

یک طرح چندروازه‌ای جهت بهبود CORPL تحت بار ترافیکی در شبکه‌های هوشمند انرژی مبتنی بر رادیو شناختگر با معماری مش

سیدعلی هاشمیان و وحید طباطبائی

بسیار پایین است (یعنی تنها چند بیت بر ثانیه بر حسب کنتور) و تأخیر حداکثر در حدود ۲ تا ۱۵ ثانیه است. از آنجا که قرائت کنتور به صورت متناوب انجام می‌شود، تنها تضمین قابلیت اطمینان کانال ضروری است. اما امنیت بالا نیز برای اطمینان از ایمن بودن شبکه هوشمند لازم است. برای کاربردهای پیشرفته‌تر (مثلاً مانیتور کیفیت توان، اتوماسیون پیشرفته توزیع و ...) پارامترهای دیگری (نظیر توان راکتیو و اکتیو، فاز و فرکانس) باید با فرکانس بیشتری جمع‌آوری شود. بنابراین هر کنتور ممکن است به نرخ داده بالاتری برای ارسال داده نیاز داشته و به بیشینه تأخیر محدودتری ملزم باشد. برای مثال برای داده‌های حیاتی و دارای اولویت در AMI^۲، بسته به شرایط کاری شبکه تأخیر مجاز بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌ثانیه است [۲].

یک راهکار عملی در سطح همسایگی استفاده از شبکه مش بی‌سیم ایستا با چند پرش است که تعداد کثیری از کنتورهای هوشمند را که به ترتیب به یک دروازه وصل شده‌اند متصل می‌کند. یکی از دلایل محبوبیت این روش تنظیم‌شدن مناسب آن با سایز شبکه AMI است. با افزایش تعداد کنتورهای هوشمند پهنای باند مناسب برای انتقال داده‌های تولیدشده در مسیرهای مختلف ضرورت می‌یابد.

از طرف دیگر رادیو شناختگر یا CR [۳] و [۴] به‌عنوان یک رویکرد جدید برای مقابله با کمبود بازدهی طیفی معرفی شده است. در یک شبکه رادیویی شناختگر، کاربران بدون مجوز (ثانویه یا SU) در زمانی که کاربران مجوزدار (اولیه یا PU) در کانال حضور ندارند، به‌طور پویا به کانال دسترسی پیدا می‌کنند. انگیزه‌های زیادی برای استفاده از رادیو شناختگر در شبکه‌های هوشمند وجود دارد [۵]. با قابلیت دسترسی طیفی پویای رادیویی شناختگر، طیف موجود می‌تواند به‌طور کارآمدتری به کار گرفته شود تا از کمبود بالقوه طیف جلوگیری نماید. از طرفی استفاده از رادیو شناختگر مشکلاتی نظیر از دسترس خارج شدن گره‌های انجام‌دهنده سنجش طیف و کاهش گذردهی و افزایش تأخیر را در پی دارد و نیاز است راه حلی برای مقابله ارائه شود که نه تنها مشکل از دسترس خارج شدن گره‌ها در زمان سنجش طیف را برطرف می‌کند، بلکه در برابر بار ترافیکی ناشی از کنتورهای هوشمند پایداری کافی داشته باشد. به دلیل کاربرد زیاد رادیو شناختگر در مخابرات ماشین به ماشین و به‌طور خاص شبکه‌های هوشمند، مطالعات زیادی روی کاربردهای این فناوری در نواحی مختلف شبکه‌های هوشمند در [۶] تا [۱۰] انجام شده و کاربرد رادیو شناختگر در شبکه‌های مش در [۱۱] بررسی گردیده است. در [۱۲] یک طرح فرصت‌طلبانه برای حداکثرکردن گذردهی در شبکه‌های چندپرشی ارائه شده است. در [۱۳] طرح فرصت‌طلبانه CORPL شامل گوش‌دادن به کانال و مبتنی بر رادیو شناختگر با کلاس‌های مختلف جهت کاهش تأخیر، کاهش تداخل و افزایش گذردهی در شبکه‌های

چکیده: شبکه قدرت فعلی اشکالات زیادی دارد. اخیراً یک شبکه جدید و هوشمند برای رفع کاستی‌های شبکه فعلی معرفی شده که از آن با عنوان شبکه هوشمند انرژی یاد می‌شود. شبکه هوشمندی که بخواهد شبکه قدرت را به‌طور کارآمدی مدیریت کند، به یک زیرساخت مخابراتی برای برقراری ارتباط بین اجزای شبکه نیاز دارد. فناوری مخابراتی رادیو شناختگر به‌منظور بهره‌برداری کارآمدتر از منابع طیفی رادیویی معرفی شده است. مسیریابی در این شبکه‌ها باید توسط پروتکلی انجام شود که در مقابله با مشکلات ایجادشده توسط رادیو شناختگر گذردهی را حداکثر کند و تأخیر بسته‌ها در آن حداقل و مناسب کاربرد شبکه هوشمند انرژی باشد. CORPL به‌عنوان پروتکلی که بخشی از این اهداف را محقق می‌سازد معرفی شده است. در این مقاله پروتکل CORPL تحت بار ترافیکی برست و پواسون بررسی می‌گردد و نشان داده می‌شود که با افزایش کاربران فعال در شبکه عملکرد CORPL افت پیدا خواهد کرد. سپس با استفاده از روابط ریاضی کران بالای میانگین تأخیر در پروتکل CORPL مدل شده و برای کاهش آن یک طرح چندروازه‌ای ارائه می‌گردد.

کلیدواژه: شبکه‌های هوشمند، رادیو شناختگر، ارسال مجدد فرصت‌طلبانه، تحلیل تأخیر، مسیریابی، شبکه‌های مش، چندروازه‌ای.

۱- مقدمه

شبکه هوشمند اصطلاحی است که به نسل بعدی شبکه‌های قدرت اطلاق می‌شود، شبکه‌ای که در آن توزیع و مدیریت انرژی الکتریکی به‌وسیله ترکیب ارتباطات پیشرفته دوطرفه و ظرفیت‌های محاسباتی بهبود یافته است. هدف از این کار بهبود کنترل، بازدهی، قابلیت اطمینان و امنیت است. یک شبکه هوشمند انرژی، انرژی الکتریکی را بین تولیدکننده و مصرف‌کننده و با استفاده از فناوری‌های دیجیتال دوطرفه انتقال می‌دهد [۱]. این شبکه لوازم هوشمند مصرف‌کننده را برای صرفه‌جویی در انرژی و هزینه و نیز افزایش اطمینان، بازدهی و شفافیت کنترل می‌کند. از یک شبکه هوشمند انتظار می‌رود که شبکه قدیمی برق را مدرن کند و همچنین امکان نظارت، حفاظت و بهینه‌سازی خودکار اجزای متصل به شبکه را فراهم نماید.

در سطح همسایگی یا NAN^۱، اطلاعات مجموع مصرف انرژی توسط کنتورهای هوشمند هر خانه به‌صورت متناوب فرستاده می‌شوند. ترافیک مربوط قابل پیش‌بینی است و تأخیر آن اهمیت دارد. برای قرائت کنتور معمولی تنها اطلاعات اولیه توان در نظر گرفته می‌شود و بنابراین نرخ داده

این مقاله در تاریخ ۱۹ اسفند ماه ۱۳۹۵ دریافت و در تاریخ ۳۰ اردیبهشت ماه ۱۳۹۷ بازنگری شد.

سیدعلی هاشمیان (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، (email: seyedali.hashemian@ee.sharif.edu).
وحید طباطبائی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، (email: vakily@iust.ac.ir).

فرض کنیم N فرستنده PU مشابه (و بنابراین N کانال در دسترس) در مکان‌های ثابت و حداکثر محدوده پوشش داریم. مدل فعالیت فرستنده PU که در z زمین کانال داده ارسال می‌کند، به وسیله یک فرایند i.i.d دووضعیتی توصیف می‌شود به گونه‌ای که دوره تناوب خالی و اشغال بودن کانال به ترتیب توزیع نمایی با میانگین‌های $1/\mu_{OFF}^j$ و $1/\mu_{ON}^j$ دارند.

فرض کنیم S_B^j بیانگر وضعیت اشغال z زمین کانال (فعال بودن z زمین PU) با احتمال $P_B^j = \mu_{OFF}^j / (\mu_{OFF}^j + \mu_{ON}^j)$ و S_I^j بیانگر وضعیت خالی بودن z زمین کانال (غیر فعال بودن z زمین PU) با احتمال P_I^j باشد به طوری که $P_I^j + P_B^j = 1$. فرض می‌کنیم که هر گره ثانویه در طول سنجش طیف از روش آشکارسازی انرژی [۱۹] برای آشکارسازی PU استفاده می‌کند به طوری که انرژی دریافتی (E) را با یک آستانه از قبل تعیین شده (σ) مقایسه می‌کند تا تصمیم بگیرد که آیا z زمین کانال اشغال است یا نه. بنابراین

$$Sensing\ Decision = \begin{cases} S_B^j & \text{if } E \geq \sigma \\ S_I^j & \text{if } E < \sigma \end{cases} \quad (۱)$$

دو سنجه اساسی در سنجش طیف، احتمال آشکارسازی (P_d) و احتمال آژیر غلط (P_f) هستند. هرچه P_d بزرگ‌تر باشد حفاظت بهبود می‌یابد و هرچه P_f کمتر باشد بازدهی استفاده از کانال افزایش می‌یابد.

همان طور که در [۱۹] آمده است P_d و P_f برای z زمین کانال می‌تواند به صورت (۲) و (۳) بیان شود

$$P_f^j = \Pr\{E \geq \sigma | S_I^j\} = \frac{1}{2} \operatorname{Erfc}\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sigma - \gamma_j \eta_j}{\sqrt{4\eta_j}}\right) \quad (۲)$$

$$P_d^j = \Pr\{E \geq \sigma | S_B^j\} = \frac{1}{2} \operatorname{Erfc}\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sigma - \gamma_j (\eta_j + 1)}{\sqrt{4\eta_j (\gamma_j - 1)}}\right) \quad (۳)$$

که Erfc مکمل تابع خطا و γ_j و η_j به ترتیب مشخص کننده SNR مربوط به z زمین سیگنال اولیه و ضرب پهنای باند z زمین کانال اولیه در زمان سنجش طیف کاربر ثانویه هستند.

