

بهبود گذردهی در شبکه‌های توری بی‌سیم رادیوشناختی چندرادیویی چندکاناله مشارکتی

فهمیه آقایی^(۱) - آوید آوخ^(۲)

(۱) کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
(۲) استادیار - باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۸/۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۶/۹

خلاصه: امروزه، فن‌آوری رادیو شناختی با هدف بهره‌وری پویا از منابع رادیویی در دسترس، به‌عنوان الگوی جدیدی برای شبکه‌های مخابراتی محسوب می‌شود. ویژگی ناهمگونی در دستیابی به طیف فرکانسی در بین کاربران یک شبکه رادیوشناختی، منجر به ارسال بسته‌های داده از طریق کانال‌های چندگانه و در نتیجه، کاهش گذردهی شبکه خواهد شد. این مسأله، در حضور ترافیک‌های چندپخششی با چالش‌های بیشتری مواجه می‌گردد. هدف اصلی این مقاله، کاهش دوره زمانی ترافیک‌های چندپخششی در شبکه‌های توری بی‌سیم رادیوشناختی چندکاناله است. لذا، سعی بر آن است که با بهره‌گیری توأم از سیاست‌های کارآمد زمان‌بندی چندپخششی، ویژگی همه‌پخششی در شبکه‌های بی‌سیم، کدگذاری و روش‌های مشارکتی اعضای یک گروه و اعضای گروه‌های مختلف شبکه، به بهبود قابلیت اجرایی شبکه پردازیم. در این راستا، با اختصاص دادن رادیوهای چندگانه به هر کاربر شبکه، امکان ارسال و دریافت همزمان روی کانال‌های مختلف را فراهم می‌نماییم. در انتها، برای شرایطی که هیچ طیف فرکانسی جهت برقراری ارتباط مستقیم یک کاربر با مسیریاب مرکزی وجود نداشته باشد، به کمک روش‌های مشارکتی در کنار ویژگی همه‌پخششی در شبکه‌های بی‌سیم راهکار جدیدی ارائه می‌کنیم تا علاوه بر حفظ معیار پایداری به بهبود گذردهی شبکه نیز منجر شود.

کلمات کلیدی: شبکه‌های توری بی‌سیم رادیوشناختی، رادیوهای چندگانه، زمان‌بندی چندپخششی، کدگذاری.

Throughput Improvement in Multi Radio Multi Channel Wireless Cognitive Radio Mesh Networks

Fahimeh Aghaei⁽¹⁾ – Avid Avokh⁽²⁾

(1) MSc-Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Isfahan, Iran

aghaei@sel.iaun.ac.ir

(2) Assistant Professor-Young Researchers and Elite club, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Isfahan, Iran

aavokh@pel.iaun.ac.ir

The classic spectrum management methods cannot efficiently supply the future multicast traffic demands. Recently, the cognitive radio technology has emerged as a promising solution to enhance the spectrum utilization. However, the potential heterogeneity in channel availability among the network users leads to send the packets through multiple channels. This significantly decreases the network throughput. The main goal of this paper is to reduce the multicast period in a single-cell and multi-channel wireless mesh cognitive radio network. In this regard, we jointly exploit the multicast scheduling policies, the intra-groups and inter-groups assistance strategies, and the Wireless Broadcast Advantage (WBA). Based on WBA, a single transmission of a node can simultaneously cover multiple neighboring receivers. In addition, by assigning multiple radios to each network user, we allow the nodes to simultaneously transmit/receive the packets on distinct channels. Numerical results of our comprehensive simulations demonstrate the efficiency of the proposed scheme in term of the network throughput.

Index Terms: Wireless cognitive radio mesh networks, multi radio, multicast period, network coding.

نویسنده مسئول: آوید آوخ، استادیار - باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، aavokh@pel.iaun.ac.ir

۱- مقدمه

با توجه به رشد روزافزون مخابرات بی‌سیم و افزایش تقاضای پهنای باند توسط کاربران، استفاده بهینه از طیف رادیویی و منابع شبکه امری اجتناب ناپذیر است. اندازه‌گیری‌های انجام شده در چند مرکز تحقیقاتی از جمله مرکز تحقیقاتی برکلی BNRC^۱، حاکی از وجود بخش‌های بدون استفاده زیادی در میان طیف‌های تخصیص داده شده به کاربران اولیه^۲ است [۱]. در این راستا، مهمترین چالش مطرح سهمیه کردن کاربران ثانویه^۳ در طیف‌های دارای مجوز^۴، بدون ایجاد تداخل برای کاربران اولیه است. بدین صورت، کاربران ثانویه می‌توانند از «فضاهای فرکانسی»^۵ و یا «فضاهای سفید»^۶ بدون استفاده بهره بگیرند [۲].

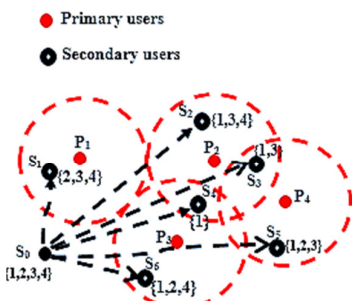
منظور از کاربران اولیه، کاربرانی هستند که مجوز استفاده از طیف فرکانسی را در زمان‌های مختلف در اختیار دارند. همچنین، هرگاه طیف فرکانسی به طور موقت در اختیار کاربران باشد؛ آن‌ها را کاربران ثانویه می‌نامیم. نکته قابل ذکر این است که اگر یک حفره فرکانسی مجدداً توسط کاربر اولیه استفاده شود، کاربر ثانویه به حفره‌ی فرکانسی دیگری منتقل می‌شود. بنابراین، از مهم‌ترین نیازهای شبکه‌های رادیوشناختی، ارزیابی^۷ حفره‌های فرکانسی است [۳و۴]. اخیراً، مشارکت^۸ بین کاربران ثانویه ضمن تسهیل روند جابه‌جایی بسته‌های اطلاعاتی از طریق گره رله، منجر به تعامل بهتر اطلاعات ارزیابی شده نیز می‌شود. از سوی دیگر، با الهام از فن‌آوری کدگذاری شبکه، گره رله قادر خواهد بود تا به‌جای ارسال محض و بدون تغییر اطلاعات دریافت شده، آنها را در ترکیب با بسته‌های داده خود و یا سایر منابع، ارسال کند [۵و۶].

به طور کلی، اجزاء اصلی شبکه‌های رادیوشناختی، ایستگاه‌های مرکز BS^۹، کاربران متحرک MU^{۱۰} و هسته یا ستون فقرات شبکه^{۱۱} می‌باشند. این سه جزء اصلی، در شکل‌گیری ساختارهای مختلف شبکه‌های رادیوشناختی به صورت فراساختاری^{۱۲}، اقتضایی^{۱۳} و توری^{۱۴} شرکت می‌کنند [۷]. بسیاری از مراجع [۸و۹] مفهوم رادیوشناختی-توری را به عنوان ضرورتی برای پیاده‌سازی روش‌های خودمدیریتی^{۱۵} و خودتنظیمی^{۱۶} در شبکه بیان می‌کنند تا مدیریت پیچیدگی‌های محیط شبکه تأمین شود. بدین صورت، از توانایی شناختی برای شناسایی محیط شبکه و از ساختار توری برای فراهم آوردن درجه اطمینان^{۱۷} و افزایش مقیاس‌پذیری^{۱۸} شبکه استفاده می‌شود. امروزه، مسئله‌ی ترافیک‌های چندپخش به عنوان یکی از مهمترین فن‌آوری‌های در حال توسعه برای کاهش زمان ارسال داده، حجم ترافیک شبکه و جلوگیری از ارسال بسته‌های تکراری ارائه می‌شود [۱۰و۱۱].

در ترافیک چندپخش، بسته داده ارسال شده از فرستنده توسط تمام گیرنده‌های متعلق به یک گروه و یا یک درخت چندپخش دریافت می‌شود. توزیع گسترده صدا و تصویر، برگزاری کنفرانس‌های از راه دور، مکان‌یابی سرویس‌های ارائه دهنده خدمات و جابه‌جایی اطلاعات به-دست آمده از دوربین‌های مدار بسته مثال‌های کاربردی استفاده از

ترافیک چندپخش در شبکه‌های مخابراتی هستند. اما این مسئله در شبکه‌های رادیوشناختی به دلیل ویژگی ناهمگونی^{۱۹} بالقوه در دستیابی کاربران ثانویه به کانال، متفاوت از مسایل ترافیک چندپخش در شبکه‌های مرسوم بی‌سیم است. علاوه بر آن، دسترسی به کانال برای کاربران شبکه‌های رادیوشناختی وابسته به زمان و مکان است؛ برای روشن‌تر شدن مسئله، شکل (۱) در نظر بگیرید. در این شکل، چهار کاربر اولیه P_1, P_2, P_3, P_4 مشخص شده که هر کدام از یک کانال مخابراتی استفاده می‌کنند. دایره‌های خط‌چین قرمز رنگ به مرکز هر کاربر اولیه، حاکی از منطقه تحت پوشش برد مخابراتی آن کاربر است. بنابراین، هنگامی که هر کاربر ثانویه‌ای در این مناطق قرار گیرد، اجازه استفاده از کانال آن کاربر اولیه را نخواهد داشت؛ زیرا مهم‌ترین شرط در ساختار شبکه‌های رادیوشناختی، عدم ایجاد تداخل برای کاربران اولیه است. در این شکل، ۷ کاربر ثانویه وجود دارند که S_1 به‌عنوان فرستنده ترافیک چندپخش است و سایر کاربران به‌عنوان گیرنده در نظر گرفته می‌شوند. مجموعه کانال‌های قابل دسترس برای هر کاربر ثانویه که در کنار گره‌ی مربوطه نشان داده شده است، بیانگر وابستگی کانال‌های در دسترس به موقعیت مکانی آن کاربر است. به عنوان مثال، فرض کنید در بخش زمانی^{۲۰} مشخصی کاربر اولیه P_4 از کانال خود (کانال ۱۴) استفاده نکند؛ در نتیجه، تمامی کاربران ثانویه‌ای که به این کانال دستیابی دارند، قادر به ارسال بسته اطلاعاتی خود از کانال مربوطه هستند. اما هنگامی که P_4 به طیف فرکانسی خود بازگردد، کاربران ثانویه‌ی در حال استفاده از کانال ۱۴، باید از کانال‌های دیگری برای برقراری ارتباط استفاده کنند. در این شرایط، با به‌کارگیری الگوریتم‌های زمان‌بندی^{۲۱} مناسب، قادر به مدیریت ارسال‌های چندپخش خواهیم بود. در واقع، الگوریتم‌های زمان‌بندی در هر بخش-زمانی با توجه به کانال‌های در دسترس هر کاربر مشخص می‌کنند که کدام یک از کاربران ثانویه اجازه ارسال اطلاعات بدون ایجاد تداخل برای کاربران اولیه، خواهند داشت.

