مروری بر تخصیص منابع و چارچوب‌های بهینه‌سازی در شبکه‌های رادیویی اقتضایی

حمید کردبچه ۱، حمیدرضا دلیلی اسکویی ۲

[۱] دانشجوی دکترای برق مخابرات، پژوهشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات جهاد دانشگاهی

[۲] دانشیار دانشکده برق، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، oskouei@ssau.ac.ir

چکیده

امروزه با رشد و گسترش تقاضا برای خدمات مبتنی شبکه، استفاده از شبکه‌های رادیویی، به‌ویژه آن‌هایی که به زیرساخت‌های از پیش تعیین‌شده‌ای نیاز ندارند، مانند شبکه‌های رادیویی اقتضایی، متقاضیان زیادی پیداکرده است. چنین شبکه‌هایی با حداقل پیکربندی و استقرار سریع، برای موارد اضطراری مانند بلایا، بحران‌ها و کاربردهای نظامی مناسب می‌باشد. شبکه‌های رادیویی اقتضایی به‌عنوان یکی از پرکاربردترین شبکه‌ها به‌ویژه در موارد اضطراری شناخته می‌شوند. در این مقاله تخصیص بهینه منابع رادیویی در شبکه‌های رادیویی اقتضایی که دارای هم‌بندی پویا هستند از دیدگاه‌های چارچوب‌های بهینه‌سازی، طراحی بین لایه‌ای و مسیریابی موردبررسی قرارگرفته می‌شود. چندین پژوهش که در زمینه طراحی بین لایه‌ای، باهدف بهینه‌سازی در مصرف انرژی و عملکرد شبکه انجام پذیرفته‌شده نیز موردبررسی قرار می‌گیرد. گام‌های کلیدی بهینه‌سازی یک مدل سیستم موردمطالعه قرار می‌گیرد. قالب مسئله‌های بهینه‌سازی یک هدفه و چندهدفه در شبکه‌های رادیویی اقتضایی با بررسی دستاوردهای کارهای جدید در هرکدام از این روش‌ها صورت گرفته موردمطالعه قرار می‌گیرد. الگوریتم‌ها و متریک‌های رایج در بهینه‌سازی با کارهای انجام‌شده در شبکه‌های رادیویی اقتضایی موردبررسی قرار می‌گیرد. بامطالعه کارهای انجام‌شده که از روش یادگیری تقویتی عمیق استفاده کرده‌اند نشان می‌دهیم که با اخذ بازخورد تصمیم از سیستم، در کنترل و مدیریت هزینه‌ها می‌توانیم تأثیر به سزایی داشته باشیم. تکنیک یادگیری تقویتی عمیق به‌عنوان راهکار کارآمد، برای تخصیص منابع در محیط پیچیده شبکه‌های نسل بعد کاندید می‌باشد و با یک حلقه بازخورد بین تصمیم و عملکرد سیستم موجب اصلاح و بهینه شدن تصمیم‌ها می‌گردد.

کلیدواژه

طراحی شبکه‌های رادیویی، شبکه‌های رادیویی اقتضایی، بهینه‌سازی، تخصیص منابع رادیویی، طراحی بین لایه‌ای، مسیریابی.

مقدمه

امروزه فن‌آوری ارتباطات بی‌سیم اساس روش برقراری ارتباط مردم را تغییر داده است. زمان آن‌که تلفن‌ها، کامپیوترها و ارتباطات اینترنتی باسیم‌کشی و فقط در مکان‌های از پیش تعیین‌شده استفاده می‌شد به پایان رسیده است. امروزه تقاضای اخذ خدمات مبتنی بر شبکه در همه‌جا و در هرزمان بااتصال به یک شبکه سلولی گسترده (برای مثال، بر اساس استانداردهای GSM[۱]، UMTS[۲] و LTE[۳])، یا شبکه‌های محلی (بر اساس نسخه‌های مختلف Wi-Fi، IEEE 80211) و یا ماهواره‌ای بر روی بستر ارتباطی بی‌سیم با سرعت قابل‌توجهی رو به رشد می‌باشد. تقاضای روزافزون برای استفاده از ترافیک شبکه به‌منظور دسترسی به محتوای موسیقی و یا ویدیویی، ضرورت تغییر عمده در طراحی شبکه‌ها را بیش‌ازپیش بر طراحان سیستم‌ها آشکار ساخته است. مارتین کوپر در دهه ۱۹۹۰ متوجه شد که میزان نرخ رشد ارتباطات صدا و دیتا از اولین انتقال بی‌سیم که توسط گولیلمو مارکونی در سال ۱۸۹۵ محاسبه گردید هر دو و نیم سال دو برابر می‌شود. (نرخ رشد سالانه ۳۲ درصد)[1]. نشریه اریکسون یک نرخ رشد سالانه ۴۲ درصدی را در ترافیک داده‌های تلفن همراه از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ پیش‌بینی نمود که حتی از قانون کوپر سریع‌تر است[2]. یک سؤال مهم این است که چگونه می‌توان با افزایش مستمر تقاضای اتصال به شبکه را با توسعه فن‌آوری‌های جدید ارتباطات بی‌سیم به‌گونه‌ای هماهنگ کرد که بتوان از رشد ترافیک داده‌ها هم پشتیبانی نمود؟ سؤال مهم دیگر این است که چگونه انتظارات رو به افزایش کیفیت خدمات را ارضا کنیم؟ مشتریان امروزه

[۱] Global System for Mobile communication

[۲] Universal mobile telecommunications system

[۳] Long term evaluation

www.SID.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۸

Archive of SID

انتظار دارند که سرویس‌های بی‌سیم در هرزمان و در هر مکان فعال باشند، درست همان‌گونه که انتظار می‌رود شبکه برق به‌طور پیوسته در دسترسشان باشد.

گام‌هایی نیز در برنامه‌های واقعیت افزوده، خانه‌های هوشمند، ماشین‌های هوشمند و ارتباطات ماشین به ماشین برداشته‌شده است. با این روند، تقاضا برای خدمات بی‌سیم جدید به وجود می‌آید که با شبکه‌های فعلی موجود قادر به پاسخگویی به نیازهای زیرساختی آن نخواهیم بود[3].

ما در حال حاضر شاهد تغییر در رفتار ترافیک شبکه‌های رادیویی هستیم. رفتار ترافیک نسبت به زمان و مکان پویاتر شده است. از سوی دیگر، با محدود بودن منابع رادیویی مانند طیف فرکانسی و توان، دقت در مسیریابی علی‌رغم محدودیت‌های ذاتی شبکه‌های رادیویی مانند تأخیر در بازخورد کانال و خطای تخمین کانال، ضرورت نیاز به تخصیص بهینه منابع رادیویی برای چنین ترافیک پویایی در شبکه ارتباطی را بیش‌ازپیش دارای اهمیت کرده است[3].

در این مقاله، در بخش نخست شبکه‌های رادیویی اقتضایی، کاربردها و چالش‌های آن تشریح می‌گردد. در بخش بعدی مسیریابی و پروتکل‌های مسیریابی در شبکه‌های اقتضایی موردبررسی قرار خواهد گرفت. در بخش سوم روش طراحی بین لایه‌ای تخصیص منابع و فعالیت‌های انجام‌شده موردبررسی قرار خواهد گرفت. در بخش چهارم چارچوب‌های بهینه‌سازی تشریح شده است. در انتهای مقاله با ارائه جمع‌بندی برای تحقیقات بیشتر در این حوزه به پایان می‌رسد.