فرض می‌شود شبکه AMI دو نوع ترافیک را دربرمی‌گیرد: داده‌های مانیتورینگ با اولویت کم (که در هر زمان که امکان دارد باید ارسال شوند) و داده‌های با اولویت بالا و حساس به تأخیر (که یک ضرب‌الاجل معین دارند).

۲-۱ ساختار لایه MAC در CORPL

یک روش فرصت طلبانه (ارسال هم‌زمان به چندین گره) ارسال مجدد بر اساس [۲۰] در [۱۳] توسعه داده شده که شامل دو مرحله اساسی است: اول انتخاب یک مجموعه ارسال مجددکننده (یعنی همسایه‌هایی از هر گره که برای پرش بعدی انتخاب می‌شوند) و دوم یک طرح هماهنگی برای تضمین این که تنها بهترین گیرنده هر بسته آن را مجدداً ارسال می‌کند (انتخاب یکتای ارسال مجددکننده). در این مقاله ساختار مشابهی را برای لایه MAC برمی‌گزینیم:

ساختار هر تناوب به مدت T_{period} یک فریم MAC در یک شبکه CR، شامل یک قسمت سنجش طیف T_s و یک قسمت ارسال T است که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

در سناریوهای سنجش طیف متناوب، در شرایط واقعی احتمال ایجاد تداخل روی PU ها به دلیل سنجش طیف غیر ایده‌آل وجود دارد. نرخ خطا (IR) به صورت کسری از زمان فعال بودن PU که طی آن ارسال

هوشمند ارائه شده است. بررسی عملکرد شبکه در این مرجع با فرض ارسال هر بسته به صورت مجزا صورت گرفته و از تحلیل زمانی و در نظر گرفتن اثر ترافیک بسته‌ها روی گذردهی و تأخیر صرف نظر شده است. همچنین در این مرجع فرض بر عدم امکان دریافت و ارسال هم‌زمان بسته‌ها است.

در [۱۴] عملکرد تأخیر شبکه سنسوری مبتنی بر رادیو شناختگر تحت ترافیک برست و پواسون بررسی شده است. همچنین [۹] ترافیک محتوای چندرسانه‌ای را در شبکه‌های هوشمند مبتنی بر رادیو شناختگر مدل و بررسی کرده است. در [۱۵] نویسندگان ترافیک شبکه‌های هوشمند انرژی را به صورت عمومی، خصوصی و ترکیبی مدل کرده‌اند.

ایده استفاده از یک طرح چنددروازه‌ای در ساختار مش شبکه‌های هوشمند در [۱۶] و [۱۷] آمده است. در [۱۶] یک طرح چنددروازه‌ای ابتکاری بر اساس طول صف با هدف تعادل بار بین دروازه‌ها ارائه شده است. در [۱۷] ابتدا یک طرح فشار پستی، ارائه و پایداری آن، بررسی و سپس یک طرح توزیع شده از آن استخراج گردیده است. در هر دوی این مراجع از استاندارد IEEE ۸۰۲.۱۱b به عنوان لایه فیزیکی استفاده شده است.

مدل پواسون قادر به نمایش خاصیت برست ترافیک داده نیست. مرجع [۱۸] سرآغازی برای تحلیلی واقع‌گرایانه‌تر از ترافیک بود که نشان داد خودشبیهی یک ویژگی مهم ترافیک است. در این مرجع نویسندگان ترافیک اینترنت LAN را در نظر گرفته و نشان دادند که این نوع ترافیک از نظر آماری خودشبیه است و هیچ کدام از مدل‌های پیش‌تر استفاده شده قادر به نمایش این رفتار نیست.

در این مقاله با مبنا قراردادن CORPL، یک تحلیل زمانی روی پارامترهای شبکه انجام می‌دهیم. سپس با ارائه یک طرح چنددروازه‌ای، CORPL را بهبود داده و عملکرد شبکه را به صورت زمانی تحت بار ترافیکی برست و پواسون آزمایش می‌کنیم.

ساختار ادامه مقاله بدین قسم است: در بخش ۲ مدل سیستم رادیو شناختگر را بررسی کرده و ساختار فریم لایه MAC مربوط به CORPL و توابع هدف مسیریابی آن را معرفی می‌کنیم. در بخش ۳ با بیان عوامل تأثیرگذار روی تأخیر بسته‌ها ابتدا کران بالای تأخیر در پروتکل RPL که خود پروتکلی پایه برای CORPL است را به دست آورده و به کمک آن اثر طول مسیر روی میانگین تأخیر CORPL را نشان می‌دهیم. در بخش ۴ یک طرح چنددروازه‌ای برای کاهش تأخیر و افزایش قابلیت اطمینان CORPL و همچنین با بیان مفهوم خودشبیهی ترافیک، یک مدل ترافیکی متناوب خودشبیه با ۳ وضوح معرفی می‌شود. بخش ۵ شامل نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار Matlab است.

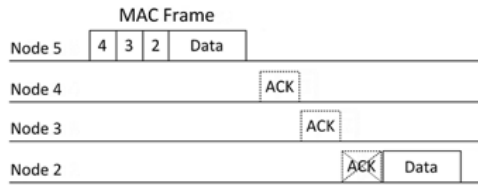
۲-۲ مدل سیستم

یک شبکه AMI بی‌سیم ثابت چندپرسی را شامل کنتورهای هوشمند مختلف و یک گره دروازه (جمع‌کننده اطلاعات کنتورها) در نظر می‌گیریم. فرض کنیم که کنتورهای هوشمند از CR پشتیبانی می‌کنند و گره دروازه با استفاده از یک لینک پرسرعت نظیر LTE به مرکز کنترل شبکه هوشمند متصل است.

فرض کنیم هر کنتور هوشمند (هر گره) به یک فرستنده-گیرنده مجهز است که می‌تواند در طیف دارای مجوز روی هر کانالی سیگنال ارسال کند. همچنین فرض بر این است که یک گره امکان انجام هم‌زمان سنجش طیف و دریافت/ارسال بسته را ندارد اما امکان ارسال یک بسته و هم‌زمان دریافت چند بسته وجود دارد.

Forwarding List for Class A Routes

1.	Node 4	$\delta_4 = 3.5$
2.	Node 3	$\delta_3 = 4.7$
3.	Node 2	$\delta_2 = 6.9$



شکل ۲: طرح هماهنگی لایه MAC و δ_i نشان‌دهنده مقدار تابع هزینه است. بسته به گره‌های لیست ارسال مجددکننده فرستاده شده و گره ارسال مجددکننده با بالاترین اولویت، یک ACK به دیگران ارسال می‌کند. هر گره لیست که نتواند ACK را دریافت کند نیز فریم را ارسال مجدد می‌کند [۱۳].

ذخیره می‌کند و w_1, w_2, w_3 و پارامترهای طراحی هستند به گونه‌ای که $w_1 + w_2 + w_3 = 1$.

برای مسیره‌های کلاس A، $w_1 \gg w_2, w_3$ و گره با حداقل تابع هزینه بیشترین اولویت را دارد. این کلاس وظیفه محافظت از گیرنده‌های اولیه را بر عهده دارد. برای مسیره‌های کلاس B، $w_2 \gg w_1, w_3$ است و گره با بیشترین هزینه بالاترین اولویت را دارد. این کلاس وظیفه رساندن بسته‌های دارای حساسیت زمانی را بر عهده دارد. این پروتکل همچنین یک کلاس برای ترافیک Best-effort است. این کلاس وظیفه رساندن بسته‌ها با حداکثر قابلیت اطمینان را بر عهده دارد. در این مقاله بر روی تحلیل کلاس B و کلاس Best-effort متمرکز خواهیم بود.

۳- بررسی تأخیر بسته‌ها

در بررسی یک سیستم رادیو شناختگر با سنجش طیف متناوب تأخیر بسته در هر پرش در اثر این عوامل روی می‌دهد: (۱) تأخیر انتشار بسته، (۲) تأخیر ناشی از ارسال مجدد بسته و (۳) تأخیر ناشی از خالی‌نبودن کانال. تأخیر انتشار بسته تابعی از تعداد بیت‌های هر بسته و نرخ ارسال بسته و تأخیر ناشی از ارسال مجدد بسته تابعی از کیفیت لینک و تناوب سنجش طیف است. همچنین با فرض محدودیت دستگاه گیرنده و فرستنده هر گره در ارسال و دریافت هم‌زمان بسته‌ها، در پروتکل CORPL یک بسته زمانی به درستی دریافت می‌شود که گره دریافت‌کننده در زمان دریافت مشغول سنجش طیف یا ارسال بسته نباشد. لذا افزایش تعداد گره‌های فعال در شبکه نیز احتمال از دست رفتن بسته و در نتیجه تأخیر ناشی از ارسال مجدد را افزایش می‌دهد.

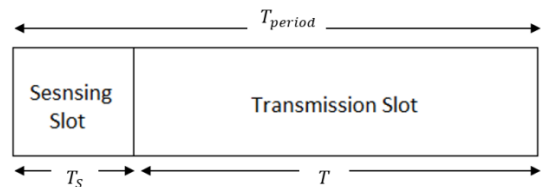
در یک طرح مبتنی بر رادیوی شناختگر، هر گره با انجام سنجش طیف در صورت خالی‌بودن کانال از آن استفاده می‌کند اما در صورت اشغال‌بودن کانال گره باید تا زمان سنجش طیف بعدی منتظر بماند.

۳-۱ تأخیر پروتکل RPL

در این بخش تأخیر را برای پروتکل RPL مدل کرده و یک کران بالا برای میانگین تأخیر شبکه به دست می‌آوریم. برای یک گره دلخواه i که به تعداد n_i پرش از دروازه فاصله دارد می‌توان با فرض ثابت‌بودن تأخیرهای صف و انتشار بسته تأخیر D_i را به صورت (۷) نوشت

$$D_i = \sum_{z=0}^{n_i-1} \sum_{m=0}^{n_i} (1 - p_{i,z,z+1})^m p_{i,z,z+1} (T_p + m.T_{ack} + \bar{T}_c) \quad (7)$$

که n_i تعداد دفعات ارسال مجدد بسته توسط گره مادر در صورت نرسیدن ACK، $p_{i,z,z+1}$ نمایش‌دهنده احتمال دریافت بسته بین گره‌های



شکل ۱: ساختار فریم MAC در شبکه CR [۱۳].