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، ویژگی مشهود شبکه‌های رادیوشناختی، ناهمگونی بالقوه در دستیابی به کانال بین کاربران ثانویه است. به علت این ویژگی، با چالش تزلزل قابل توجه در گذردهی^{۲۲} ترافیک چندپخش روبه‌رو خواهیم شد [۱۲].



شکل (۱): ویژگی ناهمگونی در دستیابی به کانال در شبکه‌های رادیوشناختی [۱۳]

Fig. (1): The heterogeneity property in CRNs [13].

خواهد کرد و از سوی دیگر، در پیاده‌سازی فاز سوم که شامل تعدادی کانال مسدود شده^{۲۰} بین مسیریاب مرکزی سلول و برخی کاربران ثانویه است، مفید واقع می‌شود. در فاز اخیر، با بهره‌گیری از روش‌های مشارکتی ارائه شده، اثر مسدود شدن یک کانال فرکانسی بر افزایش تعداد بخش‌های زمانی ترافیک چندپخش کاهش می‌یابد و منجر به بهبود گذردهی شبکه می‌شود.

ساختار این مقاله بر چندین بخش استوار است: بخش دوم، به مرور کارهای مرتبط با مقاله می‌پردازد. در بخش سوم، مدل شبکه و مفروضات آن مطرح می‌شود. بخش چهارم، به تشریح سه فاز اصلی مقاله می‌پردازد. نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی‌ها در بخش پنجم بررسی می‌شوند و سرانجام در بخش ششم، نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مطالب ارائه خواهد شد.

۲- کارهای مرتبط

ترافیک چندپخش، یکی از مهمترین فن‌آوری‌های در حال توسعه است که منجر به کاهش استفاده از پهنای باند، کاهش زمان ارسال داده‌ها به گره‌های مقصد و در نهایت، کاهش حجم ترافیک در شبکه می‌شود. در [۱۵]، الگوریتم‌ها، پروتکل‌ها و سیاست‌های ترافیک چندپخش برای شبکه‌های رادیوشناختی ارائه شده است.

چالش اصلی ترافیک‌های چندپخش، ویژگی دسترسی ناهمگون به کانال‌های فرکانسی در گره‌های شبکه رادیو شناختی است. این امر باعث می‌شود، گره‌های شبکه به کانال‌های مختلفی دسترسی داشته باشند در نتیجه، زمان ارسال در ترافیک چندپخش طولانی‌تر و گذردهی شبکه کاهش می‌یابد [۱۵]. در این راستا، حداقل‌سازی زمان ترافیک چندپخش در یک سلول از شبکه توری شناختی به وسیله‌ی زمان‌بندی در هر دو حوزه‌ی زمان و فرکانس و با بهره‌گیری از فن‌آوری کدگذاری شبکه در [۱۲] مطرح شده است. همچنین، مرجع [۱۶] یک طرح زمان‌بندی چندپخش توأم، شامل کنترل توان و سیاست‌های تخصیص کانال ارائه می‌دهد.

کدگذاری شبکه، به عنوان یک فن‌آوری امیدبخش به منظور ارتقاء گذردهی شبکه و فراهم کردن حفاظت و بقای شبکه‌های بی‌سیم است. مرجع [۱۷]، مسئله کدگذاری شبکه را با بهره‌گیری از مخابرات چندپرسی و ترافیک چندپخش در شبکه‌های رادیوشناختی بررسی می‌کند.

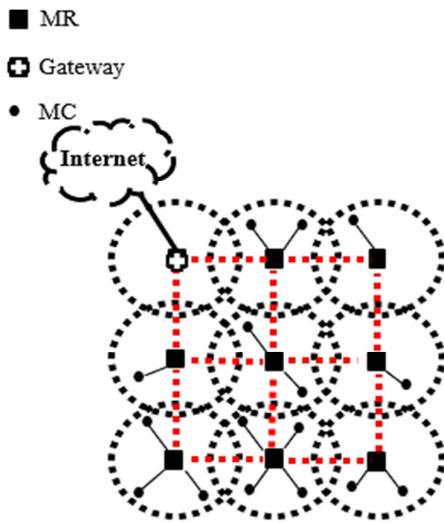
با الهام از شبکه‌های رله^{۲۱} به منظور افزایش گذردهی شبکه و پوشش بهتر، شبکه‌های رادیو شناختی متکی بر گره‌های رله پیشنهاد شدند [۱۸ و ۱۹]. تحقیقات تکمیل یافته پس از آن، به گره رله اجازه می‌دهد تا اطلاعات خود را در ترکیب با بسته‌های داده دریافتی ارسال کند. نکته‌ی قابل توجه، مشارکت بین کاربران ثانویه علاوه بر همکاری با کاربران اولیه است که منجر به بهبود گذردهی در شبکه کاربران ثانویه نیز می‌شود [۱۳].

در همین زمینه، مراجع [۱۳ و ۱۴] مسئله‌ی حداقل‌سازی تعداد بازه‌های زمانی در ترافیک چندپخش را برای یک شبکه توری شناختی چندکاناله^{۲۲}، به وسیله‌ی زمان‌بندی ارسال چندپخش^{۲۴} در هر دو حوزه‌ی زمان و فرکانس با بهره‌گیری از فن‌آوری کدگذاری شبکه مطرح می‌کنند. اما در هیچ‌یک از این مراجع، نقش‌ویژگی همه‌پخش شبکه‌های بی‌سیم WBA^{۲۵} در مشارکت اعضای داخلی یک گروه چندپخش^{۲۶} و مشارکت اعضای گروه‌های مختلف با یکدیگر^{۲۷} مطرح نمی‌شود. همچنین، استفاده از رادیوهای چندگانه^{۲۸} برای هر کاربر توأم با WBA، به عنوان راه‌حلی مناسب در جهت افزایش گذردهی شبکه مورد توجه قرار نمی‌گیرد. منظور از WBA، بهره‌گیری از ماهیت بی-سیم رسانه انتقال در ارسال اطلاعات به گره‌هایی از شبکه است که تنها در فاصله یک پرش از گره فرستنده قرار گرفته‌اند. در شبکه‌های رادیوشناختی به این تعریف شرط دسترسی همزمان گره‌های مربوطه به یک کانال فرکانسی نیز اضافه می‌شود. به عنوان مثال، مجدداً شکل (۱) را در نظر بگیرید. براساس WBA، هنگامی که فرستنده ترافیک چندپخش بسته‌ی اطلاعاتی را برای کاربر S از طریق کانال ۳ ارسال می‌کند، کاربران R₁، R₂ و R₃ که به طور همزمان به کانال ۳ دسترسی دارند نیز قادر به دریافت بسته‌ی ارسال شده هستند.

علاوه بر چالش‌های فوق، یکی از روش‌های کارآمد برای افزایش گذردهی شبکه، استفاده از رادیوهای چندگانه به منظور امکان ارسال‌ها و دریافت‌های هم‌زمان برای هر گره شبکه است [۱۲]. در کنار رادیوهای چندگانه، توانایی ارسال به حداکثر تعداد کاربرانی که به یک طیف فرکانسی دست یافته‌اند، به منظور استفاده از WBA، به کاهش زمان ترافیک چندپخش کمک خواهد کرد.

هنگامی که کیفیت سرویس^{۲۹} کانال در حال استفاده کاهش یابد و یا کاربر اولیه به طیف فرکانسی خود باز گردد، کاربران ثانویه باید انتقال اطلاعات را متوقف کنند و برای از سرگرفتن ارسال اطلاعاتشان کانال‌های قابل دسترس دیگری پیدا کنند. بنابراین، با مسئله‌ی مسدود شدن طیف فرکانسی مواجه خواهیم شد که به افزایش تعداد بخش‌های زمانی منجر خواهد شد [۱۴]. در این راستا، پیاده‌سازی ساختاری مناسب برای شبکه در کنار بهره‌گیری از روش‌های مشارکتی بین کاربران، یکی از کارآمدترین راه‌حل‌های موجود به حساب می‌آید؛ زیرا علاوه بر حفظ معیار پایداری شبکه منجر به بهبود گذردهی آن نیز می‌شود. در این مقاله، هدف آن است که با بهره‌گیری توأم از سیاست‌های زمان‌بندی مناسب، روش‌های مشارکتی موجود، WBA و استفاده از رادیوهای چندگانه، گذردهی ترافیک چندپخش را در یک سلول از شبکه‌های توری بی‌سیم رادیوشناختی بهبود دهیم. در این راستا، یک ترافیک چندپخش را بر اساس سه فاز بررسی خواهیم کرد. فاز اول شامل مشارکت اعضای یک گروه، مشارکت اعضای گروه‌های مختلف با یکدیگر، استفاده از کدگذاری شبکه و WBA است. در فاز دوم، مسیریاب مرکزی و هر کاربر ثانویه رادیوهای چندگانه مجهز می‌شوند. این مسئله، از یک سو به روش‌های مشارکتی فاز اول کمک