شبکه‌های رادیویی اقتضایی

شبکه‌های اقتضایی[4] به شبکه‌هایی اطلاق می‌شود که در آن‌ها هیچ زیرساخت از پیش تعیین‌شده‌ای وجود ندارد و گره‌ها مرتباً مکان خود را تغییر می‌دهند. در عوض، هر گره[5] در مسیریابی و انتقال اطلاعات به سایر گره‌ها مشارکت می‌کند. اطلاعات مسیریابی برای هر گره به‌طور پویا با توجه به اتصالات شبکه و الگوریتم مسیریابی مورداستفاده قرار می‌گیرد.

شبکه‌های اقتضایی می‌تواند سیار یا ایستا باشد. شبکه‌های رادیویی اقتضایی زیرمجموعه‌ای از شبکه‌های سیار می‌باشد. یک نمونه سناریو برای شبکه‌های رادیویی اقتضایی، تعدادی ماشین در حال حرکت و تبادل اطلاعات موقعیتی در بزرگراه می‌باشد. این شبکه‌ها می‌تواند صدها عضو در حال حرکت با سرعت‌بالا (ضرورتاً نه در جهت یکسان) و در عرض چندین کیلومتر داشته باشد. شبکه‌های رادیویی اقتضایی با مستقل بودن از زیرساخت از پیش تعیین‌شده، فرآیندهای مدیریت یک زیرساخت ثابت را کاهش داده و به آن قابلیت و آزادی عمل در هر زمان و مکان برای ایجاد و یا گسترش یک شبکه را می‌دهد. ماهیت غیرمتمرکز این شبکه‌ها آن‌ها را برای کاربردهای مختلف مناسب ساخته است و مقیاس‌پذیری شبکه‌ها را در مقایسه با مدیریت شبکه‌های بی‌سیم بهبود بخشیده است. چنین شبکه‌هایی با حداقل پیکربندی و استقرار سریع، برای موارد اضطراری مانند بلایا، بحران‌ها و کاربردهای نظامی مناسب می‌باشد. شبکه‌های رادیویی اقتضایی به‌عنوان یکی از پرکاربردترین شبکه‌ها به‌ویژه در موارد اضطراری شناخته می‌شوند. در ادامه برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های شبکه‌های رادیویی آورده شده است[4]:

۱) مقیاس‌پذیری شبکه
۲) سازگاری متناسب با متغیرهای شبکه مانند نرخ تبادل اطلاعات کاربر
۳) تنظیم مجدد سریع تجهیزات شبکه
۴) امکان همزیستی با شبکه‌های موجود
۵) قابلیت خود نظارتی

کاربردها

شبکه‌های اقتضایی در سناریوهای مختلفی مورداستفاده قرارمی گیرند که در آن‌ها یک زیرساخت از پیش تعیین‌شده در دسترس نیست یا هزینه‌های راه‌اندازی شبکه سیمی توجیه ندارد و یا زمان برای راه‌اندازی یک زیرساخت ثابت وجود ندارد. شبکه‌های اقتضایی را بنا بر کاربرد می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد[5]:

- شبکه همراه اقتضایی (MANET[6]): در زمان‌های بروز فاجعه که در آن کل زیرساخت ارتباطی نابودشده و برقراری ارتباط به‌سرعت حیاتی است بسیار کاربردی می‌باشد. با استفاده از این نوع شبکه، یک زیرساخت می‌تواند در چند ساعت (به‌جای روزها یا هفته‌ها) تنظیم شود.
- شبکه خودرویی اقتضایی (VANET[7]): شبکه‌ای که برای ایجاد ارتباطات بین وسایل نقلیه نزدیک و یا بین وسایل نقلیه و تجهیزات ثابت نزدیک طراحی‌شده است.

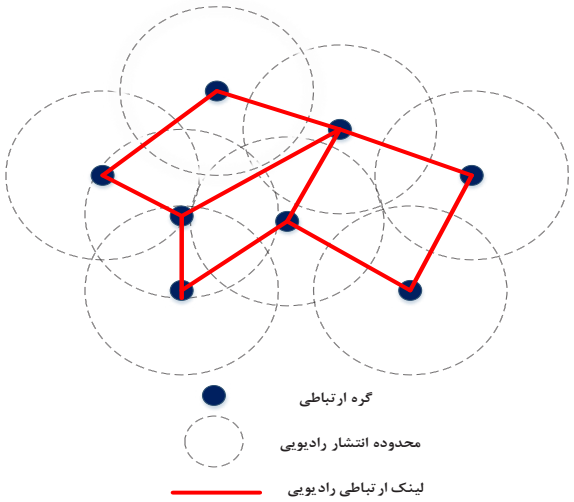
[4] Wireless ad-hoc networks
[5] Node
[6] Mobile ad-hoc network
[7] Vehicular ad-hoc network

www.SID.ir

Archive of SID

چالش‌ها

در شبکه‌های رادیویی اقتضایی، پهنای باند در دسترس[۸] منابع رادیویی و انرژی محدود است. هم‌بندی[۹] این شبکه‌ها دائماً در حال تغییر است و فاقد هر نوع زیرساخت و مدیریت متمرکزی هستند. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، طراحی الگوریتم‌های مسیریابی شبکه‌های اقتضایی بادرنظرگرفتن هم‌بندی پویای شبکه می‌باشد. در شبکه‌ای که گره‌ها در آن متحرک هستند، هم‌بندی شبکه به‌سرعت و غیرمنتظره تغییر می‌کند. در طراحی پروتکل مسیریابی باید به‌گونه‌ای عمل گردد که محدودیت‌های شبکه‌های رادیویی اقتضایی نیز لحاظ گردد. مصرف توان در گره‌ها باید باهدف بیشینه‌سازی عمر شبکه نیز صورت پذیرد. همچنین باید این مسئله را در نظر گرفت که طراحی به‌گونه‌ای نباشد که گره‌هایی که در قسمت خاصی از شبکه قرار دارند عمر خود را زودتر از دست بدهند. از دست دادن عمر شبکه در هر بخش از شبکه، نظارت و خدمات‌دهی در آن بخش را متوقف کرده و مستقیم بر میزان عملکرد شبکه تأثیر دارد[6]-[8].



شکل ۱. هم‌بندی شبکه رادیویی اقتضایی [5].