PU توسط ارسال SUها دچار تداخل می‌شود، تعریف می‌گردد و برای z امین کانال اولیه طبق (۴) داده می‌شود [۲۱]

$$IR_j = (1 - P_d^j)P_B^j + P_f^j(1 - P_f^j) + e^{-\mu T} (P_f^j - P_d^j) \quad (4)$$

که داریم $\mu = \max(\mu_{ON}^j, \mu_{OFF}^j)$. فرض می‌کنیم گره‌ها زمان ارسال T بهینه‌ای را که گزدهی شبکه ثانویه را حداکثر می‌کند انتخاب می‌کنند که این باعث محدودشدن خطا می‌شود یعنی $IR_j \leq IR_{max}^j$ که حداکثر نرخ خطای قابل تحمل برای کانال z ام است. این زمان ارسال بهینه برای z امین کانال با (۵) مشخص می‌شود [۲۰]

$$T_j = \mu^{-1} [\ln P_f^j - \ln (P_f^j P_d^j + P_B^j (1 - P_d^j - IR_{max}^j))] + \ln(2P_d^j - 1) \quad (5)$$

که P_d^j آستانه احتمال آشکارسازی برای یک SNR از پیش تعریف شده است. بر مبنای اطلاعات همسایگی، هر گره به‌طور پویا همسایگانش را اولویت‌بندی می‌کند تا لیست ارسال مجددکننده‌ها را ایجاد کند. برای اطمینان از هماهنگی بین گره‌های لیست و در نتیجه کاهش بسته‌های تکراری، یک طرح هماهنگی لازم است. هر گره، بعد از پیدا کردن جایگاه خود در لیست ارسال مجددکننده‌ها، در صورتی که بالاترین اولویت را داشته باشد، بسته دریافتی از گره مادر را ارسال و بعد از آن یک ACK به سایر گره‌های لیست و گره مادر ارسال می‌کند. سایر گره‌های لیست در صورت دریافت ACK، بسته دریافتی را دور انداخته و در غیر این صورت بر حسب اولویت برای ارسال بسته تلاش می‌کنند. این موضوع در شکل ۲ نمایش داده شده است.

اولویت‌هایی که نسبت داده می‌شوند بر اساس یک تابع هزینه هستند. از آنجا که تشکیل یک لیست از ارسال مجددکننده‌ها موجب سربار ترافیکی می‌شود، تعداد اعضای لیست باید به حداکثر M همسایه محدود باشد. زمانی که یک گره برای یک مدت از قبل تعیین شده از همسایه‌اش خبری نداشته باشد، ردیف آن همسایه در لیست ارسال مجددکننده‌ها حذف می‌شود. به طریقی مشابه اگر یک گره با هزینه کمتر ظاهر شود لیست ارسال مجددکننده‌ها به‌روز می‌شود.

از آنجا که در شبکه هوشمند انرژی وجود کلاس‌های مختلفی از ترافیک ممکن است، تابع هزینه برای اولویت‌بندی گره‌ها بستگی به کلاس داده دارد.

۳-۲ تابع هزینه مسیره‌یابی CORPL

گره‌های موجود در لیست ارسال مجددکننده‌ها بر اساس یک تابع هزینه بر مبنای اطلاعات همسایه‌ها اولویت‌بندی می‌شوند. گره ثانویه k هزینه را برای حضور گره ثانویه i در مجموعه ارسال مجددکننده‌هایش به صورت زیر محاسبه می‌کند

$$\delta_i = w_c C_i + w_r E_{ki} + w_r DB_i \quad (6)$$

که در آن $C_i = \sum_{j=1}^N C_{ij}$ ناحیه همپوشانی i امین گره ثانویه با همه فرستنده‌های اولیه و E_{ki} برابر ETX پیوند بین گره‌های ثانویه k و i است. DB_i بودجه تأخیر لینک ایجادشده به‌وسیله i امین گره ثانویه را

دارند و بر اساس یکی از کلاس‌های CORPL انتخاب شده‌اند، تأخیر از این گره‌ها تا دروازه به صورت $D_1, D_2, \dots, D_{|P_s^z|}$ است. p_{z, P_s^z} را به صورت احتمال رسیدن بسته از گره z به مجموعه P_s^z تعریف می‌کنیم

$$p_{z, P_s^z} = 1 - \prod_{j=1}^{|P_s^z|} (1 - p_{z,j}) \quad (16)$$

که $p_{z,j}$ احتمال رسیدن بسته از گره z به گره j است و داریم

$$p_{z,j} = p_{z,j}^{ext} (1 - p_{sensing}) (1 - p_{transmission}) \quad (17)$$

بنابراین مطابق دو مفهوم ALC^r و RPC^r در پروتکل‌های فرصت‌طلبانه [۲۲]، تأخیر گره z تا دروازه را می‌توان به صورت جمع تأخیر تا مجموعه ارسال مجددکننده‌ها و تأخیر تا دروازه نوشت

$$D_z = \sum_{m=0}^{n_r} (1 - p_{z, P_s^z})^m p_{z, P_s^z} (\bar{T}_C + T_p + mT_{ack}) + \sum_{i=1}^{|P_s^z|} p_{z,i} \prod_{j=1}^{i-1} (1 - p_{z,j}) (D_i + \frac{(i-1)T_{ack}}{|P_s^z|}) \quad (18)$$

که D_i تأخیر i امین همسایه گره z تا دروازه است.

حال ثابت می‌کنیم تحت پروتکل CORPL نیز افزایش دروازه‌ها موجب کاهش تأخیر می‌شود. با فرض یک طرح CORPL با تعداد اعضای لیست ارسال مجددکننده M ، با توجه به محدودبودن گره‌های درخت و از آنجا که تمام مسیرها به دروازه ختم می‌شوند، در زمان اجرای پروتکل CORPL از یک گره مشخص i تا دروازه تعداد محدودی مسیر ممکن است که هر کدام از این مسیرها به تنهایی یک مسیر RPL است. طول مسیرهای ممکن عددی بین حداقل فاصله i تا دروازه و یک مقدار بیشینه است. مطابق (۱۵) با افزایش تعداد دروازه‌ها، کران بالای تأخیر میانگین این مسیرهای RPL کاهش می‌یابد و بنابراین در (۱۸) که بر حسب متغیر D_i اکیداً صعودی است و با میانگین روی D_i ، داریم با افزایش تعداد دروازه‌ها میانگین تأخیر گره z در پروتکل CORPL کاهش پیدا می‌کند.

۴- ساختار چنددروازه‌ای

طراحی یک شبکه مش چنددروازه‌ای نقشی اساسی در دسترسی قابل اطمینان به کنتورهای هوشمند یا جمع‌آوری داده‌های آنها ایفا می‌کند. برای جلوگیری از قطع ارتباط، پروتکل مسیریابی با اضافه کردن مسیرهای جایگزین در برابر از دست رفتن بسته‌ها مقاومت می‌کند. در بیشتر موارد پوشش یک منطقه مسکونی در یک دروازه خلاصه نمی‌شود و دسترسی از چندین دروازه صورت می‌گیرد. وجود چندین دروازه که با یک لینک پرسرعت بی‌سیم نظیر یک سیستم LTE و یا سیمی نظیر فیبر نوری به یکدیگر متصل هستند باعث می‌شود در صورت وجود ترافیک زیاد در گره‌های نزدیک به یک دروازه، ترافیک به سمت دروازه‌های دیگر هدایت شود تا تأخیر کاهش یابد، گزردهی افزایش پیدا کند و همچنین احتمال از دست رفتن بسته در پرش‌های متوالی از طریق کاهش طول متوسط مسیر تا هر دروازه کاهش یابد.

برای استفاده از یک طرح چنددروازه‌ای بر اساس CORPL لازم است

$z+1$ و z در مسیر آغاز شده از گره i و T_p ، T_{ack} و \bar{T}_C به ترتیب نمایش‌دهنده تأخیرهای انتشار بسته، حداکثر زمان انتظار تا دریافت ACK و متوسط زمان انتظار تا خالی شدن یک کانال اولیه هستند. با فرض ثابت بودن در هر گره، مقادیر آنها را می‌توان به صورت (۸) تقریب زد

$$T_p = \frac{n_{packet}}{R} \quad (8)$$

که n_{packet} سایز بسته و R نرخ ارسال بسته می‌باشد

$$\bar{T}_C = T_{period} \cdot p_{nc} \quad (9)$$

$$p_{nc} = (P_B P_d + P_I P_f)^C \quad (10)$$

که p_{nc} احتمال اشغال بودن همه کانال‌ها و C تعداد کانال‌های اولیه است. $p_{i,z,z+1}$ می‌تواند به صورت (۱۱) نوشته شود

$$p_{i,z,z+1} = p_{i,z,z+1}^{ext} (1 - p_{sensing}) (1 - p_{transmission}) \quad (11)$$

در (۱۱) $p_{i,z,z+1}^{ext}$ برابر احتمال دریافت موفقیت‌آمیز بسته بین دو گره z و $z+1$ در مسیر آغاز شده از گره i و با فرض کانال فرکانس‌گزین است به طوری که

$$p_{i,z,z+1}^{ext} = \Pr\{p_r > \delta_{th}\} \quad (12)$$

p_r توان بسته دریافتی و δ_{th} یک آستانه مشخص است.

