سال دوازدهم، شماره‌های ۴۳ و ۴۴، بهار و تابستان ۱۳۹۹
صفحات: ۱۳۳-۱۴۲

دو فصلنامه علمی
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

بهبود کارایی سازوکارهای کنترل نرخ مبتنی برکاوش به کمک دسته-بندی: ارزیابی بر روی بستر آزمایشی شبکه‌های بی‌سیم محلی پرسرعت

علی قالی‌باف* محمد نصیری** محمدحسن داعی* مهدی سخائی‌نیا***

* دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی فناوری اطلاعات، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

** دانشیار گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

*** استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۴

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

فناوری MIMO در شبکه‌های محلی بی‌سیم، امکان استفاده از طیف متنوعی از نرخ‌های ارسال را فراهم می‌آورد. به‌منظور بهبود کارایی پیمانه کنترل نرخ، اطلاعات آماری در مورد تاریخچه و ضعیت و میزان ا ستفاده از هر نرخ ار سال در لایه MAC نگهداری می شود تا به تعیین نرخ ارسال بسته‌های آتی کمک نماید. بااین‌وجود، تنوع زیاد نرخ‌های ارسال در استانداردهای 802.11n و 802.11ac هزینه سربار زیادی را برای به‌روزرسانی این اطلاعات تحمیل می‌کند. در این مقاله، برای کاهش فضای حالت نرخ‌های ارسال و به‌روز نگه‌داری توأمان آمار همه آن‌ها، روشی برای دسته‌بندی نرخ‌ها ارائه شده است به‌نحوی‌که هنگام ارسال یک بسته با نرخ ارسال مشخص، اطلاعات آماری مربوط به همه نرخ‌های ار سالی که در همان د سته قرار می‌گیرند، به‌روز شود. درنتیجه، آمار و ضعیت تعداد بی‌شتری از نرخ‌های ار سال حتی باوجود ارسال تعداد کمی بسته‌های داده می‌تواند به‌روز شود. سازوکار پیشنهادی در محیط هسته لینوکس پیاده‌سازی و عملکرد آن را تحت شرایط مختلف در یک بستر آزمایشی که در آزمایشگاه پژوهشی خود راه‌اندازی نموده‌ایم، ارزیابی گردید. نتایج نشان می‌دهد که روش پی شنهادی ازنقطه‌نظر گذرداد و تعداد ار سال‌های موفق از سازوکار Minstrel-HT به‌عنوان روش پیش‌فرض لینوکس عملکرد بهتری دارد.

واژگان کلیدی: نرخ کنترل ار سال، شبکه‌های بی سیم محلی پر سرعت، بستر آزمایشی، د سته‌بندی نرخ، روش Minstrel HT، روش CRA

۱- مقدمه

شبکه‌های بی‌سیم از رسانه هوا برای انتقال اطلاعات استفاده می‌کنند و به همین دلیل تحت تأثیر عوامل مختلفی ازجمله شکست، نویز و انعکاس قرار می‌گیرند. ازآنجاکه میزان تأثیر این عوامل در محیط‌های مختلف متغیر است؛ لذا شناخت محیط و اتخاذ تصمیم‌های مناسب در شرایط مختلف امری حیاتی است. ازجمله این تصمیم‌ها که تأثیر بسزایی بر روی کارایی شبکه دارد، انتخاب مناسب نرخ ارسال داده است. الگوریتم تطبیق نرخ، بهترین نرخ ار سال فیزیکی را بر ا ساس کیفیت کانال در شرایط مختلف زمانی انتخاب می‌کند[۱]. به‌طورکلی زمانی که کانال شرایط م ساعدی ندارد، ار سال داده‌های با نرخ کم‌تر و مقاوم در برابر عوامل محیطی باوجود زمان انتقال بالا انتخاب معقول‌تری ا ست، همچنین در زمان منا سب بودن شرایط کانال، نرخ‌های با گذرداد بالا بهتر عمل کرده و داده‌ها در زمان کوتاه‌تری ارسال می‌شوند. در شبکه‌های بی‌سیم پرسرعت به علت داشتن مکانیسم‌های مختلف مانند MIMO[1] و همچنین وجود تداخل،

[1] Multiple Input Multiple Output

نویسنده مسئول: مهدی سخائی نیا sakhaei@basu.ac.ir

کانال دارای شرایط بسیار متنوعی است. به همین علت تطبیق نرخ ارسال در این شبکه‌ها از اهمیت بیشتری نسبت به شبکه‌های بی سیم سنتی (802.11a/b/g) برخوردار است و انتخاب نادرست نرخ ارسال می‌تواند منجر به پایین آمدن گذرداد در مقیاس بزرگ‌تری شود[۲]. در مقاله [۳] نشان داده‌شده است که روش‌های موجود تطبیق نرخ در شبکه‌های بی‌سیم سنتی کارایی بالایی در شبکه‌های بی‌سیم پرسرعت ندارند و این نتایج منجر به تحقیقات گسترده‌ای درزمینه‌ی تطبیق نرخ در استانداردهای 802.11n و 802.11ac در سال‌های اخیر شده است[۸-۴].

روش تطبیق نرخ ارسال شامل دو مرحله است: مرحله اول تخمین شرایط کانال و مرحله بعدی انتخاب نرخ ارسال مناسب. برای انتخاب نرخ ارسال مناسب برحسب شرایط کانال روش‌هایی وجود دارد که این روش‌ها به دو دسته کلی حلقه باز و حلقه بسته [۹] تقسیم می شوند. در روش حلقه باز فرستنده به‌تنهایی و با استفاده از مشاهدات و تجربیاتش از کانال، نرخ ارسال داده را مشخص می‌کند. درحالی‌که در روش حلقه بسته از گیرنده در جهت انتخاب نرخ ارسال مناسب کمک گرفته می‌شود.

یکی از روش‌های تطبیق نرخ حلقه باز روش مبتنی بر ارسال بسته کاوش[۲]هست. در این روش فرستنده، پس از ارسال موفق و پیوسته تعداد ثابت بسته در یک نرخ مشخص، تلاش می‌نماید یک بسته با نرخ دیگری ارسال نماید. این بسته را بسته کاوش می‌نامند که اطلاعات وضعیت ارسال مربوط به این نرخ نگهداری می‌گردد. پس از ارسال بسته کاوش، بر اساس وضعیت ارسال مربوط به نرخ‌ها در گذشته از جمله بسته کاوش، در خصوص نرخ ارسال برای بسته‌های بعدی تصمیم‌گیری می‌شود. وضعیت ارسال در روش های مختلف دارای پارامترهای مختلفی مانند گذرداد، نرخ-گمشدگی و ... است. در روش‌های مبتنی بر ارسال بسته کاوش، با ارسال در یک نرخ، فقط اطلاعات وضعیت ارسال مربوط به آن نرخ به‌روزرسانی می‌شود. برای به‌روز نگه‌داشتن تمامی نرخ های موجود، باید در تمامی نرخ ها داده ارسال گردد. به‌عبارت‌دیگر در شبکه‌های بی‌سیم پرسرعت مبتنی بر استاندارد 802.11n که فرستنده داده‌ها را بر اساس یک MCS[۳]مشخص پیکربندی و ارسال می‌کند، نیاز است برای تمامی MCSها ارسال بسته کاوش صورت گرفته تا تمامی نرخ‌ها به‌روز گردد. طبیعتاً تعداد زیاد نرخ‌ها برای ارسال داده سبب ایجاد هزینه سربار زیادی می‌گردد. در روش های موجود به دلیل اجتناب از ارسال در تمامی نرخ‌ها، تعداد زیادی از نرخ‌ها مدت زیادی به‌روز نمی شوند. لذا نتایج آماری آن‌ها، مقادیر قابل‌اطمینانی نبوده و نرخ ارسال انتخابی دارای گذرداد بالایی نیست[۳, ۱۰].

