بهبود استفاده از طیف رادیویی شبکه‌های توری بی‌سیم در مسیریابی ترافیک‌های چندپخشی

زینب عسکری[۱]– آوید آوخ[۲]– سید محمود دانشور فرزانگان[۲]

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

(۲) استادیار - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۸/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۷/۴

خلاصه: در این مقاله، به طراحی الگوریتم‌های مسیریابی چندپخشی و عوامل مؤثر بر ظرفیت، جهت بهبود میزان منابع رادیویی مصرفی در شبکه‌های توری بی‌سیم مجهز به آنتن‌های جهت‌دار، پرداخته می‌شود.کاهش تعداد ارسال‌ها در هر درخت چندپخشی و کاهش مقدار تداخل بین درخت‌های متمایز، از جمله اهداف اصلی در مسئله مذکوراست. در این راستا، با به کارگیری مزیت همه‌پخشی بی‌سیم در الگوریتم مسیریابی، تعداد کل ارسال-ها در هر درخت چندپخشی کاهش داده می‌شود. برای دستیابی به هدف دوم نیز با مجهز کردن گره‌ها به آنتن‌های جهت‌دار و رادیوهایی که روی کانال‌های مجزا تنظیم شده‌اند، تداخل بین درخت‌های مسیریابی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. در این راستا، نشان داده خواهد شد که با کم کردن پهنای بیم آنتن‌های جهت‌دار، میزان تداخل بین درخت‌های چندپخشی نیز کم می‌شود. همچنین با شبیه‌سازی روش‌های فوق برای آنتن‌های جهت‌دار با پهنای بیم‌های مختلف، کارآیی مطلوب این روش‌ها به اثبات خواهد رسید. مقایسه نتایج به دست آمده برای آنتن‌های جهت‌دار با نتایج به دست آمده برای آنتن‌های همه‌جهته، گویای این حقیقت است که مجهز کردن گره‌ها به آنتن‌های جهت‌دار، راهکار بسیار مناسبی برای کاهش تداخل و در نتیجه، استفاده هرچه بهتر از منابع رادیویی و افزایش گذردهی شبکه است.

کلمات کلیدی: شبکه‌های توری بی‌سیم چند کاناله چند رادیویی، مسیریابی چند پخشی، آنتن‌های جهت‌دار، مزیت همه پخشی بی‌سیم.

Radio Band Utilization Improvement in Wireless Mesh Networks for Multicast Routing

ZeinabAskari[1] – Avid Avokh[2] – Mahmood DaneshvarFarzanegan[2]

(1) MSc. - Department of Electrical Engineering,NajafabadBranch, Islamic Azad University,Najafabad, Iran
zeinabaskari92@sel.iaun.ac.ir

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
aavokh@pel.iaun.ac.ir
M_daneshvar@pel.ac.ir

This paper addresses the cross-layer design for multicast routing in Multi-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks (MRMC-WMNs) with directional antennas. WMNs have a limited capacity because of existence of interference between the wireless links. This issue becomes more crucial in the multicast communications. Directional antennas can focus the transmission power to the limited sector. Thus, equipping the wireless nodes with these antennas leads to degrade interference. This paper proposes two cross-layer algorithms named “Directional Multicast Tree Construction (DMTC)” and “Directional Interference-aware Multicast Tree Construction (DIMTC)” to solve the aforementioned problems. In the first algorithm, we jointly consider the channel diversity; the wireless broadcast advantage and the directional antenna technology to reduce number of transmissions in the routing trees. In the second one, in addition to above factors we use interference aware path selection factor to eliminate the interference among the multicast sessions. This scheme is aiming at improving the utilization of radio resources reducing both number of transmissions and interference, at the same time. Simulation results demonstrate that our schemes are more efficient than other existing schemes as well.

Index Terms: Multi-Radio Multi-channel Wireless Mesh Networks, Multicast Routing, Directional Antennas, Wireless Broadcast Advantage.

نویسنده مسئول: آوید آوخ، استادیار، دانشکده مهندسی برق،واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، aavokh@pel.iaun.ac.ir

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، شبکه‌های توری بی‌سیم به‌دلیل داشتن مزایایی همچون هزینه پایین پیاده‌سازی، نگه‌داری آسان و سرویس‌دهی مطمئن به کاربران، مورد توجه کارشناسان امر قرار گرفته‌اند [۱] و [۲]. در این شبکه‌ها، بسته‌های داده از گره منبع به صورت چندپرشی به گره مقصد انتقال می‌یابند. گره‌های این شبکه‌ها را از نظر وظایف و کارآیی می‌توان در یکی از سه دسته زیر جای داد: ۱- مشتری‌های توری، که تنها مصرف‌کننده یا تولیدکننده داده هستند و می‌توانند ثابت یا متحرک باشند. ۲- مسیریاب‌های توری، که وظیفه هدایت بسته‌های داده از سمت گره‌های دروازه و دیگر مسیریاب‌ها، به سمت کاربرهای تحت پوشش خود را بر عهده دارند. ۳- گره‌های دروازه که به‌صورت مستقیم به شبکه‌های سیمی متصل می‌شوند و به‌عنوان ابزار دسترسی به اینترنت برای دیگر گره‌های شبکه به‌شمار می‌آیند.