مسیریابی

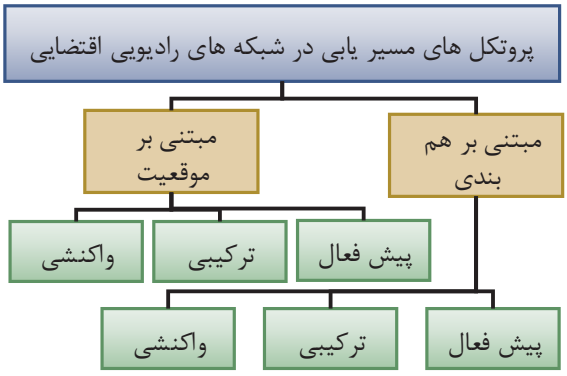
مسیریابی فرآیند هدایت یک بسته داده از مبدأ به مقصدش در یک شبکه ارتباطی است. یک دسته‌بندی از پروتکل‌های مسیریابی در شبکه‌های رادیویی اقتضایی عبارت است از، ۱) مبتنی بر هم‌بندی[۱۱] بسته‌ها با استفاده از اطلاعات هم‌بندی شبکه مسیریابی می‌گردند. ۲) مبتنی بر موقعیت[۱۲] بسته‌ها مطابق با موقعیت جغرافیایی گره‌های ارتباطی مسیریابی می‌شوند. این موقعیت‌یابی از طریق یک سرویس مکانی فراهم می‌گردد.

هرکدام از این دو دسته‌بندی می‌توانند مسیرها را به سه طریق زیر نگهداری کنند (شکل ۲) [5],[14]-[9]:

پیش فعال[۱۳]: نگهداری مسیرها قبل از اینکه هر داده‌ای ارسال شود صورت می‌گیرد.

۱) واکنشی[۱۴]: مسیریابی فقط اگر یک ارتباط برقرار شود صورت می‌گیرد.

۲) ترکیبی[۱۵]: ترکیبی است از مسیریابی پیش فعال محلی و واکنشی سراسری برای افزایش مقیاس‌پذیری.



شکل ۲. دسته‌بندی پروتکل‌های مسیریابی در شبکه‌های رادیویی اقتضایی [5]و [10].

- پروتکل‌های مسیریابی پیش فعال[۱۶](PRP): برای هر زوج گره درون شبکه یک مسیر در طول حیات شبکه نگهداری می‌کنند. این نوع پروتکل‌ها با توزیع دوره‌ای جداول مسیریابی در سراسر شبکه، فهرست‌های جدیدی از مقصد و مسیرهای آن‌ها را حفظ می‌کنند. معایب اصلی این الگوریتم‌ها عبارت‌اند از:
  - وابسته به میزان داده‌ها برای راهبری.
  - واکنش آرام در زمان تغییر ساختار و بروز عدم موفقیت در مسیریابی.
- پروتکل‌های مسیریابی واکنش[۱۷](RRP): برحسب نیاز تنها هنگامی یک مسیر را ایجاد می‌کنند که آن مسیر توسط یک گره مبدأ درخواست شود و همچنین این مسیر را تا زمانی نگهداری می‌کنند که به آن نیاز باشد. این نوع

[۸] Available bandwidth
[۹] Topology
[۱۰] Routing
[۱۱] Topology based
[۱۲] Location based
[۱۳] Proactive
[۱۴] Reactive
[۱۵] Hybrid
[۱۶] Proactive routing protocols
[۱۷] Reactive routing protocols

www.SID.ir

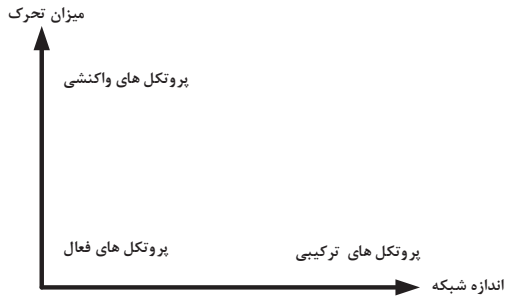
Archive of SID

پروتکل مسیر را بر اساس تقاضای کاربر و میزان ترافیک پیدا می‌کند. معایب اصلی این الگوریتم‌ها عبارت‌اند از:

- زمان تأخیر زیاد دریافتن مسیر.
- جریان بیش‌ازحد ترافیک می‌تواند منجر به تراکم شبکه شود.

- پروتکل‌های مسیریابی ترکیبی[۱۸] (HRP): این نوع پروتکل مزایای مسیریابی فعال و واکنشی را توأم دارد. مزایای اصلی این الگوریتم‌ها عبارت‌اند از:
  - بستگی به تعداد گره‌های فعال‌شده دارد.
  - واکنش به تقاضای ترافیک بستگی به شیب حجم ترافیک دارد.

پروتکل‌های مبتنی بر موقعیت در مقام مقایسه بهتر از پروتکل مبتنی بر هم‌بندی می‌باشد، زیرا میزان کنترل ترافیک کمتری را نیاز دارند. پروتکل فعال در شبکه‌های با تحرک بالا، عملکرد و ویژگی‌های ضعیف‌تری نسبت به پروتکل واکنشی دارند. به دلیل اینکه مدیریت اطلاعات تمامی گره‌ها در شبکه‌ای با تحرک بالا، بسیار پیچیده است. پروتکل واکنشی کارایی بالایی فراهم می‌کنند، به‌شرط آن‌که اندازه شبکه کوچک باشد. در اندازه بسیار بزرگ‌تر پروتکل‌های ترکیبی کارآمدتر هستند، اما حفظ شبکه در مواقعی که تحرک زیاد است، پیچیدگی‌هایی مانند افزایش سربار را هم به دنبال دارد(شکل ۳) [5],[14]-[11]:



شکل ۳. مقایسه پروتکل‌های مسیریابی[14]-[11] و[5]

در[11]، شبکه هوایی بدون سرنشین (پهباد)، چالش مکان‌یابی و مسیریابی به دلیل تحرک بالا، لینک‌های رادیویی ناپایدار، هم‌بندی پویا و انرژی محدود پهبادها موردبررسی قرارگرفته است. یک برنامه‌ریزی مکان‌یابی هوشمند مبتنی بر ازدحام[۱۹] (SIL) در شبکه پهبادی برای موارد ارتباطات اضطراری پیشنهادشده است. در ابتدا، یک الگوریتم مکان‌یابی هوشمند سه‌بعدی بر اساس بهینه‌سازی ذره‌ای ازدحام[۲۰] (PSO) پیشنهادشده که از فضای جستجو در یک باند محدود با استفاده از روش جعبه هم‌مرز[۲۱] استفاده می‌کند. در فضای جستجوی سه‌بعدی، گره‌های پهباد به‌طور تصادفی توزیع می‌شوند و الگوریتم SIL فاصله گره‌های موجود را برای تخمین محل گره‌های پهبادی هدف اندازه‌گیری می‌کند. زمان همگرایی و دقت مکان‌یابی با هزینه محاسباتی کمی بهبودمی‌یابد. سپس، یک الگوریتم خوشه‌بندی برای کارآمدی انرژی مبتنی بر PSO پیشنهاد گردیده، که در آن عملکرد PSO برای فاصله بین خوشه‌ای، فاصله درون خوشه‌ای، انرژی باقیمانده و موقعیت جغرافیایی مقایسه گردیده است. مشخص شد که الگوریتم پیشنهادی در رابطه با نسبت تحویل بسته، میانگین تأخیر انتها به انتها و مسیریابی بهینه‌تر عمل می‌نماید.

در[12]، نویسندگان بر اساس اندازه‌گیری‌های تجربی در دنیای واقعی، عملکرد مسیریابی بهینه‌شده بین لایه‌ای را در شبکه‌های بی‌سیم توزیع‌شده در کنار هم[۲۲] (BBNs) موردبررسی قرار داده‌اند. دو نوع مسیریابی پویا مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت: روش کوتاه‌ترین مسیر[۲۳] (SPR) و روش چند مسیری مشارکتی (CMR).