$p_{transmission}$ برابر احتمال ارسال بسته توسط گره گیرنده هم‌زمان با دریافت بسته است. $p_{sensing}$ احتمال انجام سنجش طیف در گیرنده می‌باشد که می‌تواند به صورت (۱۳) نوشته شود

$$p_{sensing} = \frac{T_s}{T_{period}} \quad (13)$$

۳-۲ کران بالای متوسط تأخیر RPL

با در نظر گرفتن مفهوم LOP^1 و فرض حداکثر $\zeta = LOP$ (روی مرز پوشش گره z) و همچنین با فرض کوچک بودن LOP می‌توان یک کران پایین به صورت $p_{i,z,z+1}^{ext} \geq p$ در نظر گرفت. بنابراین

$$D_i \leq \sum_{z=0}^{n_i-1} \sum_{m=0}^{n_r} (1-p)^m p (T_p + mT_{ack} + \bar{T}_C) \quad (14)$$

این موضوع در بخش پیوست اثبات شده و بنابراین کران بالا برای تأخیر متوسط شبکه برابر است با

$$\bar{D}_i \leq \bar{l}_{ext} \sum_{m=0}^{n_r} (1-p)^m p (T_p + mT_{ack} + \bar{T}_C) \quad (15)$$

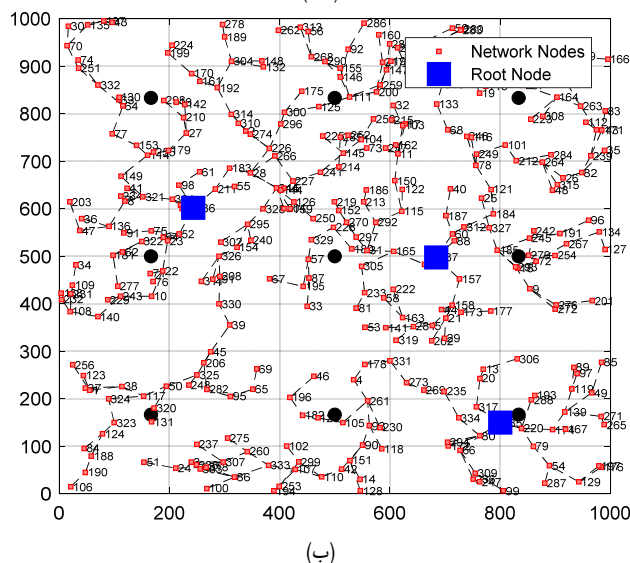
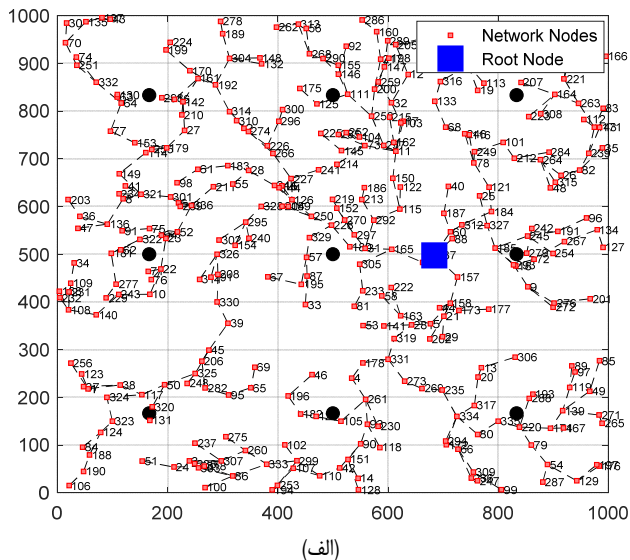
که $\bar{l}_{ext} = (1-\zeta) \cdot (1-p_{sensing}) \cdot (1-p_{transmission})$ و $p = (1-\zeta)$ طول متوسط درخت در پروتکل RPL است. از (۱۵) مشاهده می‌شود که کاهش طول متوسط درخت موجب کاهش کران بالای تأخیر و به تبع آن افزایش PDR^۲ می‌شود. از این نکته در طراحی سیستم چنددروازه‌ای استفاده خواهیم کرد.

۳-۳ تأخیر CORPL

برای یک گره z که P_s^z مجموعه لیست ارسال مجددکننده‌های آن به ترتیب هزینه‌های $X_1 < X_2 < \dots < X_{|P_s^z|}$ را بر اساس تابع هزینه

3. Anycast Link Cost
4. Remaining Path Cost

1. Link Outage Probability
2. Packet Delivery Ratio



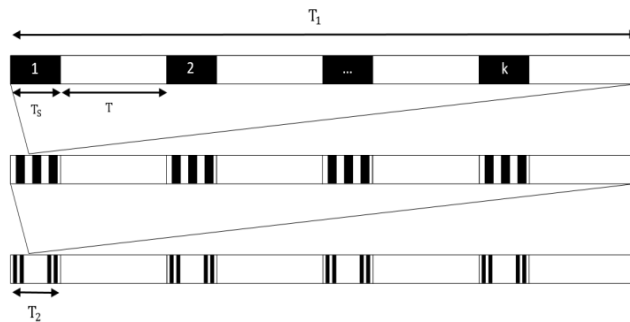
شکل ۴: توپولوژی شبکه شبیه‌سازی شده، (الف) حالت یک‌دروازه‌ای و (ب) حالت سه‌دروازه‌ای. دایره‌ها نمایش‌دهنده فرستنده‌های اولیه هستند که پوشش مشابه و دایروی حداکثری دارند. چگالی گره‌ها کم (3×10^{-7} گره در مساحت واحد) در نظر گرفته شده و لینک‌های بین گره‌ها نشان‌دهنده گره با پایین‌ترین مقدار ETX است.

۵- شبیه‌سازی

در این بخش عملکرد پروتکل‌ها را بررسی و آنها را در نرم‌افزار Matlab طبق توپولوژی مطرح‌شده در [۱۳] پیاده‌سازی می‌کنیم. شکل ۴ یک نمونه از توپولوژی شبکه شبیه‌سازی شده یک و سه‌دروازه‌ای و درخت DAG را نمایش می‌دهد.

پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۱ نمایش داده شده است. یک منطقه با سایز ۱۰۰۰ متر مربع در نظر گرفته می‌شود که ۹ فرستنده PU دارد. فرض می‌شود که کاربران ثانویه در تمام ناحیه، توزیع پواسون دوبعدی با چگالی یکنواخت دارند. یک کانال فرکانس‌گزین با محوشوندگی رایلی بین هر دو گره فرض می‌شود که بهره کانال نشان‌دهنده محوشوندگی رایلی مقیاس کوچک، تلفات مسیر مقیاس بزرگ و سایه است. مدل تلفات کانال در فرکانس $f = 2\text{GHz}$ به صورت $\log_{10}(r) + 37.6 + 128.1$ در نظر گرفته می‌شود که r فاصله از فرستنده و بر حسب کیلومتر است.

در صورت از دست رفتن بسته تا حداکثر $n_{rt} = 2$ بار بسته مجدداً ارسال می‌شود. برای جلوگیری از ایجاد بسته‌های تکراری، گره‌ها بسته‌هایی که سررسید آن منقضی شده باشد را دور می‌اندازند. همچنین در



شکل ۳: مدل ترافیک برست استفاده‌شده در ۳ وضوح مختلف.

در زمان تشکیل درخت جهت‌دار (DAG) هر دروازه با قراردادن شناسه خود و شناسه DAG و همچنین رتبه خود (با مقدار صفر) در یک بسته DIO ، فرایند تشکیل DAG را آغاز کند. هر گره شبکه با دریافت بسته DIO که حاوی اطلاعات رتبه ETX گره همسایه است، رتبه خود را به‌روز می‌کند. این کار از منظر توپولوژی موجب تشکیل یک درخت به ازای هر دروازه می‌شود که به دلیل دینامیک بودن و احتمال تغییر رتبه‌ها در شرایط مختلف، در هر لحظه امکان تغییر آن وجود دارد.

در زمان ارسال مجدد بسته‌ها، عملیاتی کاملاً مشابه حالت یک‌دروازه‌ای انجام می‌گیرد. هر گره بر اساس کلاس مورد نظر و بدون توجه به تعداد دروازه‌ها لیست ارسال مجددکننده‌ها را تعیین و بسته را ارسال می‌کند.

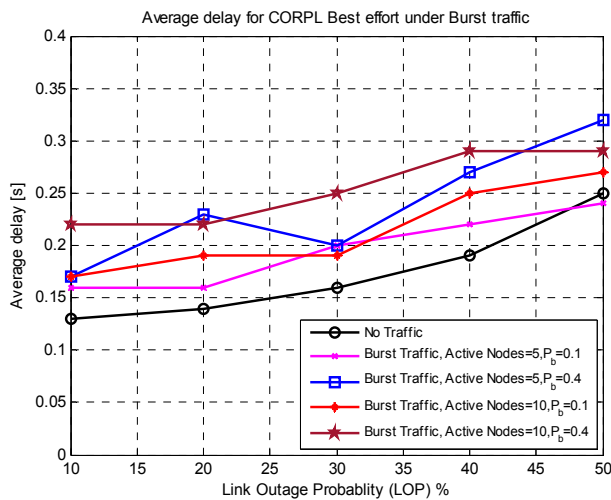
علی‌رغم بهبود گذردهی و تأخیر، این طرح موجب افزایش بسته‌های تکراری می‌شود. از آنجا که مسیریابی بدون مشخص کردن مقصد و صرفاً از طریق تعیین مسیر دارای کمترین هزینه صورت می‌گیرد، در گره‌های مرزی درخت‌ها با افزایش تعداد گره‌های لیست ارسال مجددکننده، بسته‌ها ممکن است از چندین مسیر به دروازه‌های مختلف برسند و بازدهی کاهش یابد.

طبق تعریف [۲۳] یک فرایند آماری $X(t), t \geq 0$ زمانی خودشبهه است که برای هر $a > 0$ یک $b > 0$ وجود داشته باشد که

$$\{X(at)\}^d = \{X(bt)\} \quad (19)$$

در [۱۴] برای مدل کردن ترافیک برست در شبکه‌های سنسوری از یک مدل متناوب با بسته‌های تولیدشده برست استفاده شده است. در این مقاله نیز مدل مشابهی را در نظر گرفته و برای واقعی‌تر شدن مدل در عین سادگی فرض می‌کنیم ترافیک در چند وضوح تناوب دارد. مطابق شکل ۳ در وضوح اول بسته‌ها در زمان‌های انجام سنجش طیف با توزیع دو جمله $B(n_{burst}, P_b) \sim$ تولید می‌شوند n_{burst} بیشینه تعداد بسته‌های برست و P_b احتمال موفقیت است. در وضوح دوم گره‌ها به مدت T_1 ، فعال (بسته تولید می‌کنند) و سپس مدتی غیر فعال بوده و به صورت متناوب این کار را تکرار می‌کنند. با فرض وجود k تناوب سنجش طیف در مدت T_1 از آنجا که جمع متغیرهای تصادفی دوجمله‌ای خود یک متغیر تصادفی دوجمله‌ای است [۲۴]، بسته‌های تولیدشده در مدت T_1 (وضوح دوم) نیز توزیعی مشابه بسته‌های تولیدشده در زمان سنجش طیف دارند. در وضوح سوم با فرض ارسال اطلاعات کنتور هوشمند به درخواست مرکز کنترل در زمان‌هایی با طول T_p به طور متناوب، بسته‌های تولیدشده در این فاصله نیز توزیع مشابه بسته‌های تولیدشده در فاصله T_1 را دارند.