در این مقاله به‌منظور حل عدم به‌روزرسانی تمامی نرخ‌ها، یک سازوکار دسته‌بندی معرفی می شود. با انجام دسته‌بندی فضای حالت نرخ ارسال‌ها کوچک‌تر می‌گردد. برای هر دسته فقط یک بسته کاوش ارسال می‌گردد و وضعیت ارسال برای تمامی MCSهای متعلق به آن دسته بر اساس آن به‌روز می‌گردند. لذا با ارسال بسته‌های کاوش به همان تعداد قبلی می‌توان آمار تمامی نرخ‌ها را به‌صورت تقریبی تخمین زد. انتخاب معیار دسته‌بندی برای حفظ کیفیت خدمات شبکه[۴]از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش معیار گم‌شدگی بسته[۵]برای دسته‌بندی پیشنهاد گردیده است و نشان داده شده است که معیار پیشنهادی، معیار مناسبی برای دسته‌بندی خواهد بود.

اساساً برای ارزیابی روش‌ها و الگوریتم‌های موجود در حوزه شبکه‌های بی سیم می‌توان به سه طریق تحلیل ریاضی، ابزارهای شبیه‌ساز و بستر آزمایشی واقعی عمل کرد. هرچند مقیاس‌پذیری و تحرک ایستگاه‌ها در شبیه ساز بسیار ساده‌تر صورت می‌گیرد ولی با توجه به ویژگی‌های رسانه‌ی بی‌سیم ازجمله وجود نویزهای متنوع، تداخل امواج، نوسانات شرایط کانال، پدیده‌ی محوشدگی، نوسانات موجود در اتصال MIMO و ... نمی‌توان آن را به‌طور دقیق و مطابق با دنیای واقعی مدل‌سازی و شبیه‌سازی کرد؛ حال‌آنکه نتایج به‌دست‌آمده از بستر آزمایشی باوجود پیچیدگی‌های پیاده‌سازی و محدودیت تجهیزات، می‌تواند به نتایج واقعی نزدیک‌تر باشد. به همین دلیل و به‌منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی، تعدادی از روش‌های ارائه‌شده در هسته لینوکس پیاده‌سازی شده و روش پیشنهادی بر روی روش‌های مذکور نیز از لحاظ میزان گذرداد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

نوآوری‌های این مقاله به‌طور خلاصه عبارت‌اند از:

۱. ارائه روشی برای دسته‌بندی نرخ‌های ارسال بسته کاوش بر اساس معیار گمشدگی بسته
۲. سازوکار جدید برای به‌روزرسانی وضعیت نرخ‌های ارسال
۳. پیاده سازی روش ارائه شده بر بستر واقعی به‌منظور ارزیابی روش در محیط واقعی.

در ادامه مقاله، در بخش دوم مفاهیم پایه و قابلیت‌های استاندارد IEEE802.11n بیان می‌شود. در بخش سوم کارهای مرتبط و

[2] Probe packet
[3] Modulation and Coding Scheme
[4] Quality of Service
[5] Packet loss rate

چندین روش تطبیق نرخ برر سی می شود. در بخش چهارم روش پیشـــنهادی به‌طور کامل تشـــریح شـــده و در بخش پنجم نتایج مقایســه و ارزیابی گزارش شـده و تحلیل می‌شـود. بالاخره بخش ششم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها در راستای ادامه پژوهش حاضر می‌پردازد.

۲- مفاهیم پایه

یکی از اصـــلی‌ترین اهداف اســـتانداردهای جدید مانند IEEE 802.11n[۶] و IEEE 802.11ac، افزایش گذرداد شـــبکه اســـت. گذرداد از مشـــخصـــه‌های مهم در فرآهم‌آوری کیفیت خدمات محســـوب می‌شـــود. همچنین بهبود گذرداد در شـــبکه تأثیر مستقیمی بر سایر مشخصه‌های کیفیت خدمات خواهد داشت. در اســـتانداردهای مذکور این افزایش با بهبودهایی در هر دولایه فیزیکی و کنترل د ستر سی به‌د ست‌آمده ا ست. در لایه فیزیکی ســـازوکارهایی مانند MIMO[۷]، ادغام کانال و فاصـــله زمانی محافظ[۸] کوتاه‌تر و در لایه کنترل دســـترســـی ســـازوکارهایی چون ســـاختار تصـــدیق بلوکی[۹] و تجمیع فریم[۱۰] به‌منظور بهبود به کار گرفته‌شـــده است.

در استاندارد IEEE 802.11n با معرفی فناوری MIMO قابلیت ارسال و دریافت چندین جریان داده به‌صورت هم‌زمان در آنتن‌های مختلف ارائه گردید. همچنین در این استاندارد با ادغام دو کانال ۲۰ مگاهرتز و همچنین کوتاه کردن فاصله بین نمادهای حامل داده میزان گذرداد اسمی می‌تواند حداکثر تا ۶۰۰ مگابیت بر ثانیه ارتقا یابد. این تغییرات در لایه فیزیکی به دلیل وجود سربار در ارسال بسته‌ها تا اندازه‌ای توانست گذرداد و تأخیر را بهبود بخشد؛ علاوه بر این، سازوکارهایی نیز در لایه کنترل دسترسی به‌منظور کاهش میزان سربار ارائه شد. مهم‌ترین سازوکار معرفی‌شده تجمیع فریم بود که اقدام به تجمیع چندین فریم و ارسال آن‌ها به‌صورت یکجا می‌کند و سازوکار دیگر تصدیق بلوکی است که چندین بسته‌ی تصدیق ارسال را به‌صورت یکجا و در قالب یک بسته ارسال می‌کند.

با معرفی اســـتاندارد 802.11n از مدولاســـیون و کدگذاری‌های متنوع‌تری به‌منظور تعیین نرخ داده ا ستفاده شد. مدولا سیون و کدگذاری و یا به عبارتی MCS به ترکیب روش‌های مدولاســـیون (مانند BPSK,QPSK) و روش‌های کدگذاری (مانند ۱/۲ و ۵/۶) گفته می شود. در روش پیش‌فرض ه سته لینوکس [۱۱] و روش ارائه‌شده در [۱۲] نرخ‌های موجود بر اساس تعداد جریان‌ها، اندازه فا صله محافظ و پهنای کانال مطابق جدول ۱ به گروه‌های MCS تقسیم شده است.