در[10]، پروتکل‌های مسیریابی شبکه‌های رادیویی اقتضایی به‌صورت واکنشی، پیش فعال و ترکیبی طبقه‌بندی‌شده است. در این مقاله مسیریابی در شبکه‌های بی‌سیم اقتضایی با استفاده از پروتکل‌های بردار مسافت مقصد[۲۴] (DSDV) و تقاضای موردی پروتکل‌های بردار مسافت[۲۵] (AODV) موردبررسی قرارگرفته است. عملکرد پهنای باند، توان عملیاتی و از بین رفتن بسته‌ها در دو پروتکل DSDV و AODV تحت تنظیمات مختلف شبکه و شرایط تحرک، مدل شده است.

در[13]، پروتکل مسیریابی مبتنی بر یادگیری تقویتی[۲۶] (RL) از سه زاویه، زمینه استفاده، ویژگی‌های طراحی و عملکرد پروتکل توسط نویسندگان موردبررسی قرارگرفته است. شکل شماره ۴.

۱) **زمینه استفاده:** بررسی نمودن زمینه‌ی استفاده پروتکل، ازجمله کلاس شبکه، نوع مسیریابی، انتخاب مسیرهای از پیش تعریف‌شده و یا کشف آنلاین مسیرهای بهینه، معیارهای کیفیت سطح خدمت[۲۷] QoS برای در نظر گرفتن بهینه‌سازی و ارضای قیود مدل سیستم، موردبررسی قرار گرفته‌شده است.

---

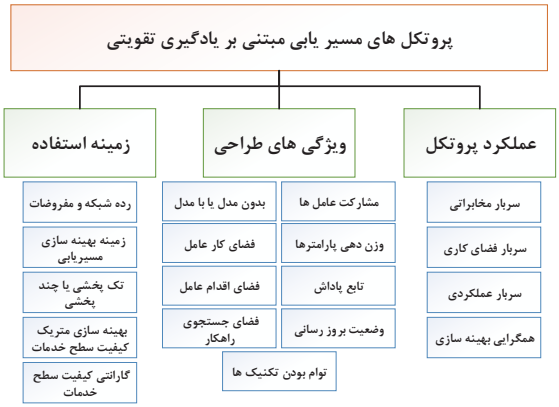
۱۸ Hybrid routing protocols
۱۹ Swarm-intelligence-based localization and clustering schemes
۲۰ Particle swarm optimization
۲۱ Bounding box method
۲۲ Body to body networks
۲۳ Short path routing
۲۴ Destination Sequenced Distance Vector
۲۵ Ad-hoc on demand Distance Vector
۲۶ Reinforcement learning
۲۷ Quality of service

www.SID.ir

Archive of SID

۲) **ویژگی‌های طراحی:** ویژگی‌های اصلی طراحی هر پروتکل در مقایسه با سایرین ازجمله مدل‌سازی حالت‌های عامل، اقدامات، روش‌های انتخاب عمل و پاداش عملکرد موردبررسی قرارگرفته شده است.

۳) **عملکرد پروتکل:** سربار (در اندازه حافظه و مقدار کنترل بسته) پروتکل‌های مسیریابی موردبررسی قرارگرفته است.

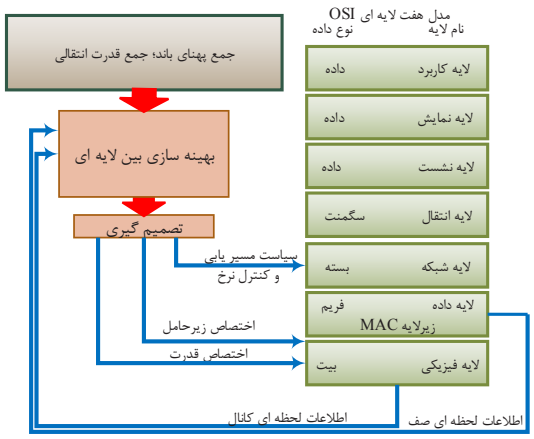


شکل ۴. شاخص‌های پروتکل مسیریابی در یادگیری تقویتی [13].

طراحی بین لایه‌ای برای تخصیص منابع[۲۸]

طراحی بین لایه‌ای در شبکه‌های رادیویی مانند شبکه‌های اقتضایی و شبکه‌های حسگر به‌منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی و عملکرد شبکه استفاده می‌گردد. در طراحی بین لایه‌ای، لایه‌های مختلف با یکدیگر در تعامل هستند تا به یک نتیجه مطلوب برسند. در شبکه‌های رادیویی که ازنظر منابع رادیویی، ذخیره‌سازی و ظرفیت، محدودیت‌های بسیاری دارند، معماری تک لایه‌ای اتصال به سیستم باز (OSI)[۲۹] برای پاسخ به تقاضاهای جدید در شبکه‌ای که نیازمند خدمات با سرعت‌بالا و تأخیر کم است، نمی‌تواند عملکرد خوبی داشته باشد. در این راستا، طراحی بین لایه‌ای به‌عنوان یک رویکرد مؤثر در شبکه‌های رادیویی کاربرد گسترده‌ای پیداکرده است. در طراحی بین لایه‌ای، هر گره پارامترهای محیطی را از سایر لایه‌ها مشاهده کرده و در مورد مسیریابی برای انطباق پارامترهای خود تصمیم‌گیری می‌کند. به‌عبارت‌دیگر، طراحی بین لایه‌ای می‌تواند با تعامل بین لایه‌هایی مانند شبکه، داده و فیزیکی، تخصیص طیف و توان در محیط پویا هماهنگ را انجام دهد[18]-[14].

شکل ۵، طراحی بین لایه‌ای بین لایه‌های فیزیکی، داده و شبکه را نشان می‌دهد.



شکل ۵. معماری بهینه‌سازی طراحی بین لایه‌ای [19].

لایه‌های مختلف با پارامترهای مختلف مانند کنترل توان تطبیقی[۳۰] (APC)، تخصیص زیر حامل، درخواست تکرار خودکار[۳۱] (ARQ)، تصحیح خطای پیش رو[۳۲] (FEC) و کیفیت سطح خدمات در لایه داده، نرخ انتقال انطباقی در لایه شبکه، اطلاعات کانال بازخورد سیگنال مرجع[۳۳] (CSI-RS)، مدولاسیون و کدینگ تطبیقی[۳۴] (AMC) در لایه فیزیکی می‌تواند برای بهینه‌سازی بین لایه‌ای مورداستفاده قرار گیرد. مدولاسیون و کینگ تقویتی را می‌توان در لایه فیزیکی برای بهبود سطح کیفیت خدمات استفاده نمود. به‌بیان‌دیگر، برای اطمینان از سازگاری انتقال داده به همراه شرایط متغیر بازمان کانال، از مدولاسیون تطبیقی و کینگ در لایه فیزیکی استفاده‌شده و برای دستیابی به قابلیت اطمینان بالا در لایه فیزیکی، به ترتیب سرعت انتقال داده، کدهای تصحیح خطا و ARQ در لایه شبکه و لایه پیوند داده را کاهش داده است. با استفاده از بهینه‌سازی بین لایه‌ای از یک‌سو و بهره‌مندی از مزایای فن‌آوری چند ورودی و چند خروجی انبوه در مدل سیستم از سوی دیگر، موجبات کارایی فراتر در شبکه فراهم‌شده است[19].