دسترسی داشته باشند. مطابق مدل گراف توصیف شده، برای هر پیوند $e \in E$ شرط (۱) به صورت برقراری نامساوی $\|u-v\| < R$ بیان می‌شود که $\|u-v\|$ فاصله اقلیدسی بین گره‌های u و v و برد مخابراتی گره‌های شبکه R است. همچنین، برای برقراری شرط (۲) لازم است تا انتقال اطلاعات بین دو گره u و v از طریق کانال فرکانسی مشترک $\in C_u \cap C_v$ انجام شود. در طراحی شبکه، کاربران بدون تحرک در نظر گرفته می‌شوند. همچنین، فرض بر آن است MR مرکزی هر سلول به تمامی کانال‌های موجود دسترسی دارد. بنابراین، هر MC قادر است حداقل از طریق یک کانال به تبادل اطلاعات با MR مرکزی سلول خود بپردازد. علاوه بر آن، در مدل پیشنهادی تمامی گره‌های شبکه مجهز به رادیوهای دو-طرفه غیر همزمان^{۳۹} هستند و از توان انتقالی و برد مخابراتی یکسانی استفاده می‌کنند. همچنین، همگام با سایر مراجع، فرض بر آن است که تمامی کاربران یک سلول در منطقه تداخلی یکدیگر قرار دارند. بنابراین، کاربران واقع در یک سلول نمی‌توانند به طور همزمان از یک کانال در دسترس استفاده کنند. به طور کلی، سیاست‌های زمان‌بندی در راستای دو هدف مطرح می‌شوند.



شکل (۲): شبکه توری بی‌سیم رادیوشناختی

Fig.(2): A typical cognitive radio wireless mesh network.

ابتدا، رعایت انصاف^{۴۰} در میان پیوندهای مختلف که منجر به طراحی بخش‌های زمانی با طول یکسان می‌شود. اگر فرض شود که در هر بخش زمانی هر گره، P بسته‌ی اطلاعاتی با طول ثابت L را به همسایگانش ارسال کند، گذردهی برای هر گره به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\rho = \frac{P \times L}{T \times t_s} \quad (1)$$

به طوری که t_s طول هر بخش زمانی و T تعداد کل بخش‌های زمانی در هر دوره‌ی زمان‌بندی^{۴۱} است. به این ترتیب، T/t_s بیان‌کننده‌ی کل زمان موردنیاز برای ارسال بسته‌های اطلاعاتی در یک دوره‌ی زمان-بندی است.

از مسائل اساسی که باید در بررسی شبکه‌های رادیو شناختی چند-پرسی مطالعه شود، مسأله مسیریابی در شبکه است. علت این اهمیت در تفاوت الگوریتم‌های مسیریابی شبکه‌های چندپرسی شناختی از الگوریتم‌های مسیریابی مشابه در شبکه‌های چندپرسی متداول است که مراجع [۲۰ و ۲۱] به این تفاوت‌ها اشاره دارند. به دنبال طراحی‌های بین لایه‌ای، بسیاری از مطالعات مسئله‌ی تخصیص کانال و زمان‌بندی را به طور توأم با مسیریابی در شبکه‌های توری شناختی چندپرسی مطرح می‌کنند [۲۲]. علاوه بر آن در [۲۳] سعی شده است تا مقیاس-پذیری پروتکل‌های مسیریابی چندپرسی مبتنی بر تقاضا ODMRP^{۳۲}، برحسب تعداد گره‌های منبع در ترافیک چندپرسی شبکه‌های اقتصادی بی‌سیم، با استفاده از رادیوشناختی بهبود یابد. همچنین، یک رویکرد توزیع یافته بین لایه‌ای با عنوان MP-JSRCA^{۳۳}، با هدف افزایش گذردهی شبکه و جلوگیری از تداخل‌های بین جریان‌های داده و درون یک جریان داده بوسیله‌ی طراحی مسیره‌های پایدار به طور مشترک با روش‌های تخصیص کانال در [۲۵] ارائه شده است. همانطور که اشاره شد، یکی از روش‌های کارآمد در افزایش گذردهی و ظرفیت شبکه، استفاده از رادیوهای چندگانه برای هر گره است که به گره‌ها اجازه می‌دهد ارسال‌ها و دریافت‌های همزمان داشته باشند. در [۲۷]، مسئله بهینه‌سازی گذردهی شبکه به صورت توأم با تخصیص کانال و فرض پروتکل CSMA/CA، بررسی شده است.

۳- مدل شبکه

مطابق شکل (۲)، شبکه توری بی‌سیم رادیوشناختی مشتمل بر n مسیریاب توری MR^{۳۴} را در نظر بگیرید. هر یک از این مسیریاب‌ها، گروهی از مشترکین توری MC^{۳۵} را مدیریت می‌کنند؛ به طوری که ساختار توری اتصالات بین آنها امکان دسترسی به گره‌ی دروازه^{۳۶} را به شیوه‌ی مخابرات چندپرسی^{۳۷} به منظور اتصال به شبکه‌های سیمی فراهم می‌سازد. همچنین، مشترکین شبکه از طریق گره‌های واسط به صورت مخابرات چندپرسی و یا به طور مستقیم به مسیریاب مرکزی سلول خود دسترسی دارند. در این راستا، شبکه به صورت یک گراف جهت‌دار $G=(V,E)$ مدل می‌شود به طوری که هر رأس v از مجموعه‌ی V متناظر با یک گره و مجموعه‌ی E ، بیانگر پیوندهای اتصال‌دهنده‌ی بین هر دو گره شبکه است. از آنجایی که شبکه مد نظر با شبکه‌های شامل کاربران اولیه همزیستی دارد، در هر بخش زمانی مجموعه‌ای از کانال‌های بدون هم‌پوشانی^{۳۸} C_v ، در اختیار هر گره v قرار می‌گیرد.

این مجموعه شامل کانال‌های بلا استفاده کاربران شبکه اولیه است که پس از ارزیابی طیف فرکانسی در لایه‌ی فیزیکی [۲۶]، هر کاربر شبکه ثانویه از آنها به صورت فرصت‌طلبانه برای ارسال اطلاعات خود بهره می‌برد. برقراری پیوند مستقیم بین هر دو گره u و v در شبکه مستلزم دو شرط زیر است:

(۱) هر دو گره u و v در برد مخابراتی یکدیگر باشند.

(۲) هر دو گره فرستنده و گیرنده به حفره‌ی فرکانسی یکسانی

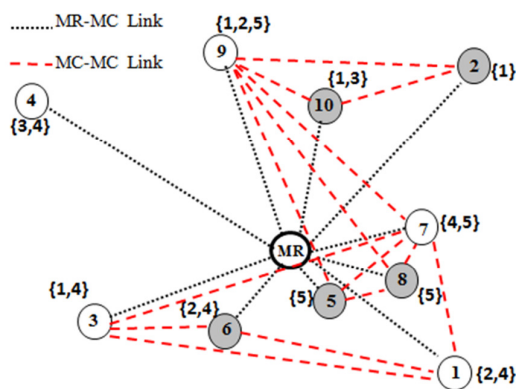
۴-۲- فاز اول

در فاز اول، مسئله‌ی زمان‌بندی ترافیک چندبخشی با فرض تنها یک رادیو در هر گره بررسی می‌شود. در این فاز لازم است که دو شرط اساسی در تمامی مراحل برقرار شود:

(۱) در هر بخش‌زمانی، از هر گره شبکه و در هر کانال حداکثر یک انتقال صورت گیرد.

(۲) برای انتقال کلمه کد، فرستنده باید در بخش‌های زمانی قبل، مجموعه کلمات تشکیل‌دهنده کلمه کد را در اختیار داشته باشد.

همانگونه که ذکر شد، استفاده از یک رادیو برای هر گره شبکه محدودیت دریافت و ارسال همزمان اطلاعات را به‌همراه خواهد داشت. همچنین، در برخی موارد چیدمان گره‌های شبکه به‌گونه‌ای است که وجود تنها یک رادیو برای هر کاربر، امکان استفاده از روش‌های مشارکتی موجود را فراهم نخواهد کرد. بنابراین، استفاده از سیاست‌های مشارکتی منجر به کاهش تعداد بخش‌های زمانی ترافیک چندبخشی نسبت به حالت عدم استفاده از آنها خواهد شد. در ادامه، با بیان یک مثال به تشریح واضح‌تر این فاز می‌پردازیم. مطابق شکل (۳)، یک شبکه توری بی‌سیم رادیوشناختی تک رادیویی چندکاناله را در نظر بگیرید؛ فرض کنید ۱۰ کاربر ثانویه (گره‌های ۱ تا ۱۰) در دو گروه افزاز شوند و تعداد کانال‌های در دسترس برای کاربران این شبکه ۵ کانال باشد. گره‌های سفید رنگ گروه اول، کاربران $\{N_1, N_3, N_4, N_7, N_9\}$ ، بسته‌های اطلاعاتی a را دریافت می‌کنند و گره‌های خاکستری رنگ گروه دوم، کاربران $\{N_2, N_5, N_6, N_8, N_{10}\}$ ، علاقه‌مند به دریافت بسته‌ی اطلاعاتی b هستند.



شکل (۳): شبکه توری بی‌سیم رادیوشناختی تک رادیویی چندکاناله.

Fig.(3): A typical single-radio multi-channel cognitive radio wireless mesh network.