جدول ۱- گروه‌بندی MCSها [۷]

MCS group	Rate index	Spatial stream number	Modulation & coding type	Channel width (MHz)	GI (ns)	Data rate (Mbps)
0	0	1	BPSK ½	20	800	6.5
	1		QPSK 1/2			13
	2		QPSK ¾			19.5
	3		16-QAM ½			26
	4		16-QAM ¾			39
	5		64-QAM 2/3			52
	6		64-QAM ¾			58.5
	7		64-QAM 5/6			65
1	8	2	BPSK ½	20	800	13
	9		QPSK ½			26
	10		QPSK ¾			39
	11		16-QAM ½			52
	12		16-QAM ¾			78
	13		64-QAM 2/3			104
	14		64-QAM ¾			117
	15		64-QAM 5/6			130
…	…	…	…	…	…	…
11	88	3	BPSK ½	40	400	45
	89		QPSK ½			90
	90		QPSK ¾			135
	91		16-QAM ½			180
	92		16-QAM ¾			270
	93		64-QAM 2/3			360
	94		64-QAM ¾			405
	95		64-QAM 5/6			450

در تمامی روش‌های تطبیق نرخ ارسال ارائه‌شده، فرستنده داده‌ها را بر اســـاس یک MCS مشـــخص پیکربندی و ارســـال می‌کند. به‌طور مثال زمانی که فرســـتنده داده‌ها را در MCS15 ارســـال می‌کند در حقیقت داده‌ها را در دو جریان داده‌ای و با مدولاسیون 64-QAM و کدگذاری ۵/۶، در پهنای باند ۲۰ مگاهرتز و با فاصله بین نمادی ۸۰۰ نانوثانیه ارسال می‌کند.

۳- مروری بر کارهای مرتبط

در ســـال‌های اخیر الگوریتم‌های متعددی با اهداف مختلفی مانند کاهش انرژی و تأخیر و یا اســـتفاده در شـــبکه‌های با مســـافت زیاد[۱۳-۱۵] در زمینه تطبیق نرخ ارســـال ارائه‌شـــده اســـت اما هدف عمومی در تطبیق نرخ ارســـال افزایش گذرداد شـــبکه‌های بی‌سیم محلی است. در سال ۲۰۱۰ پفکیاناکیس و همکارانش[۳] مشـــکلات تطبیق نرخ در 802.11n را بررســـی کردند و متوجه رابطه غیریکنواخت بین نرخ خطای فریم و نرخ بیت در مدهای مختلف MIMO شدند. مبتنی بر همین مشاهده، روش MiRA را پیشـــنهاد دادند. این روش به‌صـــورت زیگزاگ بین مدهای مختلف

[6] Institute of Electrical and Electronics Engineers
[7] Multiple Input Multiple Output
[8] Guard Interval
[9] Block Acknowledgement
[10] Frame Aggregation

MIMO حرکت می‌کند تا نرخ‌هایی را که بیشترین گذرداد را دارند پیدا کند. این روش فقط از تعداد نرخ های محدودی پشتیبانی و استفاده می‌کند. در سال ۲۰۱۳ نیز روشی مشابه و با اندکی تغییر به نام Window-based [۱۶] ارائه شد.

روش Minstrel HT [۱۱] توسعه‌یافته روش Minstrel [۱۷] و الگوریتم پیش‌فرض موجود در اغلب درایورهای بی‌سیم منبع-باز 802.11n از جمله ath9k است. این روش تمامی نرخ‌ها را تا زمان رسیدن به بهترین نرخ به‌صورت کاملاً تصادفی کاوش می‌کند. در ابتدای کار تعدادی از MCSها به‌صورت تصادفی در یک جدول قرار داده شده و کاوش موفق برای هر MCS صورت می‌گیرد. بر اساس اطلاعات وضعیت ارسال در جدول نمونه‌ها، برای هر بسته جهت ارسال، چهار نرخ ارسال مشخص می‌شود و زمانی که نرخی بعد از چند ارسال ناموفق باشد، نرخ بعدی بررسی می‌شود. اولین نرخ مربوط به پیکربندی است که بالاترین میزان گذرداد را داشته باشد. دومین انتخاب نرخی با دومین گذرداد است. سومین گزینه مربوط به نرخی با بالاترین احتمال ارسال موفق بوده و در آخر داده با نرخ پایه ارسال می‌شود. این سازوکار، زنجیره تکرار نامیده می‌شود. در هر بازه‌ی زمانی بهترین نرخ در هر گروه مشخص می‌شود. برخلاف روش Minstrel که ارسال بسته نرخ کاوش به صورت کاملاً تصادفی انتخاب می شد، در این روش بسته‌های کاوش این‌گونه ارسال می‌شود که ابتدا یک نرخ در گروه یک کاوش می‌شود و سپس گروه دو و ... ؛ اما ترتیب انتخاب نرخ داخل هر گروه تصادفی است. در این روش هر ۵۰ میلی‌ثانیه آمار تمامی نرخ‌ها به‌روز می‌شود.

روش CRA [۱۲] مانند Minstrel HT اقدام به ارسال بسته کاوش در نرخ‌های دیگر می‌کند با این تفاوت که کاوش در بین نرخ‌های با گذرداد بالاتر از نرخ ارسال فعلی صورت می‌گیرد. در CRA هر نرخی که در گذشته آمار ارسال موفق بالاتری را داشته باشد از احتمال بالاتری برای ارسال بسته کاوش نیز برخوردار است. مکانیسم روش CRA به این شکل است که یک نرخ جهت ارسال بسته کاوش انتخاب می‌شود، اگر آمار ارسال موفق آن نرخ در بازه‌های زمانی قبلی بالای ۵۰ درصد باشد بسته کاوش در آن نرخ ارسال می‌شود و اگر بین ۱۰ الی ۵۰ درصد باشد آنگاه با احتمال ۵۰ درصد بسته کاوش در آن نرخ ارسال شده و در غیر این صورت با احتمال ۱۰ درصد ارسال می‌شود. روش CRA همچنین برای مواجهه با تغییرات زودگذر کانال از سازوکار تغییر نرخ ارسال قبل از رسیدن به زمان به‌روزرسانی استفاده کرده است. در این حالت اگر نرخی دچار مشکل گردد آنگاه MCS پایین‌تر آن تا رسیدن به انتهای بازه زمانی انتخاب می شود و در هنگام مساعد بودن شرایط کانال نیز در صورت داشتن سابقه مناسب در ارسال، MCS بعدی جایگزین می‌شود.

در مقاله [۱۸] به بررسی اثر نرخ گمشدگی بسته‌ها در عملکرد و کارایی شبکه مدرن 802.11 پرداخته شده است. در این مقاله نشان داده شده است خوشه‌بندی نرخ گمشدگی در کاربردهای مختلف در این شبکه‌ها از جمله تطبیق نرخ باعث افزایش کارایی شبکه می‌گردد.

در L3S [۱۹] از تعداد بسته‌های گم‌شده جهت کاهش نرخ استفاده شده است. این روش مانند روش MiRA با ارسال بسته‌های کاوش هوشمند در گروه‌های مجاور سعی در پیدا کردن و ارسال در بهترین نرخ ممکن را دارد.