در[19]، طراحی بهینه‌سازی بین لایه‌ای برای برنامه‌ریزی زیر حامل، مسیریابی و کنترل تراکم در شبکه‌های رادیویی اقتضایی چند پرشی، چند ورودی و چند خروجی انبوه پیشنهادشده است. در الگوریتم پیشنهادی، لایه‌های فیزیکی،

---

۲۸ Cross-layer Resource allocation design
۲۹ Open system interconnection
۳۰ Adaptive power control
۳۱ Automatic repeat request
۳۲ Forward error correction
۳۳ Channel state information-reference signal
۳۴ Adaptive modulation and coding

www.SID.ir

Archive of SID

داده و شبکه در بهینه‌سازی بین لایه‌ای نقش اساسی دارند. واحد بهینه‌سازی بین لایه‌ای به ترتیب اطلاعات وضعیت کانال[۳۵] (CSI) و اطلاعات وضعیت صف[۳۶] (QSI) را از لایه‌های فیزیکی و داده دریافت می‌کند. سپس، بر اساس این اطلاعات و سایر پارامترهای ورودی مانند حداکثر توان انتقال و پهنای باند، واحد مرکزی بهینه‌سازی بین لایه‌ای تصمیم‌گیری در مورد اختصاص توان، زیر حامل، مسیریابی و کنترل نرخ برای به حداکثر رساندن مجموع نرخ شبکه را انجام می‌دهد. با تغییر شرایط کانال، واحد مرکزی بهینه‌سازی بین لایه‌ای این تصمیم را بر اساس داده‌های ورودی جدید به‌روز می‌کند.

در[20]، رویکرد طراحی بین لایه‌ای پیشنهاد گردیده که در آن لایه‌های مختلف معماری باهم به‌منظور فراهم کردن پایداری و سطح کیفیت خدمات برای شبکه چندرسانه‌ای رادیویی همکاری می‌کنند. این موضوع به‌نوبه خود باعث بهبود عملکرد کلی انتقال ویدیو در لحظه می‌شود. در این مقاله یک سیستم بهینه‌سازی بین لایه‌ای بازمان محاسباتی کم پیشنهادشده است. مسئله بهینه‌سازی بین لایه‌ای با استفاده از رده‌بندی یادگیری ماشین حل‌شده است.

در[21]، نویسندگان، تکنیک دوگان لاگرانژی را برای حل مسئله بهینه‌سازی بین لایه به کار گرفته‌اند. الگوریتم طراحی‌شده، به‌تدریج همگرا شده و به میزان مرحله‌های تکرار به‌ویژه برای شبکه‌های بزرگ، حساس می‌باشد. در این مقاله، یک الگوریتم مرتبه دوم کنترل تراکم و تخصیص توان[۳۷] (JCCPA) ارائه‌شده است، که در آن مسئله بهینه‌سازی باهدف حداکثر بهره‌مندی از شبکه مدل شده و در آن از روش نقطه اوج دوگان استفاده‌شده است. در الگوریتم پیشنهادی، متغیرهای اولیه و متغیرهای دوگان هم‌زمان به‌روز می‌شود. درنتیجه، سرعت همگرایی به نحوی بهبودمی یابد. علاوه بر این، از تکنیک تقسیم ماتریس برای تجزیه محاسبات ماتریس هسین و معکوس آن به گره‌ها و پیوندهای مختلف استفاده می‌شود تا به‌روزرسانی اجرا گردد.

چارچوب‌های بهینه‌سازی[۳۸]

هدف از بهینه‌سازی یک سیستم، به حداقل رساندن[۳۹] یا به حداکثر رساندن[۴۰] یک یا چند تابع هدف[۴۱] است که موجب بهبود کارایی و عملکرد مدل سیستم می‌شود. چارچوب‌های بهینه‌سازی در چند دهه اخیر، این امکان را برای طراحان فراهم کرده است که از طریق شبیه‌سازی، طراحی‌ها را به‌صورت عددی با سرعت بیشتری انجام دهند. بااین‌حال، این روش همچنین شامل یک فرآیند آزمون‌وخطا است و در مواردی هم منجر به یک سیستم بهینه نمی‌شود.

به‌طورکلی، سه‌گام کلیدی برای بهینه‌سازی یک مدل سیستم وجود دارد:

گام اول، درک مدل سیستم و متغیرهای مختلفی که روی آن تأثیر می‌گذارد،گام دوم، انتخاب یک تابع هدف به‌عنوان معیار عملکرد مدل سیستم، این معیار به متغیرهای مدل سیستم بستگی دارد و تأثیر زیادی در عملکرد آن دارد و گام سوم، انتخاب مقدار متغیرهای مدل سیستم است که موجب بهینه‌سازی آن می‌شود.

در گام اول، طراح باید درک درستی از مدل سیستم، نحوه عملکرد آن، متغیرهای مختلف مؤثر بر مدل سیستم و تعامل متغیرها بر روی یکدیگر داشته باشد. در گام دوم، معیار عملکرد سیستم باید تعریف شود و در گام سوم، طراح با استفاده از روش بهینه‌سازی مناسب، به جستجوی مقادیر بهینه برای متغیرهای طراحی می‌پردازد. انتخاب روش بهینه‌سازی به عواملی چون خطی بودن مسئله، تعداد متغیرهای طراحی، تعداد توابع هزینه و همچنین محدود بودن یا نبودن این مسئله بستگی دارد. تابع هزینه معیار عملکرد مدل سیستم است. در طراحی مهندسی، گاهی لازم است محدودیت‌هایی[۴۲] را برای این مسئله تحمیل کنید. به این نوع طراحی، طراحی محدود گفته می‌شود. اما در طراحی بدون محدودیت، برای مسئله هیچ محدودیتی وجود ندارد.

یکی از انواع بهینه‌سازی، طراحی بین لایه‌ای است. برای نمونه، در این نوع طراحی برنامه‌ریزی زیر حامل، مسیریابی و کنترل تراکم در شبکه‌های رادیویی اقتضایی صورت می‌پذیرد. ساختار طراحی با مدل سنتی دارای انعطاف‌پذیری کافی برای استفاده از پارامترهای مهم لایه‌های پایین مانند لایه‌های فیزیکی و داده برای تصمیم‌گیری مسیریابی مناسب نمی‌باشد. ازاین‌رو، برای تصمیم‌گیری بهینه مسیریابی و بهبود عملکرد شبکه، طراحی مسیریابی بین لایه‌ای به لایه‌های مختلف این امکان را می‌دهد تا اطلاعات مهم بین لایه‌ها تبادل گردد و پارامترها در لایه‌های فیزیکی، داده و شبکه بهینه شود[23]-[18].