1. Directed Acyclic Graph
2. DAG Information Object



شکل ۶: نمودار تأخیر متوسط بسته‌های رسیده برای CORPL (Best Effort) تحت ترافیک برست بر حسب LOP.

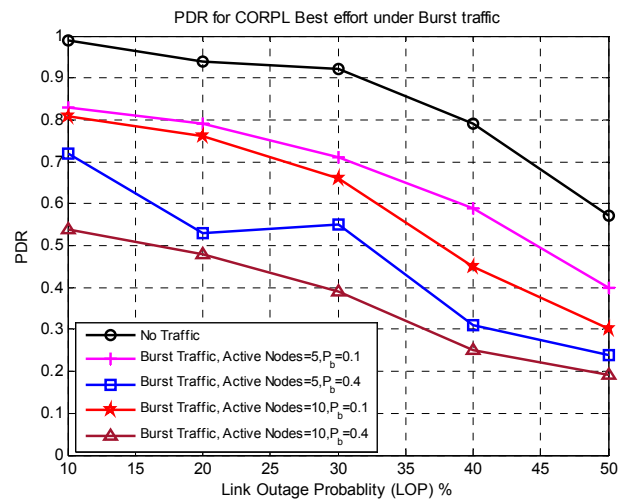
ترتیب معادل نرخ تولیدی ۱۰ Kbs و ۴۰ KBs است. همان طور که مشاهده می‌شود افزایش تعداد کاربران اولیه و افزایش نرخ تولید بسته در هر گره موجب افت مقدار گذرده می‌شود. شکل ۶ نیز تأخیر میانگین بسته‌های رسیده را بر حسب مقدار LOP برای ترافیک برست با میانگین بسته‌های تولیدی مختلف نمایش می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود افزایش LOP موجب افزایش تأخیر می‌شود. با توجه به این که بسته‌هایی که تأخیر آن منقضی شده در گره‌ها دور انداخته می‌شوند، میانگین تأخیر زیر مقدار حداکثر ۱ ثانیه است. برای خودشبیه‌بودن در دو مقیاس، زمان انجام شبیه‌سازی یک ثانیه در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود گره‌ها به صورت متناوب فعال هستند و گره‌های فعال بعد از یک ثانیه تولید بسته برای دوباره فعال شدن باید تا اتمام فعالیت سایر گره‌ها صبر کنند.

شکل ۷ و ۸ نمودار پراکندگی تأخیر دو نقطه از شکل ۶ را به ترتیب برای حالت‌های ۵ گره فعال و $P_b = 0.1$ و ۱۰ گره فعال و $P_b = 0.4$ نشان می‌دهند. پر واضح است که افزایش نرخ تولید بسته و تعداد کاربران فعال، موجب متمایل شدن تأخیر رسیدن بسته‌ها به سمت مقدار سررسید ۱ ثانیه می‌شود.

شکل ۹ مقایسه دو کلاس مختلف B و Best-effort در CORPL را تحت ترافیک سبک و تعداد گره‌های تولیدکننده کم نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود به دلیل کوچک بودن ضریب مربوط به ETX در این کلاس، عملکرد کلاس B در شرایط وجود ترافیک و از منظر گذرده به طور غیر قابل قبولی پایین است.

نمودار جعبه‌ای پراکندگی تأخیر این دو کلاس در شکل ۱۰ آمده است. همان طور که مشاهده می‌شود تحت شرایط بار ترافیکی و بر خلاف آنچه در [۱۳] معرفی شده است عملکرد کلاس B از منظر تأخیر بسته‌های رسیده نسبت به کلاس Best-effort بهینه نیست. علت آن است که با در نظر گرفتن ترافیک برست و افزایش تعداد گره‌های فعال و به تبع آن کاهش PDR، تأخیر ناشی از ارسال مجدد بسته‌ها به تأخیر ناشی از انتخاب مسیر غلبه می‌کند و کلاس B با کاهش تعداد پرش‌های قادر به جبران این تأخیر نخواهد بود. لذا با توجه به کاهش عملکرد کلاس B در هر دو جنبه گذرده و تأخیر، استفاده از این کلاس مطلوب نیست.

همان طور که در بخش ۴ توضیح داده شد برای رفع مشکل افت گذرده و افزایش تأخیر در اثر افزایش تعداد کنتورهای هوشمند فعال به عنوان کاربران ثانویه، می‌توان از یک طرح چندروزه‌ای استفاده کرد. شکل ۴-ب توپولوژی شبکه شبیه‌سازی شده تحت سه دروازه را نشان



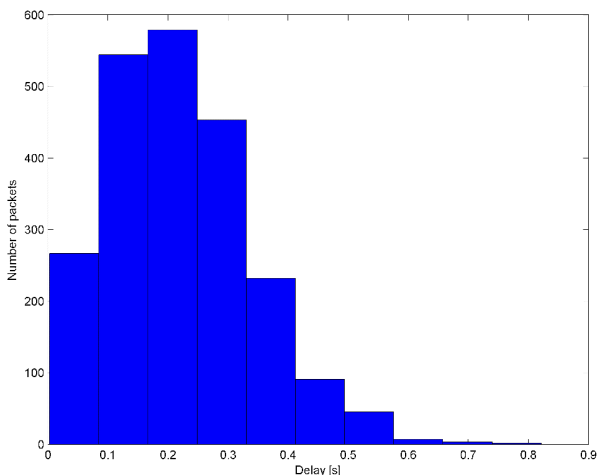
شکل ۵: نمودار PDR برای CORPL (Best Effort) تحت ترافیک برست بر حسب LOP.

جدول ۱: پارامترهای شبیه‌سازی.

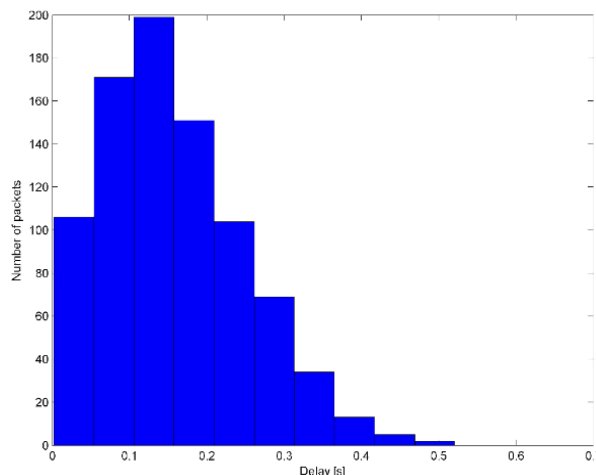
پارامتر	نماد	مقدار
اشغال بودن کانال	μ_{ON}	۲
در دسترس بودن کانال	μ_{OFF}	۳
احتمال اُزیر غلط	P_f	۰.۱
احتمال آشکارسازی	P_d	۰.۹
تعداد ارسال مجدد بسته	n_{rt}	۲
سایز بسته داده	n_{DATA}	۱۰۰ بایت
سایز بسته DIO	n_{DIO}	۲۸ بایت
سایز بسته ACK	n_{ACK}	۲۸ بایت
تعداد کاربران اولیه	N	۹
نرخ ارسال داده	r_{data}	۱ مگابیت بر ثانیه
پهنای باند هر کانال	-	۲۰۰ کیلوهرتز

تمام پروتکل‌ها بسته‌ها تنها برای گره‌های دارای رتبه ETX کوچک‌تر ارسال می‌شوند. عملکرد گذرده را بر حسب نرخ تحویل بسته (PDR) ارزیابی می‌کنیم که بدین صورت تعریف می‌گردد: نسبت تعداد بسته‌هایی که دریافت می‌شوند به تعداد کل بسته‌هایی که فرستاده می‌شوند. در واقع PDR کسری از بسته‌های ارسال شده توسط گره‌های مختلف را که به دروازه تحویل داده شده‌اند نشان می‌دهد. همچنین LOP نشان‌دهنده درصد بسته‌های از دست رفته است به طوری که توان دریافتی آنها از یک آستانه مشخص کمتر است.

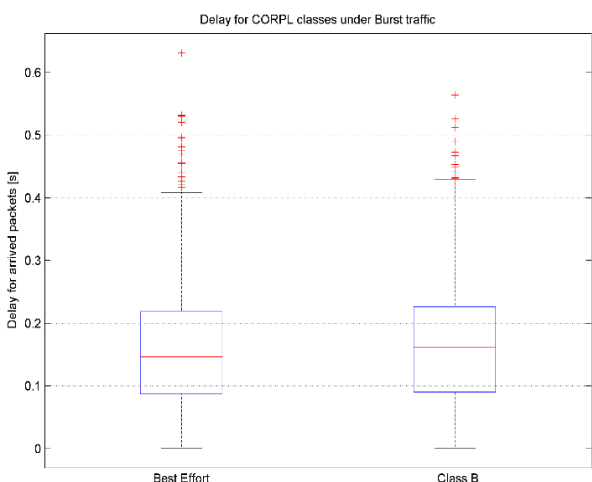
همان طور که گفته شد از مشکلات پروتکل مطرح شده در [۱۳] افت شدید PDR و افزایش تأخیر در شرایط تعداد زیاد بسته‌های تولیدی است. علت آن است که با افزایش بسته‌ها، احتمال این که در یک مجموعه ارسال مجددکننده گره‌های گیرنده در زمان دریافت بسته‌ها مشغول ارسال باشند افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به محدود بودن کانال‌های اولیه، افزایش کاربران ثانویه ریسک تداخل را افزایش می‌دهد و گذرده را کم می‌کند. شکل ۵ نمودار PDR را بر حسب مقدار LOP برای ترافیک برست با میانگین بسته‌های تولیدی مختلف و برای کلاس Best-effort با $M = 5$ نمایش می‌دهد. ترافیک برست همانند [۱۴] به صورت تولید متناوب بسته‌هایی در زمان‌های مشخص و با تعداد تصادفی که توزیع دو جمله‌ای $B(n_{burst}, P_b) \sim$ دارد مدل شده است. تعداد کل بسته‌های تولیدی یا n_{burst} برابر ۲۵ در نظر گرفته شده و $P_b = 0.1$ و $P_b = 0.4$ به



شکل ۸: پراکندگی تأخیر بسته‌های رسیده برای CORPL (Best Effort) تحت ترافیک برست برای ۱۰ گره فعال.