گونه‌های جدید نظیر 802.11ac تعداد نرخ‌های ارسال بسیار بیشتری را پشتیبانی نموده و امکان استفاده از نرخ‌های ارسال تا چندین گیگابیت بر ثانیه را فراهم می‌سازد. بنابراین با توجه به گسترش فضای جستجو نرخ‌های ارسال، تلاش بیشتری برای تعیین نرخ ارسال بهینه لازم است. از طرف دیگر اختلاف نرخ ارسال بهینه و غیر بهینه می‌تواند آن‌قدر زیاد باشد که استفاده از یک نرخ ارسال غیر بهینه باعث افت شدید گذرداد کلی شبکه گردد. در [۲۰] ابتدا روشی برای کاهش فضای جستجو و حذف برخی نرخ‌های ارسال باهدف تسریع همگرایی ارائه می‌نماید و سپس الگوریتم انتخاب نرخ ارسال را مبتنی بر نمونه‌برداری تامسون معرفی و کارایی آن را به کمک شبیه‌سازی ارزیابی می‌نماید. چی یو لی و همکاران در [۲۱]، روشی مبتنی بر یادگیری ماشین برای شناسایی خودکار همبستگی بین نرخ ارسال، گذرداد و کیفیت لینک ارائه دادند و برای کاهش فضای جستجو از یک الگوریتم جستجوی نرخ دوسطحی و یک تشخیص‌گر ازدحام بهره می‌برد. کارمکار و همکاران در [۲۲] مسئله پیکربندی خودکار لینک در شبکه‌های 802.11ac را با لحاظ طیف متنوعی از پارامترهای لایه فیزیکی و کنترل دسترسی بررسی نموده‌اند. سپس به کمک یادگیری پویا و منطق فازی و بر اساس میزان بار شبکه و شرایط کانال روشی برای حل آن ارائه داده‌اند.

در [۲۳]، روشی برای انتخاب نرخ ارسال برای شبکه‌های بی‌سیم مش مبتنی بر استاندارد 802.11s معرفی شده است. با توجه به ارتباطات چندگانه در این شبکه‌ها، در انتخاب نرخ ارسال، میزان تصادم بسته‌ها و نیز مسئله انتخاب بهترین مسیر در نظر گرفته شده است.

۴- الگوریتم روش پیشنهادی

ابتدا باید دسته‌بندی MCSها صورت گیرد. همان‌طور که در الگوریتم ۱ نشان داده شده است در بخش پیش‌پردازش و گام اول نرخ گم‌شدگی بسته برای هر MCS محاسبه می‌گردد. برای این منظور باید برای هر MCS به مدت‌زمان مشخصی داده ارسال گردد تا بر اساس آن نرخ گمشدگی محاسبه گردد. این عمل برای تمامی MCSها باید صورت پذیرد. در گام دوم الگوریتم، MCSها بر اساس نرخ گم‌شدگی بسته دسته‌بندی می‌گردند. هر دسته شامل MCSهایی است که فاصله بین نرخ گمشدگی اعضای متعلق به آن دسته کم است. با تعیین دسته‌ها و به دنبال آن انتخاب فاصله مجاز نرخ گمشدگی، MCSها دسته‌بندی می‌گردند. منظور از فاصله مجاز این است که هر دسته یک مرکز دارد و MCSهایی که فاصله آن‌ها از این مرکز کمتر از مقدار مشخصی است در آن دسته قرار می‌گیرند.

سپس روش اصلی تطبیق نرخ ارسال آغاز می‌گردد. در بازه‌های زمانی مشخص نرخ ارسال برحسب شرایط کانال انتخاب می‌گردد. همان‌طور که در الگوریتم ۱ نشان داده شده است، مطابق با گام ۳ در شروع هر بازه زمانی برای هر دسته متوسط نرخ گمشدگی محاسبه می‌گردد(aplroldi). در خلال ارسال داده‌ها مطابق باسیاست روش اصلی(مثلاً زنجیره تکرار در Minstrel HT) ممکن است چندین بار بسته کاوش ارسال گردد. در هر بار ارسال بسته کاوش در یک نرخ مشخص، وضعیت ارسال در آن نرخ به‌روز می‌گردد(گام ۴). در انتهای بازه زمانی و قبل از انتخاب نرخ ارسال جدید، اطلاعات وضعیت ارسال برای تمامی نرخ‌ها به‌روز می‌شود(گام ۵). بدین منظور و مطابق با a تا c در الگوریتم ۱ برای هر دسته i میانگین نرخ گمشدگی جدید محاسبه شده

الگوریتم ۱- الگوریتم روش پیشنهادی

[پیش پردازش]
[گام ۱] محاسبه نرخ گمشدگی بسته، plr، برای ارسال‌ها در هر MCS
[گام ۲] دسته‌بندی MCS بر اساس plr در دسته‌های $C_1 \ldots C_k$

[تکرار انتخاب نرخ ارسال در بازه‌های زمانی مشخص]
[گام ۳] برای دسته iام، C_i، در $C_1 \ldots C_k$ دستورات زیر را تکرار کن
محاسبه متوسط plr برای C_i در $aplrold_i$
...
[گام ۴- در هر بازه زمانی چندین بار بسته کاوش ارسال می‌گردد]
ارسال بسته کاوش بر اساس MCS_x
به‌روزرسانی اطلاعات وضعیت نرخ ارسال از جمله plr مربوط به MCS_x
...
[گام ۵] برای دسته iام، C_i، در $C_1 \ldots C_k$ دستورات زیر را تکرار کن
a) محاسبه متوسط plr برای C_i در aplrnew
b) محاسبه $delta= aplrnew- aplrold_i$
c) به‌روزرسانی plr همه MCSها در Ci به جز MCSx با مقدار delta
...

(aplrnew) و به‌روزرسانی نرخ گمشدگی برای هر MCS در آن دسته(به جز MCSx) با تفاضل میانگین دسته قبل و بعد از ارسال بسته‌های کاوش(delta) انجام می شود. این امر سبب می‌گردد که شیب تغییرات نرخ گمشدگی در دسته‌ها ملایم باشد و میزان تغییرات در نرخ‌هایی که بسته در آن‌ها ارسال می‌شود نسبت به بقیه نرخ‌ها بیش‌تر است.

۴_۱معیار دسته‌بندی

همان‌طور که در بخش‌های قبلی ذکر گردید یکی از اصلی‌ترین اهداف استانداردهای جدید مانند IEEE 802.11n افزایش گذرداد شبکه است. گذرداد از مشخصه‌های مهم در فراهم‌آوری کیفیت خدمات محسوب می‌شود. بنابراین شاخص گذرداد اثربخشی قابل‌ملاحظه‌ای در انتخاب معیار دسته‌بندی خواهد داشت.

در روش های حلقه باز مبتنی بر روش Minstrel HT، برای محاسبه گذرداد از فرمول (۱) استفاده می‌شود[۱۱]:

$$Throughput = P_{success} \times \frac{1}{T} \qquad (۱)$$

که $P_{success}$ نشان‌دهنده میزان موفقیت ارسال هر نرخ در بازه‌های قبلی و T مدت زمان ارسال است که بر اساس فرمول (۲) محاسبه می‌شود:

$$T = T_{normal} + \frac{overhead}{Avg_{AMPDU}} \qquad (۲)$$

که مقدار T_{normal} نشان‌دهنده زمان معمولی ارسال یک بسته در آن نرخ است و میزان $overhead$ برابر با میزان سربار ناشی از ارسال و اندازه Avg_{AMPDU} برابر با اندازه میزان تجمیع فریم است. در روش مدنظر هنگامی‌که گذرداد یک نرخ تغییر می‌کند آنگاه اندازه گذرداد بقیه نرخ‌ها نیز تغییر پیدا می‌کنند. با بالا و پایین بردن اندازه گذرداد در سایر نرخ‌های دسته در هنگام به‌روزرسانی، دیگر فرمول ۱ صحیح نیست چراکه با افزایش و کاهش گذرداد در نرخ‌های دیگر فقط مقدار گذرداد افزایش پیدا کرده و درعین‌حال

مقادیر $P_{success}$ و T که اجزای تشکیل‌دهنده آن هستند بدون تغییر مانده‌اند. بنابراین باید معیار دسته‌بندی یک معیار مستقل بوده تا به‌روزرسانی بر اساس آن معیار و بدون آسیب رساندن به معیارهای دیگر صورت پذیرد.