---

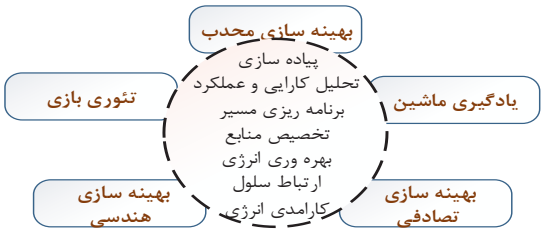
۳۵ Channel state information
۳۶ Que state information
۳۷ Joint congestion control and power allocation second-order algorithm
۳۸ Optimization frameworks
۳۹ Minimize
۴۰ Maximize
۴۱ Utility function
۴۲ Constraint

www.SID.ir

Archive of SID

در[24]، مدیریت طیف به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم، در محیط رادیو شناخت گر خودرویی[۴۳] (CRAVENET) بررسی‌شده است. استقرار در مقیاس بزرگ، برنامه‌های چندرسانه‌ای و اینترنت اشیا[۴۴](IOT) نیاز به ایجاد مکانیسم کارآمد برای تخصیص و مدیریت طیف دارد. در این مقاله یک واحد کنترل و مدیریت متمرکز طیف مبتنی بر تکنیک یادگیری تقویتی پیشنهادشده است. در الگوریتم پیشنهادی مدیریت طیف در محیط CRAVENET باهدف افزایش سطح کیفیت خدمات و متوسط کم تأخیر توسعه‌یافته است.

در[25]، نویسندگان روش‌های تحقیق، چالش‌های بهینه‌سازی و مسئله‌های باز را موردبررسی قرار داده‌اند. به‌طور خاص در مورد چارچوب‌های تحلیلی در مبحث طراحی تجزیه‌وتحلیل و بهینه‌سازی در شبکه‌های رادیویی پهبادی بررسی صورت گرفته است. نویسندگان، نیاز به دانش و آگاهی از زمینه‌هایی مانند تئوری مخابرات، تئوری بهینه‌سازی و طراحی شبکه و همچنین زمینه‌های نوظهور مانند بهینه‌سازی هندسی، بهینه‌سازی تصادفی، یادگیری ماشین و تئوری بازی را برای حل این مسئله‌ها ضروری دانسته‌اند، شکل ۶.



شکل ۶. چارچوب‌های بهینه‌سازی برای طراحی سیستم‌های ارتباطی پهبادی [25].

در[26]، نویسندگان طراحی یک شبکه هوانوردی[۴۵] (AANET) را پیشنهاد داده‌اند. در طراحی بهینه‌سازی AANET پارامترهای لایه‌های فیزیکی، داده و شبکه برای رسیدن به تابع هدف بهینه می‌شوند. در بهینه‌سازی یک هدفی با تکرار و بهینه‌سازی هر متریک در هر تکرار صورت می‌گیرد. بااین‌حال، علی‌رغم پیچیدگی محاسباتی، تأخیر پردازش سیگنال و مصرف انرژی، مسئله را به‌صورت محلی بهینه[۴۶] می‌کند. علاوه بر این، معیارهای بهینه‌سازی متنوع AANET ها به‌طورمعمول از یکدیگر مستقل نیستند و ازلحاظ تأثیرگذاری بر عملکرد کلی سطح سیستم، با یکدیگر در ارتباط می‌باشند. در مقابل بهینه‌سازی تک هدفی، بهینه‌سازی چند هدفی با ایجاد ارتباط میان اهداف مختلف قادر است، راه‌حل‌های بهینه جامع[۴۷] را پیدا کند. در این مقاله، نویسندگان گستره‌ای از الگوریتم‌ها و متریک‌های بهینه‌سازی چندهدفه متداول که در طراحی AANET بکار رفته را نیز موردبررسی قرار داده‌اند:

الف) الگوریتم‌های مورداستفاده در بهینه‌سازی چندهدفه

۱) بهینه‌سازی تصادفی
۲) بهینه‌سازی ازدحام ذرات
۳) بهینه‌سازی هندسی
۴) بهینه‌سازی بیضیین
۵) الگوریتم ژنتیک
۶) منطق فازی
۷) یادگیری ماشین
۸) یادگیری تقویتی
۹) یادگیری عمیق
۱۰) بهینه‌سازی محدب

ب) متریک‌های رایج در بهینه‌سازی چندهدفه

۱) پیچیدگی محاسبات
۲) کیفیت خدمات
۳) پایداری
۴) شمارش هاپ
۵) از دست دادن بسته
۶) گذردهی
۷) نسبت خطای بیت
۸) مدت عمر شبکه
۹) کارایی انرژی
۱۰) تأخیر

در طول دهه‌های گذشته، پژوهش‌های زیادی در حوزه فضای محاسباتی بهینه‌سازی یک یا چندهدفه انجام‌شده است. نمونه‌هایی از این پژوهش‌ها، بهبود سریع قابلیت محاسباتی، استفاده از محاسبات ابری[27] و بهره از محاسبات کوانتومی[28] می‌باشد.

در[29]، نویسندگان بررسی کرده‌اند که تا چه میزان فضای محاسباتی روش‌های سنتی بهینه‌سازی شبکه رادیویی برای سیستم‌های رادیویی نسل بعد کاربردی و امکان‌پذیر است. شبکه‌های نسل بعد به دلیل مقیاس، چگالی و ناهمگونی، بسیار پویا و پیچیده خواهد بود و مدل‌سازی چنین سیستم‌هایی بسیار پیچیده است. به‌این‌ترتیب، رویکردهای بهینه‌سازی سنتی که

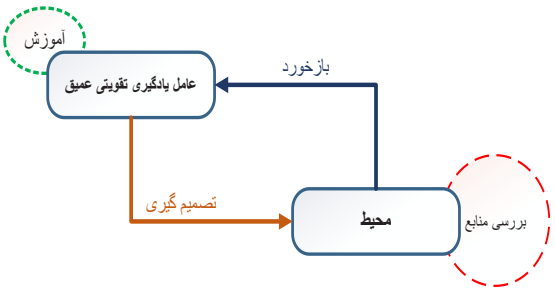
[۴۳] Cognitive Radio Vehicular Ad-hoc Network
[۴۴] Internet of thing
[۴۵] Aeronautical ad-hoc network
[۴۶] Local optimal
[۴۷] Global optimal

www.SID.ir

Archive of SID

شدیداً به مدل‌های ریاضی متکی هستند، دیگر کارا نخواهند بود. بنابراین، از هوش مصنوعی[۴۸] (AI) برای بهینه‌سازی استفاده می‌گردد.

مسئله‌ها در شبکه‌های رادیویی به‌طور سنتی با استفاده از مجموعه‌ای از قوانین برگرفته‌شده از تجزیه‌وتحلیل و تجربه قبلی حل می‌شود. بااین‌حال، در محیط پیچیده شبکه‌های نسل بعد، نگاشت بین تصمیم و تأثیر آن بر سیستم برای کنترل و مدیریت هزینه‌های آن ضروری و کارا می‌باشد. پیشرفت‌های اخیر در فن‌آوری‌های هوش مصنوعی مانند یادگیری تقویتی عمیق[۴۹] می‌تواند یک حلقه بازخورد بین تصمیم‌گیرنده و سیستم ایجاد کند تا تصمیم‌گیرنده بتواند عمل خود را بر اساس بازخورد سیستم اصلاح‌کرده و درنهایت به تصمیم بهینه برسد (شکل ۷). به‌عنوان‌مثال، به‌تازگی در پژوهش‌هایی از یادگیری تقویتی عمیق برای حل چندین مسئله در ارتباطات و شبکه، ازجمله مدولاسیون تطبیقی، ذخیره‌سازی بی‌سیم و بارگذاری داده‌ها استفاده کرده‌اند[30].