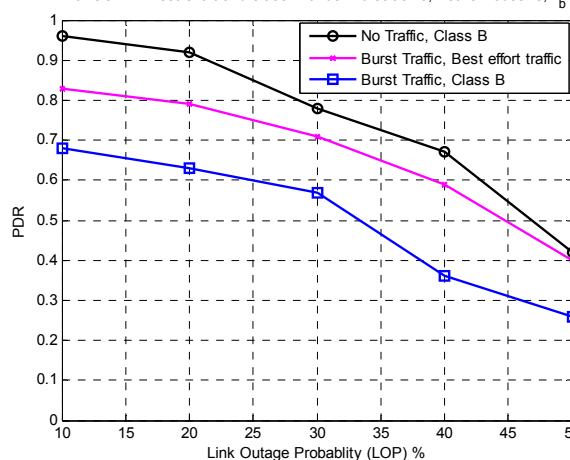


شکل ۷: پراکندگی تأخیر بسته‌های رسیده برای CORPL (Best Effort) تحت ترافیک برست برای ۵ گره فعال.

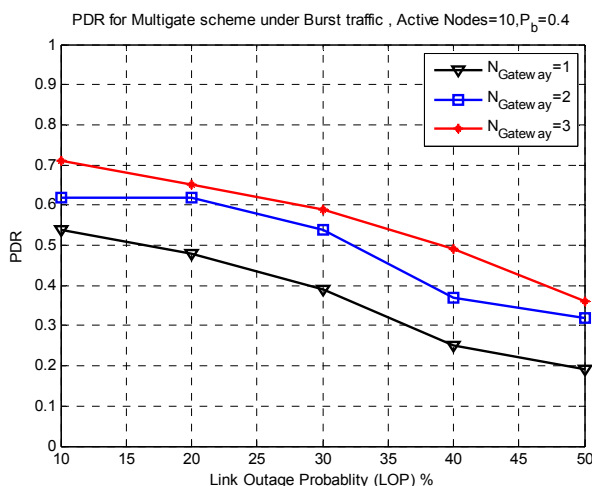


شکل ۱۰: پراکندگی تأخیر بسته‌های رسیده برای کلاس‌های [۹] تحت ترافیک برست سبک، نرخ تولید بسته پایین و ۱۰ گره فعال با ۲۰٪ LOP.

PDR for CORPL Best effort and class B under Burst traffic, Active Nodes=5, $P_b=0.1$

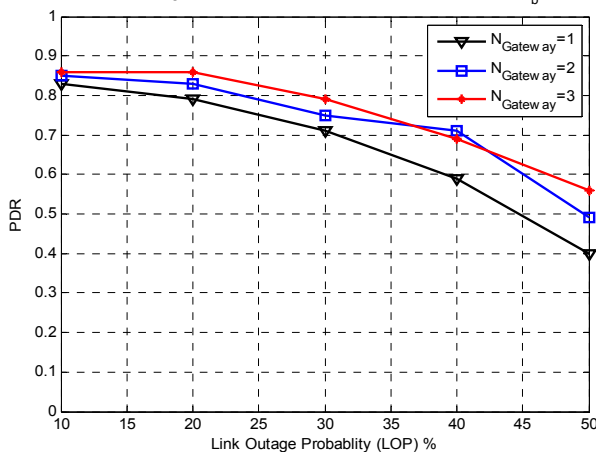


شکل ۹: نمودار PDR برای CORPL (Class B) تحت ترافیک برست بر حسب LOP.



شکل ۱۲: نمودار PDR برای CORPL چنددروازه‌ای تحت ترافیک برست، فعالیت ۱۰ کاربر و بسته‌های تولیدی زیاد.

PDR for Multigate scheme under Burst traffic , Active Nodes=5, $P_b=0.1$

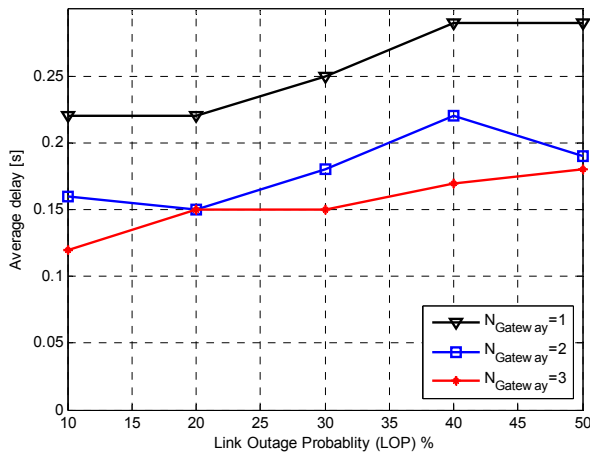


شکل ۱۱: نمودار PDR برای CORPL چنددروازه‌ای تحت ترافیک برست، فعالیت ۵ کاربر و بسته‌های تولیدی کم.

برست با نرخ ۴۰ Kbps به ازای هر گره با ۱۰ گره فعال نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ترافیک سبک‌تر اثر افزایش تعداد دروازه‌ها کمتر است (در حدود ۵٪ بهبود برای LOPهای کمتر از ۲۰) و با افزایش بار ترافیک اثر افزایش تعداد دروازه نمایان‌تر می‌شود (در حدود ۲۰٪ بهبود برای LOPهای کمتر از ۲۰).

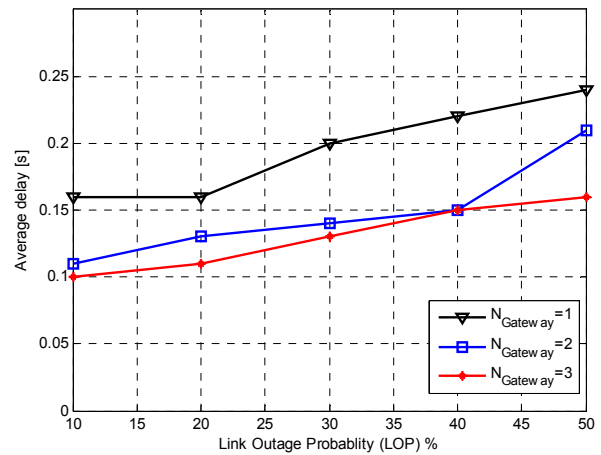
می‌دهد. به ازای هر دروازه یک درخت تشکیل گردیده و در مقایسه با شکل ۴ طول مسیرها کوتاه‌تر شده‌اند. شکل ۱۱ و ۱۲ اثر افزایش تعداد دروازه‌ها را از ۱ به ۳ عدد در یک توپولوژی با مساحت ۱ Km^۲ روی مقدار گذردهی و به ترتیب برای ترافیک برست با نرخ ۱۰ Kbps به ازای هر گره با ۵ گره فعال و ترافیک

Average delay for Multigate scheme under Burst traffic , Active Nodes=10, $P_b=0.4$



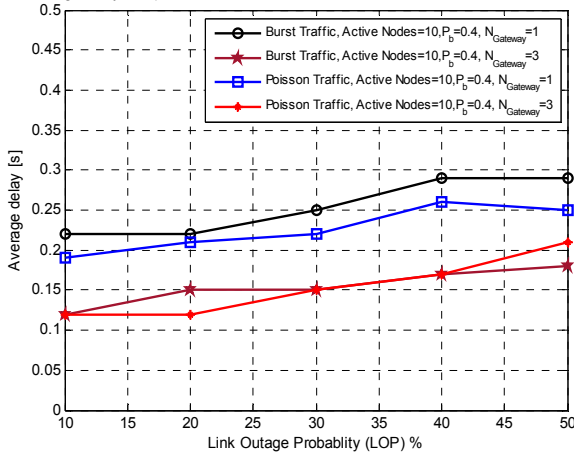
شکل ۱۴: نمودار تأخیر میانگین بسته‌های رسیده برای CORPL چنددروازه‌ای تحت ترافیک برست، فعالیت ۱۰ کاربر و بسته‌های تولیدی زیاد.

Average delay for for Multigate scheme under Burst traffic , Active Nodes=5, $P_b=0.1$



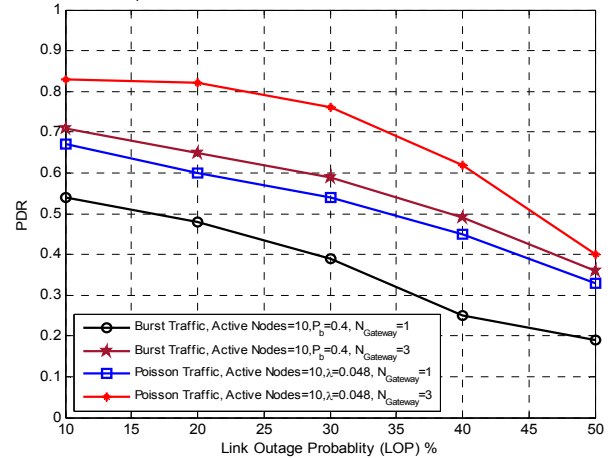
شکل ۱۳: نمودار تأخیر میانگین بسته‌های رسیده برای CORPL چنددروازه‌ای تحت ترافیک برست، فعالیت ۵ کاربر و بسته‌های تولیدی کم.

