

توپولوژی شبکه

در این فاز، توپولوژی مشابه فازهای قبل به‌صورت Star Topology در نظر گرفته می‌شود. یک Access Point در مرکز و چندین Station (مثلاً ۴۰ نود) در اطراف. برخلاف فاز قبل فاصله نودها تصادفی بین minDistance و maxDistance است. این موضوع باعث تنوع در SINR می‌شود که بررسی عملکرد UORA را به شرایط واقعی‌تر نزدیک می‌کند. برای واقعی‌تر شدن شرایط شبکه بهتر است که ارتفاع Access Point و Station ها را نیز تعریف کنید.

لایه فیزیکی (Physical Layer)

در این فاز از مدل پیشرفته‌تر لایه فیزیکی SpectrumWifiPhy (فرکانس 5 GHz با پهنای باند مثلاً 40 MHz و Guard Interval ۴۰۰ یا ۸۰۰ نانوثانیه) برای شبیه‌سازی دقیق‌تر کانال استفاده می‌شود. همچنین پارامترهای مهم دیگری که باید مشخص کنید شامل توان ارسال (TxPowerStart / End)، نرخ مدولاسیون (MCS) خواهد بود. تأثیرات این پارامترها بر throughput و SINR و کارایی OFDMA بیان کنید.

لایه MAC (Wi-Fi 6)

در این مرحله، MAC بر اساس استاندارد 802.11ax تنظیم می‌شود. AP به‌عنوان ApWifiMac، STA به‌عنوان StaWifiMac و استفاده از SSID مشترک. تفاوت اصلی با Wi-Fi 5 این است که در Wi-Fi 6 چندین STA می‌توانند همزمان ارسال کنند (OFDMA). همچنین در اینجا دسترسی تصادفی بر خلاف فاز قبل که فقط OFDMA بود از طریق UORA انجام می‌شود.

مکانیزم BSRP و UORA

برای فعال‌سازی UL OFDMA (اجازه ارسال همزمان چند STA) باید enableUlOfdma = true کنید. برای UORA باید مقدار nRaRus را تعیین کنید. همچنین توضیح دهید که این پارامتر چه چیزی را مشخص می‌کند و تاثیر مقادیر مختلف آن بر گذردهی را با شبیه‌سازی در نمودار رسم کنید. مقدار Central RU را UseCentral26TonesRus قرار دهید. همچنین توضیح کاملی در مورد تُن‌ها بدهید و کم یا زیاد بودن آن را تحلیل کنید. مکانیزم BSRP را با enableBsrp فعال کنید و آن را به طور کامل با یک مثال scheduling توضیح دهید.

مدل تحرک (Mobility Model)

همه نودها مانند فازهای قبلی از مدل ConstantPositionMobilityModel استفاده می‌کنند. اما این بار موقعیت STAها به‌صورت تصادفی تعیین می‌شود. تأثیر فاصله بر SINR و throughput را توضیح دهید.

لایه شبکه (Network Layer)

در این مرحله نیز Internet Stack روی همه نودها نصب می‌شود. آدرس‌دهی IPv4 انجام می‌شود. و تمام نودها در یک subnet مشترک هستند.

تولید ترافیک (Traffic Generation)

در این سناریو از UDP Client/Server استفاده می‌شود. سمت AP از PacketSink برای دریافت داده و برای هر STA یک UDP Client استفاده می‌شود. پارامترهای ارسال داده به AP، Packet Size مثلاً ۹۳ بایت، Interval مثلاً 5 ms و Start Time تصادفی (برای جلوگیری از همزمانی) باشد تا شروع تصادفی باعث کاهش collision و واقعی‌تر شدن سناریو می‌شود. شروع تصادفی باعث کاهش collision می‌شود یا افزایش؟ چرا؟

جمع‌آوری آمار (Tracing)

برای تحلیل دقیق، از traceها استفاده می‌شود. برای SINR با استفاده از callback:SinrTrace این کار را انجام دهید. برای هر STA مجموع SINR و تعداد beaconها جمع آوری شود. دریافت packet توسط RxTraceWithAddressParam انجام شود. اطلاعات ثبت‌شده باید شامل تعداد بایت دریافتی، delay هر packet، زمان ارسال و دریافت و MAC فرستنده باشد.

Flow Monitor

برای تحلیل حرفه‌ای تر از FlowMonitor کنید. متریک‌های Throughput، Delay، Packet Loss را گزارش کنید. همچنین زمان شبیه سازی را Simulator::Run() روی ۱۰ ثانیه تنظیم کنید.

فاز چهار: (امتیازی)

در این فاز که به صورت امتیازی در نظر گرفته شده است سعی کنید از روش‌ها و فناوری های جدید زیر در فاز ۳ ادغام کنید و از کارایی شبکه ارزیابی داشته باشید:

- OBO counter
- back-off countdown procedure
- collision resolution
- busy tone arbitration
- Multi-Link Operation
- target wake time
- Reinforcement Learning Dynamic OCW

گزارش

علاوه بر کد، هر گروه باید یک گزارش نیز تحویل دهد. این گزارش باید به صورت PDF باشد و شامل بخش‌های زیر باشد:

- توضیح معماری و طراحی
- توضیح پروتکل‌ها و پارامترها
- توضیح کامل مفهوم‌های استفاده‌شده
- نحوه اجرا هر قسمت به همراه اسکرین‌شات از اجرای برنامه
- پاسخ به سوالاتی که در قسمت‌های مختلف آمده
- تحلیل نتایج و رسم جداول و نمودارهای خروجی
- چالش‌ها و مشکلاتی که در حین پیاده‌سازی داشته‌اید

نکته: علاوه بر مقایسه های اصلی یعنی مقایسه فازهای مختلف پروژه با یکدیگر، تا جای ممکن سعی کنید با تغییر پارامترهای مختلف در هر فاز نیز ارزیابی‌های مختلفی از کارایی شبکه به دست آورید و تأثیر آن پارامتر را با کم و زیاد شدن گزارش کنید.

توجه: از آنجا که بیشتر نمره شما به گزارش مربوط می‌شود سعی کنید گزارش را به طور کامل بنویسید و چیزی را جا نیاندازید.

معیارهای نمره‌دهی

- فاز یک: ۳۵ نمره
- فاز دو: ۲۰ نمره
- فاز سه: ۴۵ نمره
- فاز چهار: ۲۵ نمره (امتیازی)

نحوه تحویل

موارد مورد نیاز:

- فایل‌های cc.
- گزارش پروژه
- خروجی‌ها

نکات مهم:

- کدها و فایل‌ها باید ساختارمند و خوانا باشد
- پروژه به صورت گروهی (حداکثر ۲ نفره)
- هرگونه کپی‌برداری باعث حذف نمره خواهد شد
- تحویل تا تاریخ ۱ خرداد ۱۴۰۵
- هیچ گونه تحویل با تأخیر پذیرفته نمی‌شود

موفق باشید