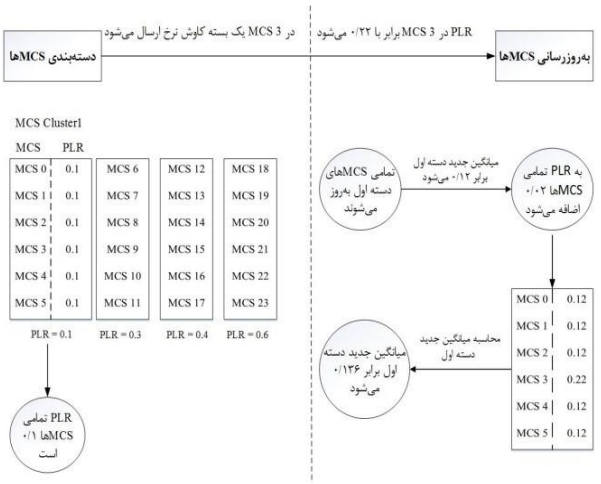
در فرمول۱ مقدار $P_{success}$ مقداری مستقل و غیرقابل تجزیه است چراکه این مقدار به‌صورت کاملاً مستقل از متغیرهای دیگر کیفیت خدمات سرویس و فقط بر اساس میزان موفقیت ارسال بسته‌ها به دست می‌آید. ازاین‌رو معیار نرخ گمشدگی بسته معیار مناسبی خواهد بود.

۴_۲یک مثال

ازآنجاکه مطابق استاندارد و آزمایش‌های صورت گرفته، مقدار فاصله اطمینان تأثیری در میزان اندازه گم‌شدگی بسته ندارد، بنابراین مقدار گم شدگی بسته‌ها در نرخ‌های گروه ۰ تا ۵ برابر با میزان گم‌شدگی نرخ‌های گروه ۶ تا ۱۱ است. با فرض انجام آزمایش در باند فرکانسی ۲۰ مگاهرتز، میزان گم‌شدگی بیست‌وچهار MCS اول در جدول۱ نشان داده شده است.

روند به‌روزرسانی بر اساس شکل ۱ است. در این روش به ازای تفاوت ایجاد شده در میانگین هر دسته، میزان موفقیت نرخ‌های آن دسته نیز تغییر می‌کنند. در این روش با تغییر گم‌شدگی بسته در یک نرخ میزان میانگین گم‌شدگی آن دسته تغییر می‌کند. در روش ارائه‌شده این تفاوت بر تمامی نرخ‌های موجود در آن دسته اعمال شده و پس‌ازآن میانگین مجدد محاسبه می‌شود.

مطابق شکل ۱ در هر دسته شش MCS قرار دارد. میانگین PLR تمامی MCSهای مربوط به دسته اول برابر ۰/۱ است. زمانی که مقدار گم‌شدگی بسته ۳ MCS تغییر کند و به‌اندازه ۰/۱۲ افزایش یابد، آنگاه میانگین جدید نسبت به میانگین قبلی ۰/۰۲ افزایش پیدا می‌کند. این میزان ۰/۰۲ به‌تمامی نرخ های دیگر داخل دسته اضافه‌شده و میانگین جدید بر اساس PLRهای جدید محاسبه می‌گردد که در این مثال اندازه میانگین برابر با ۰/۱۳۶ می‌شود.



شکل ۱- مثالی از روش پیشنهادی

۵- ارزیابی روش پیشنهادی

به‌منظور ارزیابی کارایی، روش پیشنهادی با استفاده از مجموعه Backports در هسته لینوکس پیاده‌سازی شده است. تمامی آزمایش‌ها در بستر آزمایشی و با شرایط واقعی انجام‌شده‌اند. بستر مذکور [۲۴] در آزمایشگاه پژوهشی شبکه در دانشگاه بوعلی سینا راه‌اندازی شده است.

ازآنجاکه پیاده سازی روش پیشنهادی نیازمند تغییر برخی توابع در لایه کنترل دسترسی است، لزوماً بایستی از یک درایور منبع-باز استفاده شود. به همین دلیل، مجموعه Backports را در یک ایستگاه مجهز به سیستم‌عامل لینوکس نصب نموده و کارت شبکه حاوی تراشه بی سیم Atheros AR9580 به همراه درایور متن‌باز ath9k را به آن اضافه نمودیم. این تراشه و درایور مربوط به آن در پژوهش‌های مرتبط با ارزیابی کارایی مکانیسم کنترل دسترسی در شبکه‌های بی‌سیم محلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شایان ذکر است که ازآنجاکه الگوریتم انتخاب بهترین نرخ ارسال بسته در پیمانه mac80211 اجرا می‌شود، کارت‌های شبکه که محصول سازندگان متفاوت هستند، مادامی‌که از این استاندارد پشتیبانی نمایند، تفاوتی در نتایج آزمایش‌ها ایجاد نمی‌شود.

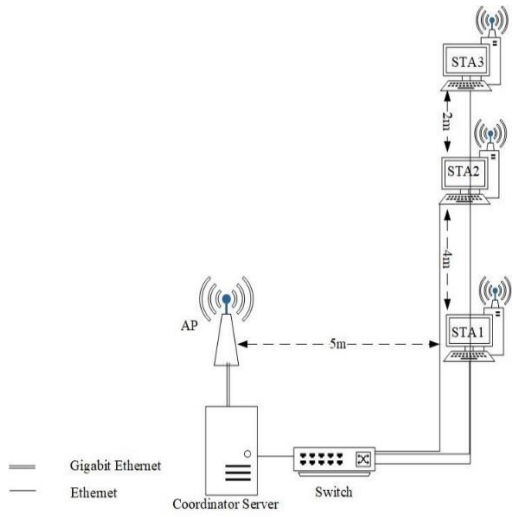
عملکرد روش‌های Minstrel HT و CRA بدون دسته‌بندی نرخ ارسال در [۲۵] باهم مقایسه نموده‌ایم. استفاده از دسته‌بندی MCSها امکان به‌روزرسانی اطلاعات نرخ‌های ارسال را با سربار کمتر و با سرعت همگرایی بیشتر فراهم می سازد. بنابراین برای ارزیابی عملکرد آن بایستی میزان تأثیر آن بر یک مکانیسم کنترل نرخ موجود سنجیده شود. به همین منظور در مقاله عملکرد Ministrel HT (به‌اختصار MHT) با نسخه تغییریافته آن بر اساس روش پیشنهادی (Cluster-MHT) مقایسه شده است. یادآوری می‌گردد که هدف از انجام آزمایش‌ها، مقایسه CRA و Ministrel HT نیست بلکه نسخه اصلاح شده هرکدام

به صورت مجزا با نسخه اصلی آن مکانیسم مقایسه می شود تا تأثیر روش پیشنهادی ارزیابی شود.