همچنین، فرض بر آن است که مسیریاب مرکزی به تمامی کانال‌های فرکانسی در دسترس کاربران ثانویه شبکه دسترسی دارد و تمامی کاربران نیز در برد مخابراتی آن قرار دارند. لذا، در این شکل اتصالات نقطه چین مشکی رنگ، ارتباط بین MR و همه‌ی MCها را نشان می‌دهند. در این صورت، تعداد کل بخش‌های زمانی ارسال از MR با در نظر گرفتن WBA، به صورت زیر بیان می‌شود:

اما ایده‌ی اصلی طراحی سیاست‌های زمان‌بندی، ارسال حداکثر بسته‌های اطلاعاتی در یک بخش زمانی است. بنابراین، با استفاده از سیاست‌های زمان‌بندی مناسب، تعداد کل بخش‌های زمانی (T) در هر دوره‌ی زمان‌بندی کاهش می‌یابد. این مهم امکان پذیرش ترافیک‌های آتی را بیشتر فراهم کرده و منجر به افزایش گذردهی شبکه می‌شود.

۴- بیان مسأله

در این بخش، ابتدا تعاریف اصلی زمان‌بندی چندبخشی و عملکردهای مشارکتی را بیان می‌کنیم. سپس، به تشریح سه فاز اصلی مسأله خواهیم پرداخت. در فاز اول، از یک رادیو برای انتقال بسته‌های اطلاعاتی با طول ثابت، در هر گره (MR و MCS) استفاده می‌کنیم. در ادامه با بیان مثالی از یک شبکه توری بی‌سیم رادیوشناختی تک-رادیویی چندکاناله، روش پیشنهادی به‌منظور افزایش گذردهی شبکه در فاز دوم و سوم مطرح می‌شود. در این راستا، گره‌های شبکه در فاز دوم به رادیوهای چندگانه مجهز می‌شوند و سپس در فاز آخر، هنگامی که یک یا چند کانال فرکانسی مسدود شوند؛ اثر استفاده از روش‌های مشارکتی بررسی خواهد شد.

لازم به ذکر است، اگرچه استفاده از رادیوهای چندگانه و بحث مشارکت برخی پروتکل‌های ارسال و دریافت را پیچیده و بار محاسباتی گره‌ها را افزایش می‌دهد، اما با توجه به مصالحه‌ایی که تقریباً در تمامی مباحث مخابراتی شاهد آن هستیم؛ این هزینه‌ها قابل چشم‌پوشی هستند. از سوی دیگر با توجه به اثر چشم‌گیر عملکردهای بیان شده بر بهبود گذردهی شبکه، هم‌راستا با سایر مراجع معتبر از این پیچیدگی‌ها صرف نظر می‌شود.

۴-۱- تعاریف

زمان‌بندی چندبخشی: زمان‌بندی ترافیک‌های چندبخشی در حوزه‌ی زمان و فرکانس که برای هر یک از اعضای گروه‌های مختلف (MR و MCS) مشخص می‌کند چه بسته‌ای در چه زمانی و از چه کانالی ارسال یا دریافت شود.

دوره‌ی زمانی ترافیک چندبخشی^{۴۲}: تعداد کل بخش‌های زمانی مورد نیاز برای تحویل بسته‌های اطلاعاتی به تمامی کاربران موجود در یک سلول مخابراتی (T).

کلمه کد^{۴۳}: بسته اطلاعاتی کد شده که با به‌کارگیری روش کدگذاری شبکه از یک یا گروهی بسته اطلاعاتی تشکیل شده است.

عملکرد مشارکتی^{۴۴}: فرآیندی که در آن یک کاربر بسته‌ی اطلاعاتی که در بخش‌های زمانی قبل دریافت کرده را به کاربران هم‌گروهی خود و یا به کاربران گروه‌های دیگر منتقل می‌کند. در مورد انتقال کلمه کد، به‌منظور کدبرداری از بسته کدشده لازم است که کاربر مقصد در بخش‌های زمانی قبل، بسته‌های انتقالی غیر از بسته‌ی مورد نیاز خود را با استفاده از WBA به اشتباه دریافت کند.

نامطلوب خود یعنی b را دریافت کرده است، اما پس از ارسال بسته‌ی $a \oplus b$ کد شده توسط MR در بخش زمانی سوم، N_6 با توجه به دریافت اشتباه قبلی خود قادر به کدبرداری از بسته‌ی کدشده‌ی ارسالی می‌باشد. این عملکرد برای کاربر N_6 نیز به همین ترتیب اجرا می‌شود و منجر به کاهش تعداد کل بخش‌های زمانی می‌شود.

۴-۳- فاز دوم

یکی از روش‌های کارآمد در افزایش گذردهی شبکه، استفاده از رادیوهای چندگانه برای هر گره در کنار توانایی به‌کارگیری چند کانال به منظور کاهش تداخل است. در واقع، با تخصیص و تنظیم کانال‌های غیرهم‌پوشان به رادیوهای مختلف، MR و MC‌های شبکه می‌توانند به‌صورت هم‌زمان به ارسال و دریافت در یک بخش زمانی بپردازند. بنابراین، استفاده از چند رادیو و چند کانال، منجر به بهره‌وری کارا از طیف فرکانسی می‌شود. در کنار استفاده از رادیوهای چندگانه، به-کارگیری سیاست‌های مشارکتی موجود، اثر چشمگیری در کاهش تعداد بخش‌های زمانی ترافیک چندپخش و در نهایت افزایش گذردهی شبکه دارد.

همانند فاز اول، با ذکر یک مثال به تشریح کامل این بخش می‌پردازیم. اگر فرض کنیم تمام گره‌های شبکه‌ی ارائه شده در بخش قبل به ۲ رادیو مخابراتی مجهز شوند، در این صورت برای ارسال و دریافت هم‌زمان بسته‌های اطلاعاتی در یک شبکه توری بی‌سیم رادیوشناختی چندرادیویی چندکاناله، لازم است علاوه بر برقراری شرط عدم ایجاد تداخل برای سایر کاربران شبکه، شرط وجود رادیوی بدون استفاده در گره‌های فرستنده و گیرنده را نیز بررسی کرد. برای مثال، هنگامی که کاربر N_2 بسته‌ای را توسط رادیوی اول خود دریافت می‌کند، فقط در صورتی می‌تواند آن را برای سایر کاربران در همان بخش زمانی ارسال کند که رادیوی دوم آن آزاد باشد و از طریق آن هیچ بسته‌ای در حال دریافت و یا ارسال نباشد. در بخش دوم جدول (۱)، عملکردهای غیرمشارکتی و مشارکتی فاز اول با در نظر گرفتن ۲ رادیو در هر گره شبکه، زمان‌بندی شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، دوره‌ی زمانی ترافیک چندپخش در این فاز به ۳ بخش کاهش یافته است؛ در حالی که با استفاده از تنها یک رادیو در هر گره، دوره‌ی زمانی ۶ بخش محاسبه شد. بنابراین، با تحلیل و مقایسه چگونگی عملکرد غیر مشارکتی شبکه در هر دو حالت استفاده از یک رادیو و دو رادیو برای هر گره شبکه، می‌توان رابطه‌ی (۴) را برای دوره‌ی زمانی ترافیک چندپخش در حالت استفاده از دو یا چندرادیو دوره‌ی زمانی با استفاده از تنها یک رادیو بیان کرد:

$$T_{\text{multi-radio}} = \left\lceil \frac{T_{\text{single-radio}}}{NR} \right\rceil, \quad NR \geq 1. \quad (4)$$

به طوری که عملگر $\lceil \cdot \rceil$ بیان‌کننده‌ی حد بالای عبارت داخل آن و NR تعداد رادیوهای به‌کارگرفته در هر گره می‌باشد. در مورد استفاده از عملکردهای مشارکت بین اعضای یک گروه، مشارکت اعضای گروه‌های مختلف با یکدیگر و ارسال کلمه کد لازم

$$NT(MR) = \sum_{i \in V} \sum_{k \in K} q_{i,k}^{MR} \quad (2)$$

به طوری که K مجموعه کانال‌های در دسترس کاربران شبکه است. هنگامی که کاربر i گیرنده از کانال k باشد، $q_{i,k}^{MR}$ برابر با ۱ است و در غیر این صورت $q_{i,k}^{MR} = 0$ [۲۴ و ۲۸].

برای برقراری ارتباط بین هر دو کاربر ثانویه در شبکه‌های رادیوشناختی، با رعایت دو شرط ذکر شده در بخش (۳)، اتصالات خط چین قرمز رنگ برقرار می‌شوند. همچنین، مجموعه اعداد نمایش داده شده در کنار هر کاربر، معرف کانال‌های در دسترس آن کاربر است. بنابراین، با استفاده از روش مشارکتی اعضای یک گروه و مشارکت اعضای گروه‌های مختلف با یکدیگر تساوی (۲) به صورت زیر کاهش می‌یابد:

$$NT(MR) = \sum_{i \in V} \sum_{k \in K} q_{i,k}^{MR} - \sum_{m \in M} \sum_{i \in V} \sum_{k \in K} q_{i,k}^{MC} \quad (3)$$

به طوری که مجموعه M شامل تمامی عملکردهای مشارکتی بین کاربران با بهره‌گیری از WBA است.