Average delay comparison between CORPL Best effort under Burst and Poisson traffic



شکل ۱۶: مقایسه تأخیر میانگین بسته‌های رسیده بین دو ترافیک برست و پواسون در حالت یک و چنددروازه‌ای.

PDR comparison between CORPL Best effort under Burst and Poisson traffic



شکل ۱۵: مقایسه PDR بین دو ترافیک برست و پواسون در حالت یک و چنددروازه‌ای.

در ترافیک برست و افزایش دفعات ارسال مجدد به دلیل پایین‌تر بودن PDR در ترافیک برست است.

دیدیم با فرض مساحت ثابت شبکه همسایگی، افزایش تعداد دروازه‌ها موجب افزایش گزردگی و کاهش تأخیر می‌شود. شکل ۱۷ تولید بسته‌های تکراری در اثر افزایش دروازه‌ها را برای طرح یک و سه‌دروازه‌ای و تحت ترافیک برست و پواسون نمایش می‌دهد. پارامتر CO یا هزینه هماهنگی نمایش‌دهنده تعداد بسته‌های تکراری دریافت‌شده در دروازه‌ها به کل بسته‌های دریافت‌شده است. در حالت وجود یک دروازه به دلیل ارسال فرصت‌طلبانه بسته‌ها به لیست ارسال مجددکننده‌ها و غیر ایده‌آل بودن طرح هماهنگی، بسته‌های تکراری از مقدار ۰.۰۵٪ شروع شده و با افزایش LOP افزایش می‌یابد. در شبیه‌سازی فرض شده که گره‌های میانی شناسه بسته‌های ارسال مجددشده را ذخیره کرده و بسته‌های تکراری را دور می‌اندازند، لذا تغییرات CO نسبت به تغییر LOP اندک است. با اضافه‌شدن تعداد دروازه‌ها، بسته‌ها ممکن است به خصوص در گره‌های با فاصله یکسان از دروازه‌ها، توسط لیست ارسال مجددکننده‌ها از مسیرهای مختلف به دروازه‌های مختلف هدایت شود که این کار باعث افزایش تعداد بسته‌های تکراری می‌گردد. افزایش LOP موجب افزایش ارسال‌های مجدد و افزایش احتمال ارسال تکراری بسته می‌شود. تعداد بسته‌های تکراری در ترافیک پواسون به دلیل بیشتربودن مقدار PDR و کاهش احتمال ارسال مجدد نسبت به ترافیک برست اندکی کمتر است.

همچنین شکل‌های ۱۳ و ۱۴ اثر افزایش دروازه روی تأخیر میانگین بسته‌های ارسال را نمایش می‌دهند که در ترافیک سبک‌تر اثر افزایش تعداد دروازه‌ها کمتر است (در حدود ۵۰ میلی‌ثانیه کاهش تأخیر میانگین برای LOP‌های کمتر از ۲۰) و با افزایش بار ترافیک اثر افزایش تعداد دروازه نمایان‌تر می‌شود (در حدود ۱۰۰ میلی‌ثانیه کاهش تأخیر میانگین برای LOP‌های کمتر از ۲۰).

مقایسه گزردگی و تأخیر تحت طرح یک و چنددروازه‌ای تحت بار ترافیکی شدید به ترتیب در شکل ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. در این دو شکل همچنین عملکرد PDR و تأخیر میانگین برای بار ترافیکی پواسون آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود اثر طرح چنددروازه‌ای روی PDR ترافیک پواسون و برست تقریباً یکسان است و این دو ترافیک فاصله ایجادشده در مقدار PDR را در طرح چنددروازه‌ای نیز حفظ کرده‌اند. اما سیستم با فرض بار ترافیکی پواسون عملکرد بهتری چه در حالت یک‌دروازه‌ای و چه در حالت سه‌دروازه‌ای دارد. علت آن است از آنجا که در ترافیک برست بسته‌ها به صورت رگباری و در زمان‌های مشخص تولید می‌شوند و از آنجا که طبق فرض [۱۳] امکان ارسال و دریافت هم‌زمان بسته‌ها وجود ندارد، احتمال عدم دریافت بسته در گیرنده در ترافیک برست کاهش پیدا می‌کند زیرا بسته بعدی از یک رگبار زمانی در گیرنده دریافت می‌شوند که گیرنده مشغول ارسال مجدد بسته قبلی است. به طور مشابه تأخیر میانگین رسیدن بسته‌ها تحت ترافیک پواسون اندکی کمتر از ترافیک برست است که علت آن افزایش احتمال قرارگرفتن بسته در صف

مدل برست بهتر است. اگرچه طرح چنددروازه‌ای گذردهی را افزایش و تأخیر را کاهش می‌دهد اما دیدیم به خصوص در نواحی مرزی عملکرد دروازه‌ها، افزایش تعداد بسته‌های تکراری دریافتی در دروازه‌ها یکی از مشکلات طرح چنددروازه‌ای است. همچنین در این طرح برای هماهنگی بین دروازه‌ها باید از یک ارتباط پرسرعت مبتنی بر LTE یا فیبر استفاده کرد که هزینه پیاده‌سازی و پیچیدگی‌های پروتکلی خاص خودش را دارد. در عمل یک بده‌بستان میان افزایش تعداد دروازه‌ها به منظور کاهش تأخیر و کاهش دروازه‌ها به منظور افزایش بازدهی وجود دارد که پیدا کردن نقطه بهینه خود می‌تواند یک موضوع تحقیقاتی باشد. همچنین استفاده از پروتکل‌های دیگر جهت کاهش سربار ترافیکی نزدیک دروازه‌ها (مثلاً استفاده از طول صف گره‌های همسایه در تابع هزینه) می‌تواند تأخیر را کاهش داده و نیاز به افزایش دروازه‌ها را تقلیل دهد.

پیوست

در این قسمت به صورت تحلیلی یک کران بالا برای تأخیر RPL به دست می‌آوریم.

با فرض $\zeta = LOP$ روی مرز پوشش گره z و با فرض کوچک بودن LOP می‌توان یک کران پایین برای $p_{i,z,z+1}^{ext}$ نوشت

$$p_{i,z,z+1}^{ext} > 1 - \zeta \quad (پ-۱)$$

بنابراین با فرض

$$p_i = (1 - \zeta)(1 - p_{sensing})(1 - p_{transmission}) \quad (پ-۲)$$

داریم

$$p_{i,z,z+1} > p_i \quad (پ-۳)$$

با بازنویسی D_i داریم

$$D_i = \sum_{z=0}^{n_i-1} \sum_{m=0}^{n_i} (1 - p_{i,z,z+1})^m p_{i,z,z+1} (\overline{T_C} + T_p) + \sum_{z=0}^{n_i-1} \sum_{m=0}^{n_i} (1 - p_{i,z,z+1})^m p_{i,z,z+1} (mT_{ack}) = (\overline{T_C} + T_p) \sum_{z=0}^{n_i-1} \sum_{m=0}^{n_i} (1 - p_{i,z,z+1})^m p_{i,z,z+1} + T_{ack} \sum_{z=0}^{n_i-1} \sum_{m=0}^{n_i} m(1 - p_{i,z,z+1})^m p_{i,z,z+1} \quad (پ-۴)$$

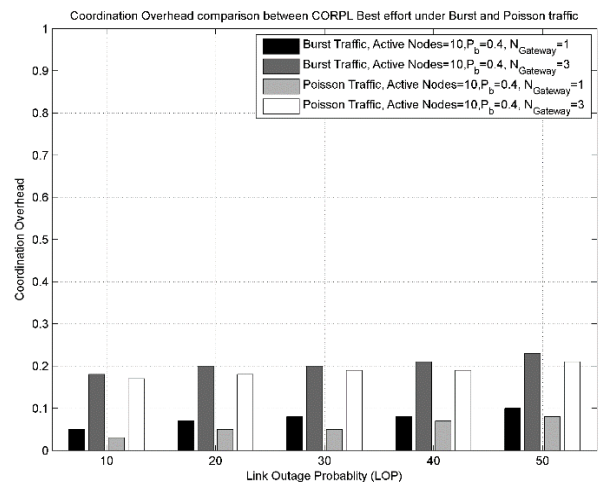
با مشتق‌گیری نسبت به $p_{i,z,z+1}$ ، (پ-۵) به دست می‌آید و با فرض $T_{ack} \gg T_p + \overline{T_C}$ می‌توان دید به ازای $p_{i,z,z+1} \geq 0.2$ (LOP‌های زیر ۵۰٪) تابع D_i همواره نزولی است و بنابراین

$$D_i \leq \sum_{z=0}^{n_i-1} \sum_{m=0}^{n_i} (1 - p_i)^m p_i (T_p + mT_{ack} + \overline{T_C}) \quad (پ-۶)$$

$$\frac{\partial D_i}{\partial p_{i,z,z+1}} = (\overline{T_C} + T_p) \sum_{z=0}^{n_i-1} \sum_{m=0}^{n_i} [(1 - p_{i,z,z+1})^m - m(1 - p_{i,z,z+1})^{m-1} p_{i,z,z+1}] +$$

$$T_{ack} \sum_{z=0}^{n_i-1} \sum_{m=0}^{n_i} [m(1 - p_{i,z,z+1})^m - m^2(1 - p_{i,z,z+1})^{m-1} p_{i,z,z+1}] = \quad (پ-۵)$$

$$(\overline{T_C} + T_p) \sum_{z=0}^{n_i-1} \sum_{m=0}^{n_i} (1 - p_{i,z,z+1})^{m-1} (1 - (m+1)p_{i,z,z+1}) + T_{ack} \sum_{z=0}^{n_i-1} \sum_{m=0}^{n_i} m(1 - p_{i,z,z+1})^{m-1} (1 - (m+1)p_{i,z,z+1})$$



شکل ۱۷: مقایسه بسته‌های تکراری بین دو ترافیک برست و پواسون در حالت یک و چنددروازه‌ای.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با معرفی احتیاجات شبکه هوشمند انرژی در نواحی مختلف و با تمرکز بر ناحیه NAN، نرخ داده مورد نیاز در کاربردهای مختلف این ناحیه را بیان کرده و دیدیم یک زیرساخت مخابراتی معمول در این ناحیه شبکه با توپولوژی مش است که در آن گره‌ها بسته‌ها را به گره‌های دیگر ارسال مجدد می‌کنند تا نهایتاً بسته به یک گره دروازه هدایت شود. نشان دادیم رادیو شناختگر به عنوان یک فناوری بی‌سیم، به دلیل بهبود بازدهی طیفی، گزینه مناسبی برای پیاده‌سازی زیرساخت مخابراتی شبکه هوشمند و AMI است. دیدیم در شبکه‌های NAN با توپولوژی مش مشکل از دسترس خارج شدن شبکه به دلیل سنسجس طیف عملکرد شبکه را دچار اختلال می‌کند.