مطابق توپولوژی مدنظر در شکل ۲، شبکه و ارتباط‌های موردنیاز در ارزیابی کارایی همانند [۲۴] پیکربندی شده‌اند. علاوه بر شبکه بی سیم محلی، نقطه دسترسی[1] و تمامی ایستگاه‌ها از طریق یک شبکه اترنت به هماهنگ‌کننده[2] متصل شده‌اند. آماده‌سازی، جمع‌آوری اطلاعات و تمامی فرآیند مدیریت و کنترل آزمایش فقط از طریق شبکه اترنت انجام خواهد گرفت. با این عمل، تنها ترافیک موردبررسی از شبکه بی‌سیم عبور کرده و سایر ارتباطات باعث تغییر در شرایط آزمایش نخواهند شد. برای کاهش اختلال از باند فرکانسی ۵ گیگاهرتز استفاده شده و آزمایش‌ها در ساعات نیمه‌شب اجرا شده‌اند [۳]. مشخصات نقطه دسترسی مورد استفاده در مرحله ارزیابی در جدول ۲ آمده است.

مدت‌زمان هر آزمایش ۱۲۰ ثانیه بوده و ۱۰ بار نیز تکرار شده است. پس از انجام آزمایش‌ها، نتایج به‌دست‌آمده با بازه اطمینان ٪۹۵ محاسبه شده‌اند. در شکل ۳ میزان گم‌شدگی بسته در ۳ ایستگاه مدنظر در شکل ۲ نشان داده شده است. هر ایستگاه در تغییر میزان گم‌شدگی بسته روند خاص خود را دارد. ایستگاه STA1 شرایط نسبتاً مطلوبی دارد؛ چراکه میزان گم شدگی بسته در اغلب MCSهای آن میزان قابل قبولی است. ایستگاه STA2 از دو ایستگاه دیگر وضع مطلوب‌تری دارد و در آخر ایستگاه سوم دارای مقدار گم‌شدگی بسته زیاد در MCSهای بالاتر است.

با توجه به میزان گم‌شدگی بسته‌ها در هر لینک اقدام به دسته‌بندی MCSها شده است. میزان فاصله‌ی مجاز برای قرارگیری در یک دسته ۰/۱ در نظر گرفته شده است. نتایج ارزیابی دسته‌بندی نرخ‌ها بر اساس میزان گم شدگی بسته‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.



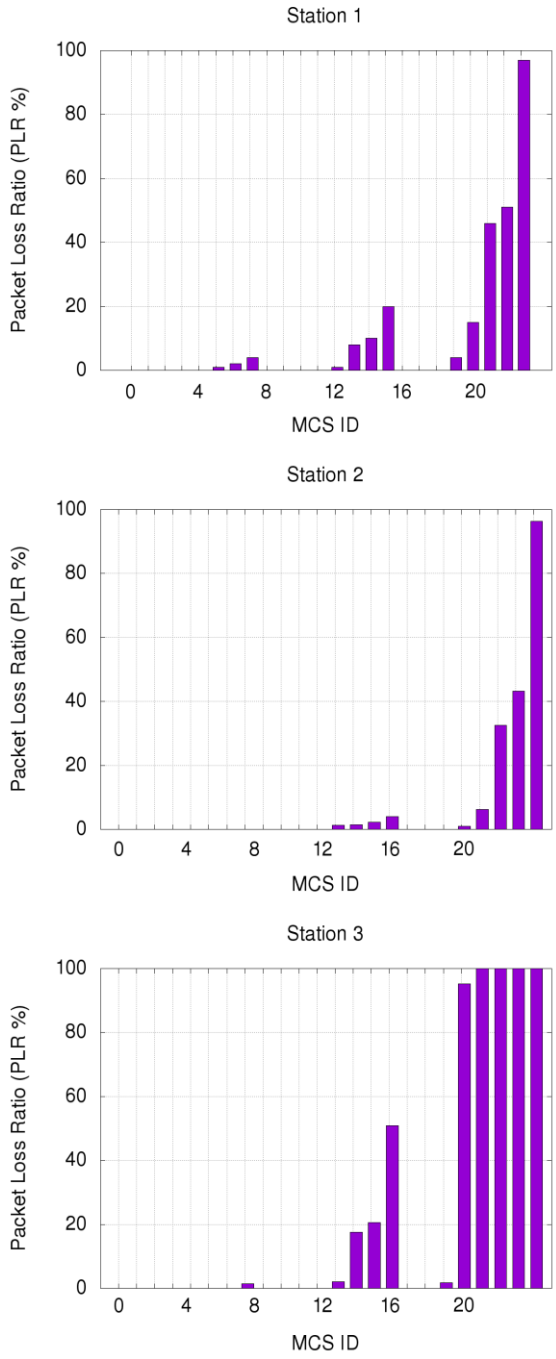
شکل ۲- توپولوژی بستر آزمایش واقعی

جدول ۲- مشخصات نقطه دسترسی مورد استفاده در آزمایش

استاندارد قابل پشتیبانی	IEEE 802.11 a/b/g/n
شماره کانال	149 (5745 MHz) – IR regulatory
عرض کانال	HT20
تراشه بی‌سیم	Atheros AR9580
درایور	ath9k
فناوری MIMO	3×3:3

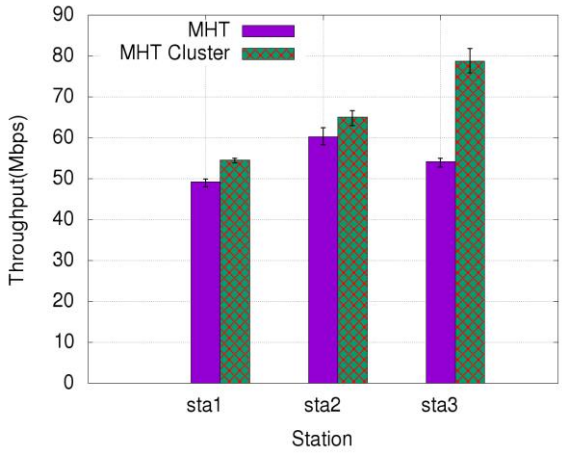
[1] Access Point

[2] Coordinator



شکل ۳- روند تغییر PLR در MCSهای ایستگاه‌های مختلف

با توجه به نتایج آزمایش می‌توان دریافت که روش پیشـــنهادی میانگین گذرداد بالاتری نسبت به روش Minstrel HT به دست آورده اســت که نتایج این آزمایش‌ها در شــکل ۴ قابل مشــاهده هست. به‌طور مثال روش پیشنهادی در ایستگاه اول تا سوم به ترتیب باعث افزایش ۸، ۱۰ و ۴۳ درصــدی گذرداد شــده اســت. نتایج مشخص‌کننده این حقیقت است که در روش Minstrel HT بســیاری از نرخ‌ها مطابق شــرایط کانال به‌روز نیســتند و باعث انتخاب نرخ نامناسب می‌شوند؛ لذا روش پیشنهادی با به‌روزرسانی مداوم تمامی نرخ‌ها موجب انتخاب نرخ مناسب می‌شود.