شکل ۷. مدل یادگیری تقویتی عمیق [30].

جدول ۱. مقایسه مقاله های مورد بررسی

شماره مرجع	نوع شبکه و مدل سیستم	هدف	دستاورد
[10]	شبکه اقتضایی	بالا بردن عملکرد پهنای باند و توان عملیاتی و کاهش از بین رفتن بسته‌ها	با استفاده از بهینه‌سازی بین لایه‌ای و پروتکل‌های مسیریابی بردار مسافت مقصد(DSDV) و تقاضای موردی بردار مسافت(AODV) عملکرد پهنای باند، توان عملیاتی و کاهش از بین رفتن بسته‌ها بهینه‌تر شده است.
[11]	شبکه اقتضایی پهبادی	طراحی مسیر حرکت پهباد و مسیریابی	با استفاده از بهینه‌سازی ذره‌ای ازدحام(PSO) تحویل بسته، میانگین کمتر تأخیر انتها به انتها و مسیریابی بهینه‌تر
[12]	بی‌سیم توزیع‌شده در کنار هم	مسیریابی	با استفاده از بهینه‌سازی مسیریابی روش کوتاه‌ترین مسیر (SPR) و روش چند مسیری مشارکتی (CMR) برای انتقال داده
[13]	شبکه اقتضایی پهبادی	طراحی مسیر حرکت پهباد و مسیریابی	با استفاده از بهینه‌سازی یادگیری ماشین (RL) ارتقای سطح کیفیت خدمات، کشف بر خط مسیرهای بهینه، میانگین کمتر تأخیر انتها به انتها و مسیریابی بهینه‌تر موردبررسی قرارگرفته شده است.
[14]-[18]	شبکه اقتضایی	بهینه‌سازی مصرف انرژی و عملکرد شبکه	با استفاده از بهینه‌سازی طراحی بین لایه‌ای بهینه‌سازی مصرف انرژی و عملکرد شبکه موردبررسی قرارگرفته شده است.
[19]	شبکه اقتضایی	مسیریابی و تخصیص پایور منابع	با استفاده از بهینه‌سازی طراحی بین لایه‌ای تخصیص پایور منابع، زیر حامل، توان ضمن کنترل نرخ و مسیریابی در یک شبکه اقتضایی چند ورودی و چند خروجی انبوه انجام‌گرفته شده است.
[20]	شبکه اقتضایی	زمان تأخیر کم و کاهش قدرت محاسباتی موردنیاز	با استفاده از بهینه‌سازی طراحی بین لایه‌ای
[21]	شبکه اقتضایی	افزایش سرعت همگرایی	با استفاده از طراحی بین لایه‌ای و دوگان لاگرانژ
[22]-[23]	شبکه اقتضایی	زمان تأخیر کم و کاهش قدرت محاسباتی موردنیاز	با استفاده از بهینه‌سازی طراحی بین لایه‌ای
[24]	شبکه اقتضایی	مدیریت متمرکز طیف	با استفاده از بهینه‌سازی طراحی بین لایه‌ای
[25]-[28]	شبکه اقتضایی	افزایش سرعت همگرایی، کاهش تأخیر پردازش، کاهش مصرف انرژی و افزایش کیفیت خدمات	با استفاده از بهینه‌سازی طراحی بین لایه‌ای و محاسبات کوانتومی و ابری
[29]-[30]	شبکه اقتضایی	مدولاسیون تطبیقی، ذخیره‌سازی بی‌سیم و بارگذاری داده‌ها	با استفاده از بهینه‌سازی طراحی بین لایه‌ای و یادگیری تقویتی ماشین

نتیجه‌گیری

در این مقاله تخصیص بهینه منابع رادیویی در شبکه‌های رادیویی اقتضایی که دارای هم‌بندی پویا هستند از دیدگاه‌های چارچوب‌های بهینه‌سازی و مسیریابی موردبررسی قرارگرفته شد. کارهای انجام‌شده در طراحی بین لایه‌ای، باهدف

[۴۸] Artificial intelligence

[۴۹] Deep reinforcement learning

www.SID.ir

Archive of SID

بهینه‌سازی در مصرف انرژی و عملکرد شبکه موردبررسی قرارگرفته شد. سه‌گام کلیدی، ۱) درک مدل سیستم و متغیرهای مختلفی که روی آن تأثیر می‌گذارد، ۲) انتخاب یک تابع هدف به‌عنوان معیار عملکرد مدل سیستم و ۳) انتخاب مقدار متغیرهای مدل سیستم که موجب بهینه‌سازی آن می‌شود، موردبررسی قرار گرفت. مسئله‌های بهینه‌سازی شبکه‌های رادیویی در قالب مسئله‌های بهینه‌سازی یک هدفه یا چندهدفه طرح می‌گردند. کارهای جدیدی که در هرکدام از روش‌ها در حوزه شبکه‌های رادیویی اقتضایی صورت گرفته موردبررسی قرار گرفت. ابزارهای بهینه‌سازی مانند بهینه‌سازی محدب و هندسی بر پایه ریاضیات تا ابزارهای نوینی مانند یادگیری تقویتی ماشین، بر پایه هوش مصنوعی و کارهای انجام‌شده با استفاده از این ابزارها در شبکه‌های رادیویی اقتضایی موردبررسی قرار گرفت. با بررسی کارهایی که از روش یادگیری تقویتی عمیق استفاده کرده‌اند نشان دادیم که با اخذ بازخورد تصمیم از سیستم، در کنترل و مدیریت هزینه‌ها می‌توانیم تأثیر به سزایی داشته باشیم. تکنیک یادگیری تقویتی عمیق می‌تواند راهکار کارآمدی برای تخصیص منابع و مسیریابی در محیط پیچیده شبکه‌های نسل بعد باشد و با ایجاد یک حلقه بازخورد بین تصمیم و عملکرد سیستم موجب اصلاح و بهینه شدن تصمیم‌ها گردد.

مراجع

[1] M. Cooper, "The Myth of Spectrum Scarcity," Tech. rep. DYNA llc. url: https://ecfsapi.fcc.gov/file/7020396128.pdf., 2010.

[2] Ericsson, "Ericsson mobility report," Tech. rep. url: http://www.ericsson.com/mobility-report, 2017.

[3] T. Hu, Y. Wang, X. Liao, J. Zhang and Q. Song, "OFDM-OAM Modulation for Future Wireless Communications," *IEEE Access,* vol. 7, no. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2915035, pp. 59114-59125, 2019.

[4] M. Karray, "Analytical Evaluation of QoS in the downlink of OFDMA wireless cellular networks serving streaming and elastic traffic," *IEEE Transactions on Wireless Communications,* vol. 9, no. 5, pp. 1799-1807, May. 2010.

[5] A. Boukerche, Algorithms and Protocols for Wireless, Mobile Ad Hoc Networks, A. Y. Zomaya, Ed., Canada: Wiley-IEEE Press, 2009.