در ادامه شکل‌های (۴) تا (۷) نمودارهای گردشی برای تمامی عملکردهای مشارکتی به‌طور خلاصه ارائه شده است. همچنین، در جدول (۱) چگونگی ارسال بسته‌های اطلاعاتی^{۴۵}، از گره‌های فرستنده T_x به گره‌های گیرنده R_x و از طریق کانال‌های مخابراتی C در بخش‌های زمانی مختلف با بررسی یک مثال نشان داده شده است. بخش اول این جدول، شامل زمان‌بندی ترافیک چندپخش بدون استفاده از سیاست‌های مشارکتی است به طوری که در هر بخش زمانی با بهره‌گیری از WBA، کاربرانی که به کانال فرکانسی یکسانی دسترسی پیدا کرده‌اند، بسته‌های اطلاعاتی خود را از MR دریافت می‌کنند. بخش‌های دوم تا چهارم به ترتیب مربوط به مشارکت بین اعضای یک گروه، مشارکت اعضای گروه‌های مختلف با یکدیگر و مشارکت از طریق ارسال کلمه کد می‌باشند. به عنوان مثال، روش مشارکت بین اعضای گروه اول را در نظر بگیرید. در بخش زمانی اول دو کاربر $\{N_3, N_9\}$ با بهره‌گیری از ویژگی WBA و با دسترسی به کانال مخابراتی ۱، بسته‌ی اطلاعاتی a را دریافت می‌کنند. حال، چنانچه بخواهیم برای ارسال بسته‌ی a به سایر اعضای گروه اول، از عملکرد مشارکتی بین اعضای این گروه استفاده کنیم، گره‌های $\{N_1, N_7\}$ اگرچه با گره N_3 ارتباط دارند، اما به علت وجود یک رادیو در هر گره، برای دریافت بسته‌ی a باید منتظر بخش زمانی بعدی باشند. مطابق با جدول (۱) هنگامی که هیچ‌گونه عملکرد مشارکتی به‌کار گرفته نشود، MR در ۶ بخش زمانی به تمامی کاربران شبکه بسته‌های اطلاعاتی مطلوب را ارسال می‌کند. سپس، با بهره‌گیری از عملکرد مشارکتی بین اعضای یک گروه، این تعداد به ۵ بخش زمانی کاهش می‌یابد و با استفاده از عملکرد مشارکتی بین اعضای گروه‌های مختلف، دوره‌ی زمانی به ۴ بخش می‌رسد. در نهایت، با ارسال بسته‌های کد شده $a \oplus b$ تمامی کاربران شبکه در ۳ بخش زمانی، بسته‌های اطلاعاتی مورد نیاز خود را دریافت می‌کنند. لازم به ذکر است در روش مشارکتی ارسال بسته‌های کد شده، اگر چه کاربر N_9 با بهره‌گیری از WBA در بخش زمانی اول به اشتباه بسته‌ی

فرکانسی جدید و افزایش دوره‌ی زمانی ترافیک چندپخش خواهد شد. در این راستا، با توجه به ساختار توری به‌کارگرفته شده در مدل شبکه، بهره‌گیری از عملکردهای مشارکتی موجود در کنار استفاده از رادیوهای چندگانه علاوه بر برقراری معیار پایداری شبکه، در کاهش دوره‌ی زمانی نیز نقش چشمگیری خواهد داشت.

برای تشریح بهتر مسئله، شبکه نشان داده شده در شکل (۳) را مجدداً در نظر بگیرید. از آنجایی که مجموعه کانال‌های در دسترس کاربران شبکه رادیوشناختی وابسته به زمان و مکان است، فرض کنید با توجه به موقعیت مکانی و زمانی کاربران شبکه، کانال ارتباطی MR با دو کاربر $\{N_6, N_7\}$ مطابق شکل (۸)، در بخش‌های زمانی معینی مسدود شود.

بنابراین، لازم است که سیاست‌های زمان‌بندی ترافیک چندپخش همگام با شرایط جدید تغییر کنند. مطابق با بخش سوم جدول (۱)، در بخش زمانی اول کاربر N_7 به دلیل داشتن اتصال با کاربر هم‌گروهی خود N_3 و با بهره‌گیری از عملکرد مشارکت اعضای یک گروه، قادر به دریافت بسته‌ی اطلاعاتی مطلوب خود از N_3 می‌باشد. لازم به ذکر است به دلیل استفاده از ۲ رادیو در هر گره شبکه، کاربر N_3 در بخش زمانی اول از طریق رادیو اول خود بسته‌ی a را از MR دریافت کرده و در همان بخش زمانی از طریق رادیوی دوم خود برای کاربران $\{N_1, N_7\}$ ارسال می‌کند. اما، در مورد کاربر N_6 که با هیچ یک از اعضای هم‌گروهی خود اتصالی ندارد، تنها راه حل موجود بهره‌گیری از عملکرد مشارکتی اعضای گروه اول است. در این راستا، شبکه به دو صورت عمل می‌کند: اگر قبل از انتخاب کاربر مورد نظر از گروه اول، یعنی کاربر N_1 ، بسته‌ی مطلوب a برای آن ارسال نشده باشد، شبکه همانند عملکرد مشارکتی اعضای گروه‌های مختلف فاز دوم عمل می‌کند. اما اگر کاربر N_1 در بخش‌های زمانی قبلی بسته‌ی a را دریافت کرده باشد، ابتدا MR کلمه $a \oplus b$ را برای کاربر N_1 ارسال می‌کند. سپس، کاربر N_1 با توجه به دریافت قبلی خود بسته‌ی اطلاعاتی b را کدبرداری کرده و در همان بخش زمانباز طریق رادیوی دوم خود برای کاربر N_6 ارسال می‌کند. در انتها پس از اتمام عملکرد مشارکتی کاربران شبکه با یکدیگر، MR باردیگر همان کلمه a را در جهت کدبرداری بسته‌ی مطلوب برای کاربر N_1 ارسال می‌کند.

است که علاوه بر شروط ذکر شده در فاز اول، دو شرط زیر نیز رعایت شوند:

(۱) هر دو کاربر فرستنده و گیرنده، رادیویی بدون استفاده برای ارسال و دریافت بسته‌ی ارسال، در اختیار داشته باشند.

(۲) کانال مورد استفاده در آن بخش زمانی، برای برقراری شرط عدم ایجاد تداخل، نباید توسط مسیریاب مرکزی و یا کاربران دیگر، استفاده شود.

رابطه‌ی (۵)، مشابه رابطه‌ی (۴) از تحلیل و مقایسه عملکردهای مشارکتی دو بخش اول جدول (۱) و همچنین بررسی هر دو حالت ذکر شده برای سایر شبکه‌های توری بی‌سیم رادیوشناختی چندرادیویی چندکاناله، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$T_{\text{multi-radio}} \leq \left\lceil \frac{T_{\text{single-radio}}}{NR} \right\rceil, \quad NR \geq 1. \quad (5)$$

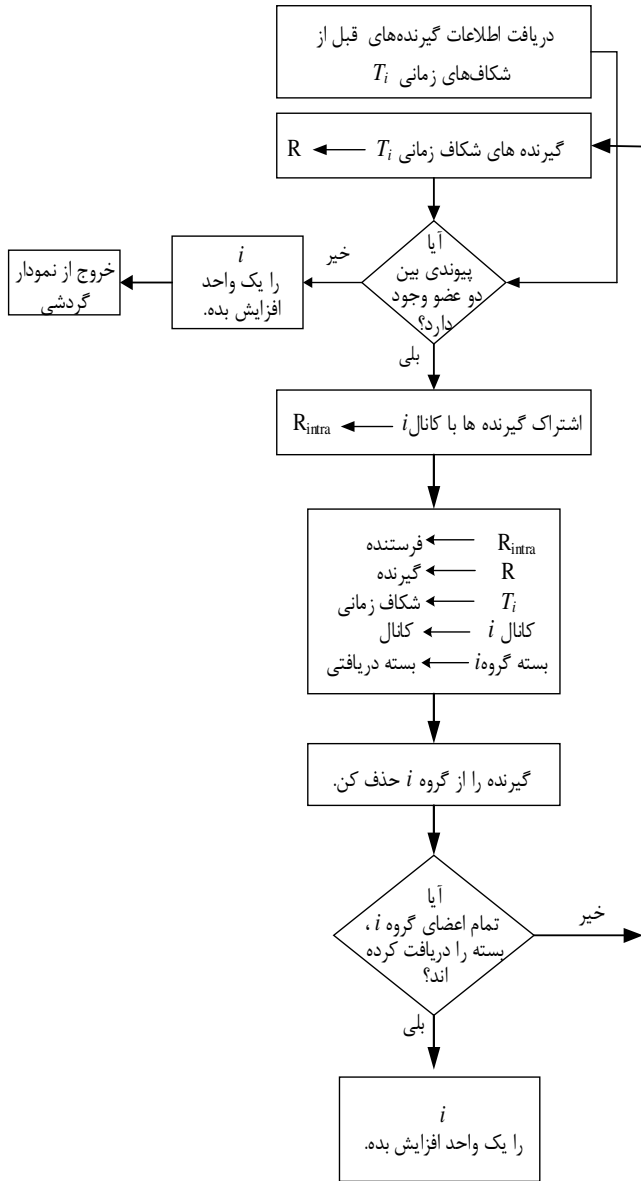
۴-۴- فاز سوم

مهمترین چالش در شبکه‌های رادیوشناختی، دسترسی پویا به طیف فرکانسی است. هنگامی که کانال مورد استفاده یک کاربر ثانویه توسط کاربران اولیه باز پس گرفته شود و یا کیفیت سرویس کانال کاهش یابد، با مسئله‌ی مسدود شدن کانال ارتباطی بین MR و برخی MCها روبه‌رو می‌شویم. در این صورت، دو عکس‌العمل ممکن برای کاربران ثانویه پیش‌بینی می‌شود:

(۱) انتظار برای زمان‌بندی مجدد: اگر کاربران اولیه، کانال را به سرعت ترک کنند، کاربران ثانویه تا تخلیه‌ی کامل کاربران اولیه از کانال منتظر می‌مانند. بنابراین، لازم است تا سیاست‌های زمان‌بندی به-گونه‌ای طراحی شوند که کاربران ثانویه پس از برقراری مجدد ارتباطشان با MR، در بخش‌های زمانی بعدی قادر به دریافت بسته‌ی مورد نیاز خود از MR باشند.