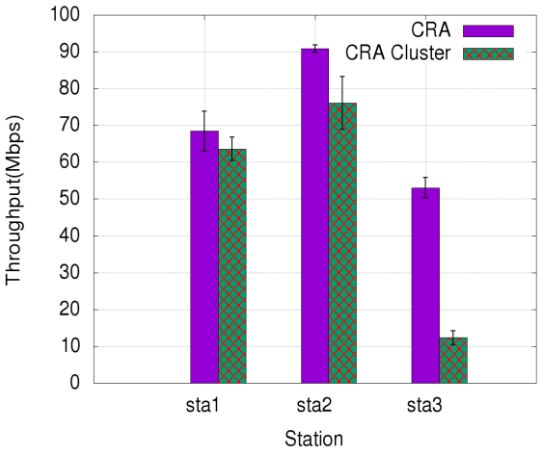


شکل ۴- گذرداد سناریو دسته‌بندی Minstrel HT بر اساس نرخ گم‌شدگی

در روش پیشنهادی به دلیل به‌روزرسانی هم‌زمان اطلاعات آماری همه MCSهای یک دسته، مشابه با ارسال یک بسته در یکی از MCSهای آن دســته به‌روز می‌شــوند لذا نســبت به شــرایط و تغییرات کانال حســاس‌تر و دقیق‌تر عمل می‌کند. در روش‌های حلقه-باز چون بازخوردی از ســمت مقابل دریافت نمی‌گردد؛ لذا باید فرستنده تخمین بروزتری از شرایط کانال داشته باشد. بر همین اساس، نسخه اصلاح شده Minstrel HT، در هر مرحله MCS مناســب‌تری برای ارســال بســته داده انتخاب می‌کند که درنهایت منجر به افزایش گذرداد شبکه می‌شود.

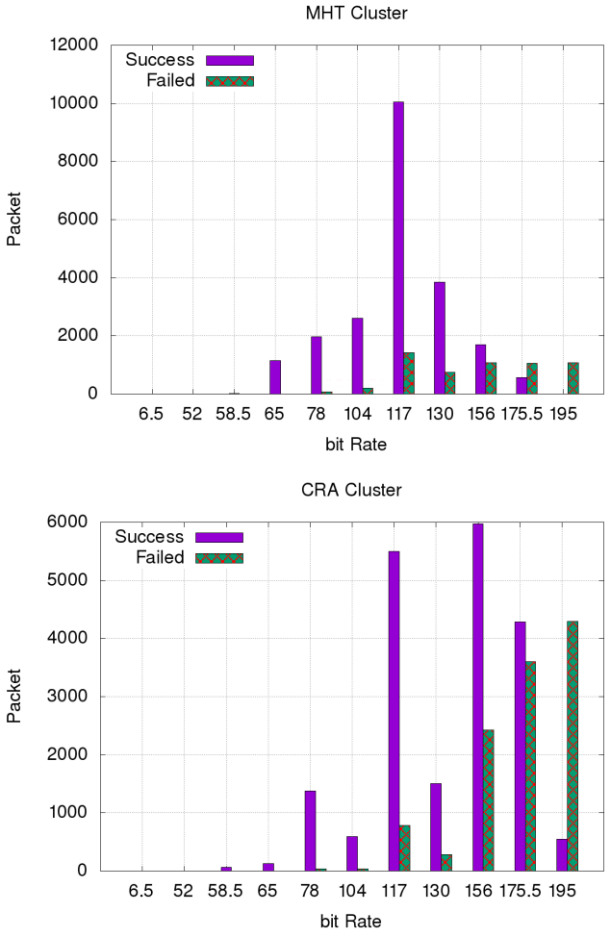
به‌منظور بررســی تأثیر روش دســته‌بندی MCSها بر عملکرد مکانیســم‌های دیگر، ابتدا روش تطبیق نرخ CRA را در هســته لینوکس پیاده‌سازی نمودیم و سپس روش دسته‌بندی پیشنهادی مشابه Minstrel HT را بر روی آن اعمال نمودیم. نتایج حاصل از دسته‌بندی در روش CRA در شکل ۵ قابل‌مشاهده است. شکل ۵ نشــان می‌دهد که ترکیب روش دســته‌بندی ارائه شــده با مکانیســم CRA برخلاف Minstrel HT کارایی مناســبی ندارد. برای بررسی بیشتر موضوع، ابتدا تعداد ارسال‌های موفق و ناموفق را در هر دو روش CRA و Minstrel HT با فعال‌ســازی امکان دسته‌بندی پیشنهادی بررسی می‌کنیم.

نمودار پایینی شکل ۶ نتایج حاصل از روش دسته‌بندی CRA و نمودار بالایی شکل ۶ نتایج مربوط به روش دسته‌بندی Minstrel HT را نشان می‌دهد. تعداد ارسال‌های ناموفق در روش CRA که بخش عمده‌ای از آن را بسته‌های کاوش شامل می شود، بسیار زیاد اســت. علت این امر ماهیت ذاتی روش CRA اســت؛ چراکه بسته‌های کاوش را در نرخ‌های بالاتر ارسال می‌کند. زمانی که در یک دسته MCS، یک بسته‌ی کاوش با موفقیت ارسال می شود، میانگین موفقیت تمامی نرخ‌ها را افزایش می‌دهد.



شکل ۵- گذرداد سناریو دسته‌بندی CRA بر اساس نرخ گم‌شدگی

حال این افزایش ممکن است موجب انتخاب اشتباه نرخ‌های با گذرداد بالا شود. ماهیت روش CRA در کاهش محتاطانه نرخ ارسال این امر را شدت می‌بخشد و درنهایت باعث ارسال بسته‌های ناموفق متعددی در نرخ‌های با گذرداد بالا می‌گردد.



شکل ۶- مقایسه تعداد ارسال‌های موفق و ناموفق در دسته‌بندی‌های مبتنی بر MHT و CRA

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا به بررسی روش‌های حلقه باز و سازوکار انتخاب نرخ جهت ارسال پرداخته شد. در استانداردهای شبکه‌های پرسرعت جدید تعداد نرخ ارسال افزایش پیدا کرده است و از طرفی در روش‌های حلقه باز مبتنی بر تاریخچه ارسال، داشتن آمار تمامی نرخ‌ها امری ضروری است. به‌روزرسانی کامل آمار نرخ‌ها یا با ارسال داده در تمامی نرخ‌ها و یا کوچک کردن فضای حالت امکان‌پذیر است. به‌منظور کاهش فضای حالت جهت به‌روزرسانی آمار تمامی نرخ‌ها، روش دسته‌بندی MCSها بر اساس معیارهای مختلف بررسی شد که معیار گم‌شدگی بسته، معیار مناسبی جهت دسته‌بندی نرخ‌ها ارائه داد.

در ادامه و برای بررسی عملکرد روش دسته‌بندی، الگوریتم CRA بر روی هسته لینوکس پیاده سازی و سپس دسته‌بندی بر روی آن انجام گرفت. روش دسته‌بندی پیشنهادی بر روی روش Minstrel HT تا حداکثر ۴۳ درصد بهبود در گذرداد نسبت به روش بدون دسته‌بندی ارائه داده است. دسته‌بندی نرخ‌ها بر روی الگوریتم CRA موجب کاهش بسیار کارایی در روش CRA شد که این کاهش پس از بررسی نشان‌دهنده نا سازگاری بین روش پیشنهادی در دسته‌بندی و عملکرد روش CRA بود.

در ادامه قصد داریم روشی کارآمد برای زمان‌بندی ارسال بسته‌های کاوش و ترتیب نرخ‌های ارسال مورد استفاده برای ارسال این بسته‌ها را ارائه دهیم و تأثیر آن بر پارامترهای کارایی شبکه نظیر گذرداد و تأخیر انتها به انتها را بر روی بستر ارائه شده بررسی نمائیم.