CORPL در [۱۳] از یک روش ارسال مجدد فرصت‌طلبانه استفاده می‌کند که نه تنها حفاظت PU ها را تأمین می‌کند، بلکه احتیاجات شبکه ثانویه را نیز برطرف می‌نماید. CORPL در زمان ارسال مجزای بسته‌ها قابلیت اطمینان شبکه را افزایش و خطای PU را به اندازه ۵۰٪ کاهش و همچنین احتمال تجاوز از سررسید برای ترافیک حساس به تأخیر را کاهش می‌دهد. ما با بررسی CORPL تحت ترافیک برست و پواسون نشان دادیم که افزایش تعداد بسته‌های تولیدشده و گره‌های فعال موجب کاهش قابلیت اطمینان شبکه و افزایش تأخیر می‌گردد. برای حل این مشکل با مدل کردن تأخیر در پروتکل RPL و پروتکل CORPL نشان داده شد که با کاهش طول متوسط مسیرها می‌توان کران بالای تأخیر میانگین را کاهش داد. برای کاهش متوسط طول مسیرها یک طرح چنددروازه‌ای ارائه شد که با کاهش تعداد پرش‌های میانگین تا گره دروازه، قابلیت اطمینان را افزایش و تأخیر را کاهش می‌دهد. همچنین مشاهده شد عملکرد CORPL چنددروازه‌ای تحت ترافیک پواسون که به علت سادگی مدلی معمول اما غیر واقعی برای بررسی ترافیک است، نسبت به

- [21] W. Y. Lee and I. F. Akyildiz, "Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 7, no. 10, pp. 3845-3857, Oct. 2008.
- [22] G. Schaefer, F. Ingelrest, and M. Vetterli, "Potentials of opportunistic routing in energy-constrained wireless sensor networks," in [1] Y. Yan, Y. Qian, H. Sharif, and D. Tipper, "A Survey on Smart Grid Communication Infrastructures: Motivations, Requirements and Challenges," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 5-20, Feb. 2013.
- [23] [5] Y. Zhang, R. Yu, M. Nekovee, Y. Liu, S. Xie, and S. Gjessing, "Cognitive machine-to-machine communications: visions and potentials for the smart grid," *IEEE Netw.*, vol. 26, no. 3, pp. 6-13, May 2012.
- [24] [8] R. Deng, J. Chen, X. Cao, Y. Zhang, S. Maharjan, and S. Gjessing, "Sensing-Performance Tradeoff in Cognitive Radio Enabled Smart Grid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 302-310, Mar. 2013.
- [25] [9] J. Huang, H. Wang, Y. Qian, and C. Wang, "Priority-Based Traffic Scheduling and Utility Optimization for Cognitive Radio Communication Infrastructure-Based Smart Grid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 78-86, Mar. 2013.
- [26] [10] X. Liu, X. Li, Y. Li, M. Zhao, and J. Wang, "A new TDD scheme and interference-aware precoding for device-to-device underlay massive MIMO," *China Commun.*, vol. 13, no. Supplement2, pp. 100-108, 2016.
- [27] [12] D. S. J. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing," *Wireless Networks*, vol. 11, no. 4, pp. 419-434, Jul. 2005.
- [28] [15] O. Al-Khatib, W. Hardjawana, and B. Vucetic, "Traffic Modeling and Optimization in Public and Private Wireless Access Networks for Smart Grids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1949-1960, Jul. 2014.
- [29] [18] W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, and D. V. Wilson, "On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version)," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 2, no. 1, pp. 1-15, Feb. 1994.
- [30] [20] S. Biswas and R. Morris, "ExOR: opportunistic multi-hop routing for wireless networks," in Proceedings of the 2005 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications - SIGCOMM '05, vol. 35, no. 4, pp. 133-144, Aug. 2005.
- [31] [21] Won-Yeol Lee and I. F. Akyildiz, "Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 7, no. 10, pp. 3845-3857, Oct. 2008.
- [32] [22] G. Schaefer, F. Ingelrest, and M. Vetterli, "Potentials of Opportunistic Routing in Energy-Constrained Wireless Sensor Networks," in Roedig and C. J. Sreenan, Eds., *EWSN 2009: Wireless Sensor Networks*, vol. 5432, no. 5432, Berlin, Heidelberg: Springer, 2009, pp. 118-133.
- [33] P. Embrechts and M. Maejima, *Selfsimilar Processes*, Princeton, N.J.: Princeton University Press, 2002.
- [34] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 1990.

سیدعلی هاشمیان در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۵ مدارک کارشناسی مهندسی برق مخابرات و کارشناسی ارشد مهندسی مخابرات سیستم خود را از دانشگاه علم و صنعت ایران دریافت نمود و هم‌اکنون دانشجوی دکتری مخابرات سیستم در دانشگاه صنعتی شریف می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: نظریه صف، نظریه بازی، مجازی‌سازی در مخابرات بیسیم، رادیو شناختگر و کاربردهای آن و شبکه‌های کامپیوتری.

وحید طباطبائی در سال ۱۳۴۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی شریف، در سال ۱۳۵۲ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه منچستر انگلستان و در سال ۱۳۵۶ مدرک دکتری مهندسی برق خود را از دانشگاه برادفورد انگلستان دریافت نمود. دکتر طباطبائی از سال ۱۳۶۴ در دانشکده مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت ایران در تهران مشغول به فعالیت گردید، در سال ۱۳۸۹ به مرتبه استادی ارتقا یافت و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند سیستم‌های مخابرات سلولی، حذف تداخل در سیستم‌های CDMA، سیستم‌های مخابرات باند فوق وسیع و پردازش و کدینگ فضا-مکان می‌باشد.

مراجع

- [1] Y. Yan, Y. Qian, H. Sharif, and D. Tipper, "A survey on smart grid communication infrastructures: motivations, requirements and challenges," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 5-20, Feb. 2013.
- [2] Q. D. Ho, Y. Gao, G. Rajalingham, and T. Le-Ngoc, *Wireless Communications Networks for the Smart Grid*, Cham: Springer International Publishing, 2014.
- [3] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [4] S. Hu, Y. Yao, and Z. Yang, "MAC protocol identification using support vector machines for cognitive radio networks," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 21, no. 1, pp. 52-60, Feb. 2014.
- [5] Y. Zhang, R. Yu, M. Nekovee, Y. Liu, S. Xie, and S. Gjessing, "Cognitive machine-to-machine communications: visions and potentials for the smart grid," *IEEE Netw.*, vol. 26, no. 3, pp. 6-13, May 2012.
- [6] V. Gungor and D. Sahin, "Cognitive radio networks for smart grid applications: a promising technology to overcome spectrum inefficiency," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 7, no. 2, pp. 41-46, Jun. 2012.
- [7] R. Deng, et al., "Sensing-delay tradeoff for communication in cognitive radio enabled smart grid," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Smart Grid Communications, SmartGridComm'11*, pp. 155-160, Brussels, Belgium, 17-20 Oct. 2011.
- [8] R. Deng, J. Chen, X. Cao, Y. Zhang, S. Maharjan, and S. Gjessing, "Sensing-performance tradeoff in cognitive radio enabled smart grid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 302-310, Mar. 2013.
- [9] J. Huang, H. Wang, Y. Qian, and C. Wang, "Priority-based traffic scheduling and utility optimization for cognitive radio communication infrastructure-based smart grid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 78-86, Mar. 2013.
- [10] X. Liu, X. Li, Y. Li, M. Zhao, and J. Wang, "A new TDD scheme and interference-aware precoding for device-to-device underlay massive MIMO," *China Commun.*, vol. 13, no. 2, pp. 100-108, 2016.
- [11] A. A. El-Sherif and A. Mohamed, "Decentralized throughput maximization in cognitive radio wireless mesh networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 13, no. 9, pp. 1967-1980, Sep. 2014.
- [12] D. S. J. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing," *Wirel. Networks*, vol. 11, no. 4, pp. 419-434, Jul. 2005.
- [13] A. Aijaz, H. Su, and A. Aghvami, "CORPL: a routing protocol for cognitive radio enabled AMI networks," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 1, pp. 477-485, Jan. 2015.
- [14] Z. Liang, S. Feng, D. Zhao, and X. S. Shen, "Delay performance analysis for supporting real-time traffic in a cognitive radio sensor network," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 10, no. 1, pp. 325-335, Jan. 2011.
- [15] O. Al-Khatib, W. Hardjawana, and B. Vucetic, "Traffic modeling and optimization in public and private wireless access networks for smart grids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1949-1960, Jul. 2014.
- [16] H. Gharavi and B. Hu, "Multigate communication network for smart grid," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 1028-1045, Jun. 2011.
- [17] H. Gharavi and C. Xu, "Traffic scheduling technique for smart grid advanced metering applications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 60, no. 6, pp. 1646-1658, Jun. 2012.
- [18] W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, and D. V. Wilson, "On the self-similar nature of ethernet traffic (extended version)," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 2, no. 1, pp. 1-15, Feb. 1994.
- [19] R. Deng, J. Chen, C. Yuen, P. Cheng, and Y. Sun, "Energy-efficient cooperative spectrum sensing by optimal scheduling in sensor-aided cognitive radio networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 2, pp. 716-725, Feb. 2012.
- [20] S. Biswas and R. Morris, "ExOR: opportunistic multi-hop routing for wireless networks," in *Proc. of the Conf. on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications-SIGCOMM'05*, vol. 35, no. 4, pp. 133-144, Aug. 2005.