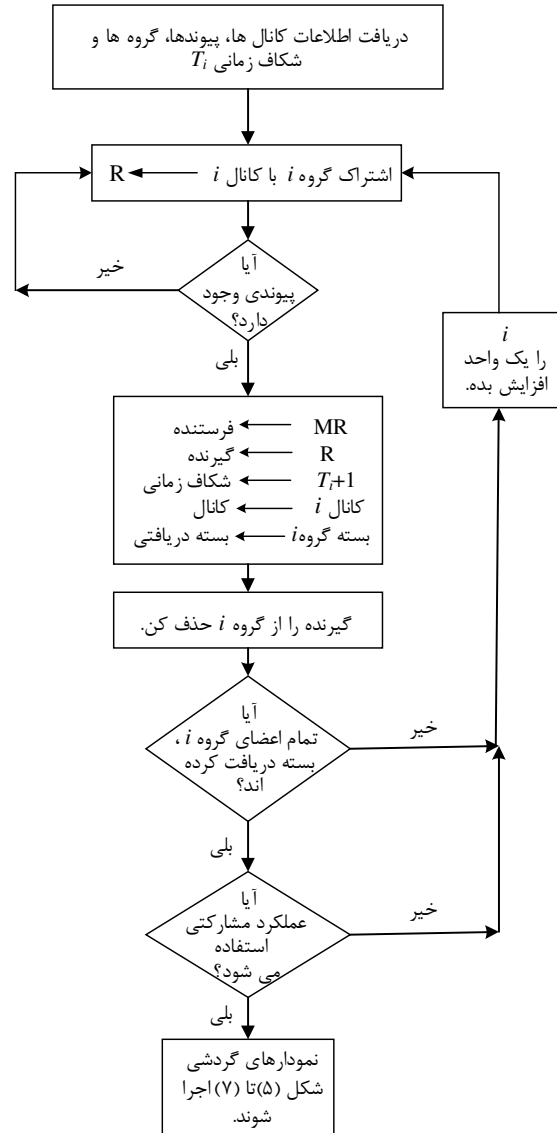
(۲) تعویض کانال: اگر ساختار شبکه کاربران اولیه بر استفاده از چندین کانال برای انتقال داده طراحی شده باشد، کاربر ثانویه قادر است از سایر کانال‌های ارزیابی شده در مجموعه کانال‌های در دسترس خود استفاده کرده و ارتباط با MR را به سرعت برقرار کند.

نکته‌ای که باید در موارد فوق در نظر داشت این است که هر عکس-العمل متحمل هزینه است. به‌عنوان مثال، انتظار برای ترک کاربران اولیه و تعویض کانال، منجر به تأخیر طولانی در دستیابی به طیف



شکل (۵): نمودار گردشی الگوریتم زمان‌بندی ترافیک چندپخششی با مشارکت اعضای یک گروه.

Fig.(5): Intra-group assistance multicast scheduling flowchart.



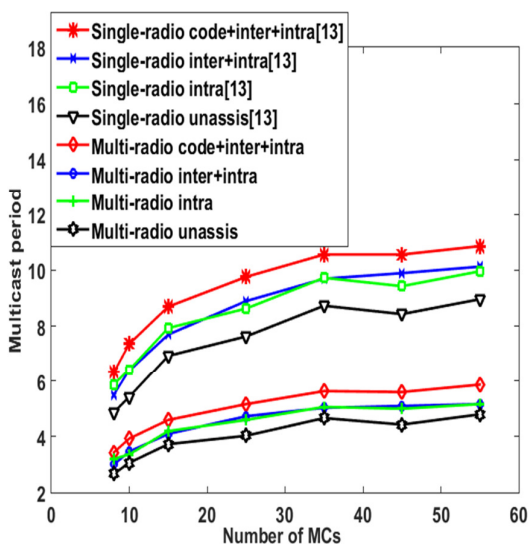
شکل (۴): نمودار گردشی الگوریتم زمان‌بندی ترافیک چندپخششی بدون عملکرد مشارکتی.

Fig.(4): Un-assistance multicast scheduling flowchart.

۵- شبیه‌سازی و نتایج عددی

تمامی کانال‌های فرکانسی بسیار زیاد در نظر گرفته شده است $(P_a=80\%)$ ، هر کاربر شبکه تقریباً به تمامی کانال‌های موجود دسترسی دارد. بنابراین، با افزایش تعداد کانال‌های در دسترس، دوره‌های زمانی در هر دو حالت استفاده از یک و دو رادیو کاهش می‌یابد. در این شکل، به منظور ترسیم اثر تعداد کانال‌های در دسترس، احتمال دسترسی به کانال‌های فرکانسی برای تمامی حالت‌ها ثابت در نظر گرفته شده است.

با افزایش تعداد رادیوهای چندگانه در هر گره شبکه، دوره‌ی زمانی هر ترافیک چندپخش‌ی به دلیل امکان دریافت و ارسال هم‌زمان بسته‌های اطلاعاتی، کاهش خواهد یافت. در این راستا، شکل (۱۲) اثر افزایش تعداد رادیوها بر دوره‌های زمانی را برای دو تکرار برنامه نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، هر یک از نتایج به دست آمده، حاصل میانگین‌گیری ۳۰ تکرار مختلف می‌باشند. همچنین، در برخی از چیدمان‌ها، به دلیل استفاده از WBA در کنار روش‌های مشارکتی ایجاد شده و بهره‌گیری از رادیوهای چندگانه، کاهش بیش از ۵۰ درصد در دوره‌ی زمانی ترافیک چندپخش‌ی حاصل می‌شود. به عنوان مثال، روش مشارکتی اعضای یک گروه شبکه ارائه شده در شکل (۱۳) را در نظر بگیرید.



شکل (۹): دوره زمانی ترافیک چندپخش‌ی عملکردهای مشارکتی $(P_a=50\%)$.
Fig. (9): Multicast period for assistance operation $(P_a=50\%)$.

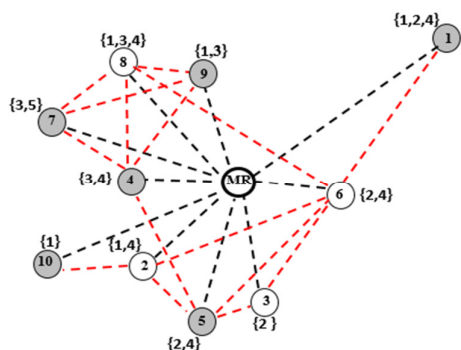
در این بخش، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، مسئله‌ی زمان‌بندی ترافیک چندپخش‌ی در یک سلول از شبکه‌های توری بی‌سیم رادیوشناختی شبیه‌سازی می‌شود. تعداد کاربران ثانویه که به‌طور تصادفی در ناحیه مسطح مربعی $500 \times 500 m^2$ پخش شده‌اند، از ۸ کاربر تا ۵۵ کاربر تغییر می‌یابد. موقعیت مکانی MR، به‌طور ثابت در مرکز این ناحیه تعبیه شده است و تمامی گره‌های شبکه (شامل MR و MCها) دارای برد مخابراتی یکسان $353.55 = \sqrt{2} \times \frac{500}{2}$ مطابق با حداقل فاصله MR از هر MC، هستند. تعداد گروه‌های ترافیک چندپخش‌ی G ، ۲ و ۳ گروه در هر سلول فرض شده است و هر یک از کاربران ثانویه به‌طور تصادفی در یکی از گروه‌های ارسال چندپخش‌ی جای گرفته‌اند. کانال‌های در دسترس هر کاربر C ، با احتمال دسترسی P_a متغیر هستند و مسیریاب مرکزی سلول قادر به استفاده از تمامی کانال‌های در دسترس کاربران ثانویه است. همچنین، احتمال مسدود شدن کانال در دسترس یک کاربر ثانویه P_b با توجه به افزایش تعداد کاربران، متغیر خواهد بود.

در شکل (۹)، تعداد دوره‌های زمانی ترافیک چندپخش‌ی در ۳۰ چیدمان مختلف از گره‌های شبکه با افزایش تعداد کاربران ثانویه، به صورت میانگین برای تمامی عملکردهای مشارکتی مطرح شده در دو فاز اول مقاله ترسیم شده‌اند. در هر مورد، به‌منظور توصیف بهتر اثر هر یک از روش‌های مشارکتی ارائه شده، دوره‌ی زمانی ترافیک چندپخش‌ی در سه مرحله محاسبه می‌شود: ابتدا، تنها با استفاده از روش مشارکتی اعضای یک گروه چندپخش‌ی (intra)، سپس با بهره‌گیری از روش مشارکتی اعضای گروه‌های مختلف بایکدیگر توأم با مشارکت اعضای یک گروه چندپخش‌ی (inter+intra) و در نهایت استفاده از فن‌آوری کدگذاری شبکه در کنار روش‌های مشارکتی ارائه شده‌ی مرحله‌ی قبل (code+inter+intra). همان‌گونه که انتظار می‌رفت، با استفاده از ۲ رادیو در هر گره شبکه، تمامی عملکردهای مشارکتی در این حالت نسبت به عملکرد متناظر خود هنگامی که تنها یک رادیو برای هر گره در نظر گرفته شود [۱۳]، علی‌رغم افزایش تعداد کاربران با کاهش قابل توجهی دوره‌ی زمانی ترافیک چندپخش‌ی روبه‌رو خواهد شد. دلیل این امر، توانایی تمامی گره‌های شبکه (شامل MR و MCها) در دریافت و ارسال هم‌زمان بسته‌های اطلاعاتی است. به طوری که در هر بخش زمانی، پس از دریافت بسته‌ی اطلاعاتی کاربران شبکه قادر به ارسال آن بسته در همان بخش زمانی هستند.