[6] C. Guo, L. Liang and G. Li, "Resource Allocation for High-Reliability Low-Latency Vehicular Communications With Packet Retransmission," *IEEE Transactions on Vehicular Technology,* vol. 68, no. 7, pp. 6219-6230, July 2019.

[7] O. Oubbati, M. Atiquzzaman, P. Lorenz, M. Tareque and M. Hossain, "Routing in Flying Ad Hoc Networks: Survey, Constraints, and Future Challenge Perspectives," *IEEE Access,* vol. 7, pp. 81057-81105, 2019.

[8] J. Jagannath, S. Furman, T. Melodia and A. Drozd, "Design and Experimental Evaluation of a Cross-Layer Deadline-Based Joint Routing and Spectrum Allocation Algorithm," *IEEE Transactions on Mobile Computing,* vol. 18, no. 8, pp. 1774-1788, Aug. 2019.

[9] E. Royer and C.-K. Toh, "A review of current routing protocols for Ad Hoc mobile wireless networks," *IEEE Personal Communications,* vol. 6, no. 2, pp. 46-55, April 1999..

[10] S. Vashik Ali, W. Jeyaseelan and S. Hariharan, "Enhanced route discovery in Mobile Adhoc Networks," in *2012 Third International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT'12)*, Coimbatore, 2012.

[11] M. Arafat and S. Moh, "Routing Protocols for Unmanned Aerial Vehicle Networks: A Survey," *IEEE Access,* vol. 7, pp. 99694-99720, 2019.

[12] O. Oubbati, M. Atiquzzaman, P. Lorenz, M. Tareque and M. Hossain, "Routing in Flying Ad Hoc Networks: Survey, Constraints, and Future Challenge Perspectives," *IEEE Access,* vol. 7, pp. 81057-81105, 2019.

[13] A. Al-Saadi, R. Setchi, Y. Hicks and S. Allen, "Routing Protocol for Heterogeneous Wireless Mesh Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology,* vol. 65, no. 12, pp. 9773-9786, Dec. 2016.

[14] A. Ejmaa, S. Subramaniam, Z. Zukarnain and Z. Hanapi, "Neighbor-Based Dynamic Connectivity Factor Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Network," *IEEE Access,* vol. 4, pp. 8053-8064, 2016.

[15] M. Y. Arafat and S. Moh, "Localization and Clustering Based on Swarm Intelligence in UAV Networks for Emergency Communications," *IEEE Internet of Things Journal (Early Access),* vol. 10.1109/JIOT.2019.2925567, 2019.

[16] S. Shimly, D. Smith and S. Movassaghi, "Experimental Analysis of Cross-layer

www.SID.ir

Archive of SID

Hoc Networks," *IEEE Access,* vol. 7, pp. 17133-17148, 2019.

[26] L. Jun, "A cross-layer routing optimization method in Wireless Mesh Network," in *2013 IEEE 4th International Conference on Software Engineering and Service Science*, Beijing, 2013.

[27] A. Awang, K. Husain, N. Kamel and S. Aïssa, "Routing in vehicular ad-hoc networks: A survey on single- and cross-layer design techniques and perspectives," *IEEE Access,* vol. 5, pp. 9497-9517, 2017.

[28] K. Ghanshala, S. Sharma, S. Mohan, L. Nautiyal, P. Mishra and R. Joshi, "Self-Organizing Sustainable Spectrum Management Methodology in Cognitive Radio Vehicular Adhoc Network (CRAVENET) Environment: A Reinforcement Learning Approach," in *2018 First International Conference on Secure Cyber Computing and Communication (ICSCCC)*, Jalandhar, India, 2018.

[29] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y. Nam and M. Debbah, "A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems," *IEEE Communications Surveys & Tutorials,* vol. 21, no. 3, pp. 2334-2360, thirdquarter 2019.

[30] J. Zhang, T. Chen, S. Zhong, J. Wang, W. Zhang, X. Zuo and R. Maunder, "Aeronautical Ad~Hoc Networking for the Internet-Above-the-Clouds," *Proceedings of the IEEE,* vol. 17, no. 5, pp. 868-911, May 2019.

[31] J. Baliga, R. Ayre, K. Hinton and R. Tucker, "Green Cloud Computing: Balancing Energy in Processing, Storage, and Transport," *Proceedings of the IEEE,* vol. 99, no. 1, pp. 149-167, Jan. 2011.

[32] M. Hirvensalo, Quantum Computing, Berlin: Springer, 2013.

[33] K. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang and Y. Zhang, "The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks," *IEEE Communications Magazine,* vol. 57, no. 8, pp. 84-90, August 2019.

[34] N. Luong, D. Hoang, S. Gong, D. Niyato, P. Wang, Y. Liang and D. Kim, "Applications of Deep Reinforcement Learning in Communications and Networking: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials (Early Access),* vol. DOI: 10.1109/COMST.2019.2916583, May 2019.

Optimization for Distributed Wireless Body-to-Body Networks," *IEEE Sensors Journal (Early Access),* vol. 10.1109/JSEN.2019.2937356, 2019.

[17] Z. Mammeri, "Reinforcement Learning Based Routing in Networks: Review and Classification of Approaches,," *IEEE Access,* vol. 7, pp. 55916-55950, 2019.

[18] W. Feng, Y. Xu, X. Xu, M. Zhao and Y. Yao, "An Energy-Efficient and Fast Convergent Resource Allocation Algorithm in Distributed Wireless Ad Hoc Networks," *IEEE Access,* vol. 7, pp. 17133-17148, 2019.

[19] Z. Bai, L. Ma, Y. Dong, P. Ma and Y. Ma, "Energy-Efficient Resource Allocation for Secure Cognitive Radio Network With Delay QoS Guarantee," *IEEE Systems Journal,* vol. 13, no. 3, pp. 2795-2805, Sept. 2019.

[20] A. Banerjee, A. Paul and S. Maity, "Joint Power Allocation and Route Selection for Outage Minimization in Multihop Cognitive Radio Networks with Energy Harvesting," *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking,* vol. 4, no. 1, pp. 82-92, Mar. 2018.

[21] R. Gohary and T. Willink, "Joint routing and resource allocation via superposition coding for wireless data networks," *IEEE Transactions on Signal Processing,* vol. 58, no. 4, pp. 6387-6399, 2010.

[22] I. Nosheen, S. Khan and F. Khalique, "A Mathematical model for Cross-layer protocol optimizing performance of software-defined radios in tactical networks," *IEEE Access,* vol. 7, pp. 20520-20530, 2019.

[23] H. Kordbacheh, H. Dalili Oskouei and N. Mokari, "Robust Cross-Layer Routing and Radio Resource Allocation in Massive Multiple Antenna and OFDMA-Based Wireless Ad-Hoc Networks," *IEEE Access,* vol. 7, pp. 36527-36539, 2019.

[24] M. Basavarajaiah and P. Sharma, "Cross Layer Optimization for Wireless Video Transmission Using Machine Learning," in *2018 7th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)*, Noida, India, 2018.

[25] W. Feng, Y. Xu, X. Xu, M. Zhao and Y. Yao, "An Energy-Efficient and Fast Convergent Resource Allocation Algorithm in Distributed Wireless Ad

www.SID.ir