مراجع

[۱] L. Deek, E. Garcia-Villegas, E. Belding, S.-J. Lee, and K. Almeroth, "A practical framework for 802.11 MIMO rate adaptation," *Computer Networks*, vol. 83, pp. 332-348, 2015.

[۲] L. Kriara and M. K. Marina, "SampleLite: A hybrid approach to 802.11 n link adaptation," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 45, no. 2, pp. 4-13, 2015.

[۳] I. Pefkianakis, Y. Hu, S. H. Wong, H. Yang, and S. Lu, "MIMO rate adaptation in 802.11 n wireless networks," in *Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking*, 2010: ACM, pp. 257-268.

[۴] R. Karmakar, S. Chattopadhyay, and S. Chakraborty, "Dynamic link adaptation for high throughput wireless access networks," in *2015 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommuncations Systems (ANTS)*, 2015: IEEE, pp. 1-6.

[۵] H. Munanzar and T. Y. Arif, "AARF-HT: Adaptive auto rate fallback for high-throughput IEEE 802.11 n WLANs," *International Journal of Communication Networks and Information Security*, vol. 10, no. 1, pp. 170-179, 2018.

[۶] F. A. Setia, T. Y. Arif, and R. Munadi, "Collision-aware rate adaptation algorithm for high-throughput IEEE 802.11 n WLANs," in *2018 6th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*, 2018: IEEE, pp. 12-17.

[۷] T. Y. Arif and R. Munadi, "Evaluation of the Minstrel-HT Rate Adaptation Algorithm in IEEE 802.11 n WLANs," *International Journal of Simulation--Systems, Science & Technology*, vol. 18, no. 1, 2017.

[۸] R. Albar, T. Y. Arif, and R. Munadi, "Modified Rate Control for Collision-Aware in Minstrel-HT Rate Adaptation Algorithm," in *2018 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICELTICs)*, 2018: IEEE, pp. 7-12.

[۹] D. Nguyen and J. Garcia-Luna-Aceves, "A practical approach to rate adaptation for multi-antenna systems," in *Network Protocols (ICNP), 2011 19th IEEE International Conference on*, 2011: IEEE, pp. 331-340.

[۱۰] B. Radunovic, A. Proutiere, D. Gunawardena, and P. Key, "Dynamic channel, rate selection and scheduling for white spaces," in *Proceedings of the Seventh COnference on emerging Networking EXperiments and Technologies*, 2011, pp. 1-12.

[۱۱] F. Fietkau and D. Smithies, "minstrel ht: New rate control module for 802.11 n," ed, 2010.

[۱۲] S. Seytnazarov and Y.-T. Kim, "Cognitive rate adaptation for high throughput IEEE 802.11 n WLANs," in *Network Operations and Management Symposium (APNOMS), 2013 15th Asia-Pacific*, 2013: IEEE, pp. 1-6.

[۱۳] C.-Y. Li, C. Peng, S. Lu, and X. Wang, "Energy-based rate adaptation for 802.11 n," in *Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking*, 2012, pp. 341-352.

[۱۴] C.-Y. Li, C. Peng, S. Lu, X. Wang, and R. Chandra, "Latency-aware rate adaptation in 802.11 n home networks," in *2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 2015: IEEE, pp. 1293-1301.

[۱۵] Z. Zhao, F. Zhang, S. Guo, X.-Y. Li, and J. Han, "RainbowRate: MIMO rate adaptation in 802.11 n WiLD links," in *2014 IEEE 33rd International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC)*, 2014: IEEE, pp. 1-8.

[۱۶] I. Pefkianakis, Y. Hu, S.-B. Lee, C. Peng, S. Sakellaridi, and S. Lu, "Window-based rate adaptation in 802.11 n wireless networks," *Mobile Networks and Applications*, vol. 18, no. 1, pp. 156-169, 2013.

[۱۷] D. Smithies and F. Fietkau, "Minstrel rate control algorithm," *Online. Disponıvel em http://linuxwireless. org/en/developers/Documentation/mac80211/RateControl/minstrel. Ultimo acesso em*, vol. 16, no. 11, p. 2009, 2005.

[۱۸] R. K. Sheshadri and D. Koutsonikolas, "On packet loss rates in modern 802.11 networks," in *IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications*, 2017: IEEE, pp. 1-9.

[۱۹] A. B. Makhlouf and M. Hamdi, "Practical rate adaptation for very high throughput wlans," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 2, pp. 908-916, 2013.

[۲۰] H. Qi, Z. Hu, X. Wen, and Z. Lu, "Rate adaptation with Thompson sampling in 802.11 ac WLAN," *IEEE Communications Letters*, vol. 23, no. 10, pp. 1888-1892, 2019.

[۲۱] C.-Y. Li, S.-C. Chen, C.-T. Kuo, and C.-H. Chiu, "Practical Machine Learning-based Rate Adaptation Solution for Wi-Fi NICs: IEEE 802.11 ac as a Case Study," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020.

[۲۲] R. Karmakar, S. Chattopadhyay, and S. Chakraborty, "An online learning approach for auto link-Configuration in IEEE 802.11 ac wireless networks," *Computer Networks*, vol. 181, p. 107426, 2020.

[۲۳] T. Y. A. Munandar, R. Adriman, and R. Munadi, "CARA-OHT: Collision-Aware Rate Adaptation for Optimal High-Throughput in IEEE 802.11 s Wireless Mesh Networks," *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, vol. 14, no. 13, 2020.

[۲۴] م.ح. داعی، م. نصیری و س.و. ازهری، "ارائه و پیاده‌سازی یک ساختار منعطف در بستر واقعی جهت ارزیابی روش‌های بهبود QoS در شبکه‌های بی‌سیم". هشتمین کنفرانس بین‌المللی فناوری اطلاعات و دانش، همدان، دانشگاه بوعلی سینا، (۱۳۹۵).

[۲۵] ع. قالی‌باف، م.ح. داعی و م. نصیری، "پیاده‌سازی و ارزیابی کارایی روش‌های کنترل نرخ ارسال در شبکه‌های بیسیم پرسرعت در یک بستر واقعی". دومین کنفرانس ملی محاسبات نرم، گیلان، دانشگاه گیلان، (۱۳۹۶).

Improving performance of probe-based rate control mechanisms using classification: evaluation on an experimental testbed for High Throughput WLANs

Abstract:
MIMO technology offers a wide range of transmission rates for modern wireless LANs. In order to improve the performance of the rate control module, statistical information on the history of state and usage of each transmission rate is maintained at the MAC layer to help determine the rate at which future packets are sent. However, the great diversity of transmission rates in the 802.11n and 802.11ac standards imposes an overhead for updating this information. In this article, to reduce the state space of transmission rates while keeping statistics approximately up to date for each rate, a method for clustering rates is presented so that when sending a packet over a transmission rate, statistical information relating to all the rates belonging to the same cluster is updated. As a result, statistics for a greater number of rates can be updated even when sending a fewer number of packets. We implemented our proposed mechanism in the Linux kernel environment and evaluated its performance under different conditions on an experimental testbed deployed in our research laboratory. The results show that the proposed method outperforms the de-facto Minstrel-HT rate control mechanism in terms of throughput and number of successful transmissions.

***Keywords*:** Rate adaptation, High-Throughput Wireless LAN, Real Testbed, Classification, Minstrel HT, CRA.