به دلیل افزایش تعداد کاربران متقاضی طیف فرکانسی، در هر بخش زمانی با افزایش احتمال دسترسی به کانال P_a ، همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، دوره‌های زمانی در هر دو حالت استفاده از یک و دو رادیو برای هر گره شبکه، افزایش می‌یابد.

در شکل (۱۱)، اثر افزایش کانال‌های در دسترس بر دوره‌های زمانی برای عملکرد غیرمشارکتی در هر دو حالت استفاده از یک و دو رادیو مخابراتی نشان داده شده است. به دلیل این‌که احتمال دسترسی به

چیدمان شبکه به گونه‌ای است که با استفاده از تنها یک رادیو در هر گره، دوره‌ی زمانی ترافیک چندپخش‌ی ۴ بخش زمانی می‌شود. مطابق با رابطه‌ی (۵)، دوره‌ی زمانی در حالت استفاده از دو رادیو در هر گره شبکه کوچکتر و مساوی ۲ خواهد شد. حال با توجه نتایج شبیه‌سازی ارائه شده در جدول (۲)، دوره زمانی در این حالت به ۱ بخش زمانی کاهش می‌یابد. بنابراین، در برخی از چیدمان‌ها روش ارائه شده به بهبود بیش از ۵۰ درصد منجر خواهد شد. در واقع، در هر مرحله استفاده از روش‌های مشارکتی ارائه شده، بهره از رابطه‌ی (۶)، محاسبه می‌گردد.



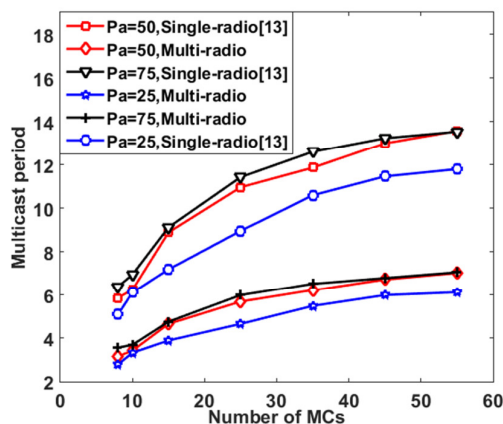
شکل (۱۳): شبکه توری بی‌سیم رادیوشناختی دو رادیویی چندکاناله
 Fig. (13): A typical cognitive radio wireless mesh network with two radios and multi channels.

$$\text{Gain} = \frac{T_{\text{unassisted}} - T_{\text{assisted}}}{T_{\text{unassisted}}} \times 100\% \quad (6)$$

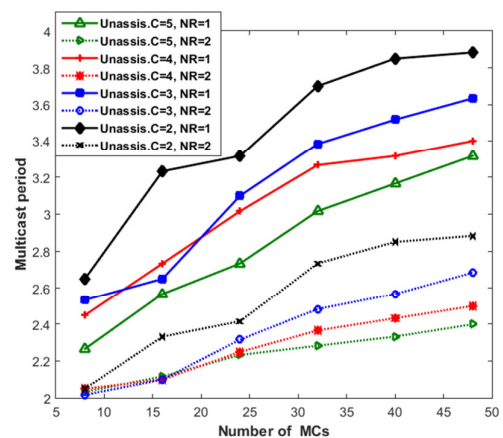
اگر در حالت استفاده از یک رادیو و روش مشارکتی اعضای یک گروه، کاهش دوره زمانی با بهره ۲۰٪ باشد، این بهره برای روش مشارکتی مشابه ولی با استفاده از دو رادیو بهره ۶۶.۶٪ خواهد داشت (مطابق با جدول (۲)). بنابراین، بهبود مناسبی با استفاده از رادیوهای چندگانه و WBA حاصل خواهد شد.

۶- نتیجه‌گیری

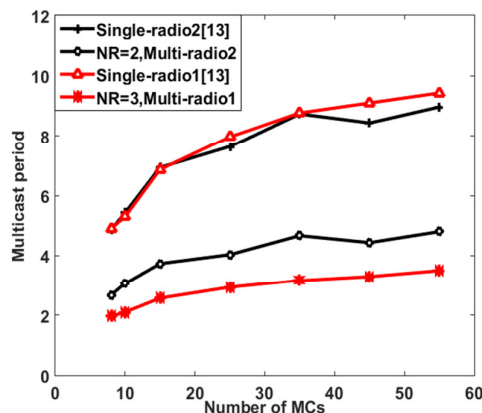
در این مقاله، اثر استفاده از رادیوهای چندگانه در کنار سیاست مشارکتی کدگذاری در شبکه‌های توری بی‌سیم رادیوشناختی، مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، با فرض ترافیک‌های چندپخش‌ی، نقش مشارکت اعضای یک گروه و مشارکت اعضای گروه‌های مختلف بر گذردهی شبکه‌های پایایی شد؛ به طوری که استفاده از عملکردهای مشارکتی گره رله و سیاست‌های زمان‌بندی مناسب، منجر به کاهش دوره‌ی زمانی ترافیک چندپخش‌ی و افزایش گذردهی شبکه می‌شود. همچنین، اثر بهره‌گیری از سیاست‌های مشارکتی ارائه شده و کدگذاری شبکه بر افزایش پایداری و گذردهی شبکه به هنگام مسدود شدن برخی کانال‌های در دسترس کاربران ثانویه مورد بررسی قرار گرفت. در این صورت، علاوه بر کاهش دوره‌ی زمانی ترافیک چندپخش‌ی در صورت استفاده از گره رله نسبت به حالت عدم استفاده از آن، پایداری شبکه نیز بهبود می‌یابد.



شکل (۱۰): اثر دسترس پذیری به کانال بر دوره‌های زمانی ترافیک چندپخش‌ی (coding+inter+intra)
 Fig. (10): The effect of the channel availability on the multicast period (coding+inter+intra).



شکل (۱۱): اثر افزایش کانال بر دوره‌های زمانی ترافیک چندپخش‌ی ($P_a=80\%$)
 Fig. (11): The effect of the number of channels on the multicast period ($P_a=80\%$).



شکل (۱۲): اثر افزایش تعداد رادیوهای چندگانه بر دوره‌های زمانی (coding+inter+intra) و ($P_a=50\%$)
 Fig. (12): The effect of the number of radios on the multicast period (coding+inter+intra) and ($P_a=50\%$)

جدول (۱): زمان‌بندی چندبخشی با استفاده از عملکردهای مشارکتی، بهره‌گیری از رادیوهای چندگانه و کانال‌های مسدود شده.

Table (1): Multicast scheduling with assistance operation, exploiting multiple radios and blocked channels.

	T	T_1			T_2				T_3			T_4			T_5		T_6
	Single-Radio	Unassis. T_X	MR MR			MR MR				MR			MR MR			MR MR	
R_X		N_3	N_9		N_1	N_7			N_4			N_2	N_{10}	N_5	N_8	N_6	
C		1	1		4	4			4			1	1	3	3	4	
Packet		a	a		a	a			a			b	b	b	b	b	
Intra assis. T_X		MR MR			MR				N_3 N_3 MRMR			MR MR			MR		
R_X		N_3	N_9		N_4				N_1	N_7	N_2	N_{10}	N_5	N_8	N_6		
C		1	1		4				4	4	1		3	3	4		
Packet		a	a		a				a	a	b		b	b	b		
Inter assis. T_X		MR MR MR	N_9	N_9	MR MR	MR				N_3 N_3 MR							
R_X		N_2	N_9	N_{10}	N_5	N_8	N_3	N_9	N_4			N_1	N_7	N_6			
C		1	1	1	5	5	1	1	4			4	4	2			
Packet		b	b	b	b	b	a	a	a			a	a	b			
Codeword. T_X		MR MR MR	MR MR MR	N_9	MR MR MR	MR MR	N_9		MR MR	MR							
R_X		N_2	N_9	N_{10}	N_1	N_3	N_6	N_4	N_5	N_6	N_9						
C		1	1	1	4	4	4	4	5	5	2	2	4				
Packet		b	b	b	a	a	a	a	b	b	$a \oplus b$	$a \oplus b$	a				
Multi-Radio	Unassis. T_X	MR MR MR	MR MR MR	MR MR MR	MR MR MR				MR MR MR								
	R_X	N_3	N_9	N_1	N_4	N_7	N_6		N_2	N_{10}	N_5						
	C	1	1	2	4	4	2		1	1	3	3					
	Packet	a	a	a	a	a	b		b	b	b	b					
	Intra assis. T_X	MR MR MR	N_3	MR MR MR	MR MR MR	MR MR MR				MR MR							
	R_X	N_3	N_9	N_4	N_1	N_7			N_2	N_{10}	N_6	N_5	N_8				
	C	1	1	3	4	4			1	1	4	3	3				
	Packet	a	a	a	a	a	a	a	b	b	b	b	b				
	Inter assis. T_X	MR MR MR	N_9	MR MR MR	N_3	N_3	MR MR MR										
	R_X	N_2	N_9	N_{10}	N_5	N_8	N_3	N_3	N_1	N_7	N_3	N_9	N_6				
	C	1	1	1	5	5	4	4	4	4	1	1	2				
	Packet	b	b	b	b	b	a	a	a	a	a	a	b				
	Codeword. T_X	MR MR MR	MR MR MR	MR MR MR	N_9 N_9 N_3 MRMRMR												
	R_X	N_2	N_9	N_{10}	N_1	N_3	N_5	N_8	N_7	N_4	N_6	N_9					
	C	1	1	1	4	4	5	5	4	3	2	2					
	Packet	b	b	b	a	a	a	a	$a \oplus b$	$a \oplus b$	$a \oplus b$	$a \oplus b$	$a \oplus b$				
Blocking	Assis. T_X	MR MR MR	N_3	N_3	MR MR MR	MR MR MR	N_1	MR MR MR									
	R_X	N_3	N_9	N_4	N_1	N_7	N_2	N_{10}	N_1	N_6	N_5	N_8	N_1				
	C	1	1	3	4	4	1	1	1	4	3	3	1				
	Packet	a	a	a	a	a	b	b	$a \oplus b$	b	b	b	$a \oplus b$				

جدول (۲): مقایسه روش مشارکتی اعضای یک گروه در دو حالت استفاده از یک و دو رادیو.

Table (2): Comparing in the intra-group assistance for using one radio and two radios.

Scenario		T_1	T_2	T_3	T_4	
Single Radio	Intra-group assisted	Tx	MR	MR, $\{n_2\}$	MR	MR, $\{n_9\}$
		Rx	$\{n_2, n_5\}$	$\{n_3\}, \{n_6\}$	$\{n_1, n_9, n_{10}\}$	$\{n_5\}, \{n_4, n_7\}$
		C	1	3, 4	1	4, 3
		Packet	a	a, a	b	b, b
T_1						
Multi Radio	Intra-group assisted	Tx	$MR(R_1), n_2(R_2), n_6(R_2)$		$MR(R_2), n_9(R_2), n_4(R_2)$	
		Rx	$\{n_2, n_5\}, \{n_6\}, \{n_3\}$		$\{n_1, n_9, n_{10}\}, \{n_4, n_7\}, \{n_5\}$	
		C	1, 4, 2		1, 3, 4	
		Packet	a, a, a		b, b, b	

- 13- Ad hoc
- 14- Mesh
- 15- Self-organization
- 16- Self-adaptive
- 17- Robustness
- 18- Scalability
- 19- Heterogeneous
- 20- Time slot
- 21- Scheduling
- 22- Throughput
- 23- Multi-channel wireless cognitive mesh networks
- 24- Multicast scheduling
- 25- Wireless Broadcast Advantage
- 26- Intra-group assistance
- 27- Inter-group assistance
- 28- Multi-radio
- 29- Quality of service
- 30- Blocking
- 31- Relay node networks
- 32- On Demand Multicast Routing Protocol
- 33- Mobility-Prediction-based Joint Stable Routing and Channel Assignment
- 34- Mesh router
- 35- Mesh client
- 36- Gateway
- 37- Multi-hop
- 38- Orthogonal
- 39- Half duplex
- 40- Fairness
- 41- Scheduling period
- 42- Multicast period
- 43- Code word
- 44- Assistance operation
- 45- Packet

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، اثر استفاده از رادیوهای چندگانه در کنار سیاست مشارکتی کدگذاری در شبکه‌های توری بی‌سیم رادیوشناختی، مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، با فرض ترافیک‌های چندپخش، نقش مشارکت اعضای یک گروه و مشارکت اعضای گروه‌های مختلف بر گذردهی شبکه ارزیابی شد؛ به طوری که استفاده از عملکردهای مشارکتی گره رله و سیاست‌های زمان‌بندی مناسب، منجر به کاهش دوره‌ی زمانی ترافیک چندپخش و افزایش گذردهی شبکه می‌شود. همچنین، اثر بهره‌گیری از سیاست‌های مشارکتی ارائه شده و کدگذاری شبکه بر افزایش پایداری و گذردهی شبکه به هنگام مسدود شدن برخی کانال‌های در دسترس کاربران ثانویه مورد بررسی قرار گرفت. در این صورت، علاوه بر کاهش دوره‌ی زمانی ترافیک چندپخش در صورت استفاده از گره رله نسبت به حالت عدم استفاده از آن، پایداری شبکه نیز بهبود می‌یابد.

پی نوشت:

- 1- Berkeley Wireless Research Center
- 2- Primary users
- 3- Secondary users
- 4- Licensed
- 5- Spectrum holes
- 6- White space
- 7- Spectrum sensing
- 8- Cooperation
- 9- Base station
- 10- Mobile user
- 11- Backbone
- 12- Infra-structure

References

- [1] F.C. Commission, Spectrum policy task force, Technical report, Nov. 2002.
- [2] X. Chen, Z. Zhao, T. Jiang, D. Grace, and H. Zhang, "Inter-cluster connection in cognitive wireless mesh networks based on intelligent network coding," EURASIP J. Adv. Signal Process., vol. 10, no. 5, pp.1251 - 1256, 2009.
- [3] Y. Tevfik, and A. Huseyin, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," IEEE Commun.survey and tutorials, vol. 11, no. 1,pp. 116-130, Mar.2009.

- [4] A. Ghasemi, and E. S. Sousa, "Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs," *IEEE Commun.Mag.*, vol. 46, no. 4, pp. 32–39, Apr. 2008.
- [5] L. Geng, Y. C. Liang, and F. Chin, "Network coding for wireless ad hoc cognitive radio networks," in *Proc. IEEE PIMRC*, pp. 1-5, Sep. 2007.
- [6] K. B. Letaief, and W. Zhang, "Cooperative communications cognitive radio networks," in *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 878-893, May. 2009.
- [7] S. Parvin, F. Khadeer, O. K. Hussain, S. Han, B. Tian, and E. Chang, "Cognitive radio networks security: A survey," *Journal of Net. and Commun. Application*, vol. 35, no. 6, pp. 1691-1708, Nov.2012.
- [8] T. Chen, H. Zhang, M. Matinmiko, and M. D. Katz, "CogMesh: cognitive wireless mesh networks," in *Proc. IEEE GLOBECOM Workshops*, Nov.2008,pp.1-6.
- [9] K. R. Chowdhury, and I. F. Akyildiz, "Cognitive wireless mesh networks with dynamic spectrum access," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, no. 1, pp. 168-181, Jan. 2008.
- [10] W. Kim, S. Oh, M. Gerla, and J. S. Park, "COCAST: multicast mobile ad hoc networks using cognitive radio," in *Proc. IEEE MILCOM*, pp. 1-7, Oct. 2009.
- [11] W. Jihong, Sh. Wenxiao, and J. Feng, "On channel assignment for multicast in multi-radio multi-channel wireless mesh networks: A survey," *IEEE Journals and Mag.*, vol. 12, no. 1, pp. 122-135, Jan. 2015.
- [12] A. S. Cacciapuoti, M. Caleffi, and L. Paura, "Reactive routing for mobile cognitive radio ad hoc networks," *Ad Hoc Net.*, vol. 10, no. 10, pp. 803-815, Jul. 2012.
- [13] H. M. Almasarid and A. E. Kamal, "Exploiting multichannel diversity for cooperative multicast in cognitive radio mesh networks," *IEEE/ACM Trans.*, vol. 22, no. 3, pp. 770-783, Jun. 2014.
- [14] X. Zhu, L. Shen, and T. P. Yum, "Analysis of cognitive radio spectrum access with optimal channel reservation," *IEEE Comput. Letters*, vol. 11, no. 4, pp. 304-306, Apr. 2007.
- [15] J. Qadir, A. Baig, A. Ali, and Q. Shaf, "Multicasting in cognitive radio networks: algorithms, techniques and protocols," *Journal of Net. and Commun. Application*, vol. 45, pp. 44-61, Jun. 2014.
- [16] H. M. Almasaeid, T. H. Jawadwala, and A. E. Kamal, "On demand multicast routing in cognitive radio mesh networks," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, pp. 1-5, Dec. 2010.
- [17] Y. Qu, C. Dong, H. Dai, F. Wu, Sh. Tang, H. Wang, and CH. Tian, "Network coding-based multicast in multi-hop CRNs under uncertain spectrum availability," in *Proc. IEEE INFOCOM*, Apr-May 2015.
- [18] R. Krishna, K. Cumanan, Z. Xiong, and S. Lambotharan, "Cooperative relays for an underlay cognitive radio network," *IEEE WCSP*, pp. 1-4, Nov. 2009.
- [19] O. Simeone, Y. Bar-Ness, and U. Spagnolini, "Stable throughput of cognitive radios with and without relaying capability," *IEEE Trans.*, vol. 55, no. 12, pp. 2351-2360, Dec. 2007.
- [20] A. S. Cacciapuoti, M. Caleffi, and L. Paura, "Reactive routing for mobile cognitive radio ad hoc networks," *Ad Hoc Net.*, vol. 10, no. 10, pp. 803-815, Jul. 2012.
- [21] H. A. Al-Rawi and K. A. Yau, "Routing in distributed cognitive radio networks: a survey," *Springer, Wireless Personal Commun.*, vol. 69, no. 4, pp. 1983-2020, Apr. 2013.
- [22] A. A. El-Sherif, and A. Mohamed, "Joint routing and resource allocation for delay minimization in cognitive radio based mesh networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 1, pp. 186-197, Jan. 2014.
- [23] W. Ren, X. Xiao, and Q. Zhao, "Minimum-energy multicast tree in cognitive radio networks," in *Proc. IEEE Asilomar Conf.*, Nov.2009, pp. 312-316.
- [24] A. Avokh, G. Mirjalily, J. Abouei, and S. Valaee, "On the relationship between multicast/broadcast throughput and resource utilizations in wireless mesh networks," *Hindawi, TSWJ, Communication*, vol. 2013, Nov. 2013.
- [25] F. Tang, L. Barolli, and J. Li, "A joint design for distributed stable routing and channel assignment over multihop and multi flow mobile Adhoc cognitive networks," *IEEE Trans. On INDUSTRIAL INFOCOM*, vol. 10, no. 2, pp. 1606-1615, May. 2014.
- [26] M. Alicherry, R. Bhatia, and L.E. Li "Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multiradio wireless mesh networks," in *Proc. of international conf. on Mobicom'05*, Cologne, Germany, Aug. 2005, pp. 58-72.
- [27] E. Hossain, D. Niyato, and Z. Han, *Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2009.
- [28] A. Avokh and G. Mirjalily, "Performance Analysis of Broadcasting in Small-Scale Multi-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks" in *Proc. of ICACT*, South Korea, Feb. 2012