یکی از ترافیک‌های مهم ارتباطی در شبکه‌های توری بی‌سیم، ترافیک چندپخشی است که در آن، اطلاعات از یک منبع خاص به‌صورت همزمان به مجموعه‌ای از کاربرها ارسال می‌شود. از مهم‌ترین کاربردهای ترافیک مذکور می‌توان به مواردی چون سرویس‌های توزیع اطلاعات مالی، سرویس‌های ثبت قبوض، ویدئو کنفرانس، آموزش‌های مجازی و ... اشاره کرد[۲].

دو الگوریتم پایه مورد استفاده در مسیریابی ترافیک‌های مذکور، درخت‌های چندپخشی با کوتاه‌ترین مسیر (SPMT)[۱] و درخت‌های چندپخشی با کمترین هزینه (MCMT)[۲] هستند [۳]. هدف الگوریتم اول، ساخت درختی است که در آن تعداد پرش‌ها از هر گره مقصد تا گره منبع حداقل باشد؛ این در حالی است که هدف الگوریتم دوم، حداقل‌سازی هزینه کل در درخت مسیریابی است. بزرگ‌ترین چالش در طراحی الگوریتم‌های مسیریابی چندپخشی، کاربرد مزیت همه-پخشی بی‌سیم (WBA)[۳]، برای استفاده هرچه بهتر از پهنای طیف است [۴] - [۸]. وقتی یک گره، بسته داده‌ای را برای یکی از گره‌های همسایه خود ارسال کند، سایر همسایه‌ها که در بُرد مخابراتی آن گره هستند نیز آن بسته داده را دریافت می‌کنند. این مسئله، با توجه به ماهیت همه‌پخشی مخابرات بی‌سیم محقق می‌شود.

اگرچه ماهیت اشتراکی رسانه انتقال بی‌سیم منجر به کاهش استفاده از منابع رادیویی شبکه می‌شود ولی در مقابل، باعث تداخل و در نتیجه کاهش گذردهی نیز خواهد شد. زمانی که فرستنده بسته داده‌ای را برای گیرنده مورد نظر ارسال می‌کند، ممکن است تصادم رخ دهد و اطلاعات آن از بین برود. در این صورت، گره فرستنده باید آن بسته را دوباره ارسال کند. به این ترتیب، چندین بار ارسال کردن بسته‌ها، خود عاملی برای به هدر رفتن منابع رادیویی شبکه می‌شود. مدل تداخل فیزیکی و مدل تداخل پروتکلی، دو روش متداول برای به تصویر کشیدن تداخل در شبکه‌های بی‌سیم هستند [۹].

یک راهکار مؤثر برای کاهش تداخل، مجهز کردن گره‌های شبکه به رادیوهایی است که روی کانال‌های ناهمپوشا کار می‌کنند. به شبکه‌های دارای فن‌آوری فوق، اصطلاحاً شبکه‌های بی‌سیم چند رادیویی چند کاناله گفته می‌شود. در شبکه‌های مذکور، علاوه بر معیار فاصله، یکسانی کانال نیز در وجود پیوند مستقیم بی‌سیم بین دو گره فرضی مؤثر است. به عبارت دیگر، نه‌تنها گره گیرنده باید داخل بُرد مخابراتی گره فرستنده باشد، بلکه باید روی همان کانالی به دریافت داده‌ها بپردازد که گره فرستنده از آن کانال برای ارسال بسته‌های داده استفاده می‌کند. با کاربرد این روش، بین پیوندهایی که دارای کانال‌های متفاوت هستند، در صورت هم‌زمانی در ارسال، تصادمی رخ نمی‌دهد؛ گرچه فرستنده یا گیرنده یکی در بُرد تداخلی گیرنده یا فرستنده دیگری باشد. در نتیجه این امر می‌توان تعداد ارسال‌های هم‌زمان بیشتری را در شبکه پشتیبانی کرد و بدین طریق، از منابع رادیویی موجود به‌نحو مناسب‌تری استفاده نمود.

با ظهور فن‌آوری آنتن‌های جهت‌دار، استفاده از آنها جهت بهبود قابلیت اجرایی شبکه‌های بی‌سیم، بسیار مورد توجه قرار گرفته است.تحقیقات پیشین نشان داده است، که تجهیز گره‌ها به این آنتن‌ها می‌تواند تداخل فرکانسی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد [۱۰]-[۱۴]. برخلاف آنتن‌های همه‌جهته که دارای چگالی توان یکنواخت در همه جهت‌ها هستند [۱۴]، نحوه طراحی آنتن‌های جهت‌دار به گونه‌ای است که توان ارسالی خود را فقط در گلبرگ اصلی آنتن متمرکز و در لوب‌های فرعی توان بسیار کمی ارسال می‌کنند. از این رو، با تجهیز گره‌ها به آنتن‌های مفروض، تنها گره‌هایی که داخل گلبرگ اصلی آنتن یک گره خاص قرار دارند، باعث ایجاد تداخل برای آن می‌شوند.

از الگوی تشعشعی سوئیچ شونده[۴] و الگوی تشعشعی قابل هدایت[۵] می‌توان به‌عنوان دو فن‌آوری کاربردی در آنتن‌های جهت‌دار یاد کرد [۱۵] - [۱۸]. در روش اول، بُرد مخابراتی هر گره به نواحی مختلفی تقسیم می‌شود و آن گره می‌تواند از یک یا چند ناحیه برای انتقال داده‌ها استفاده کند. در روش دوم، هر گره مجهز به چند آنتن است که هر کدام از آنها دارای یک الگوی تشعشعی قابل شکل‌دهی و هدایت هوشمند می‌باشند.

در استفاده از آنتن‌های جهت‌دار، توجه به این نکته حائز اهمیت است که اگرچه آنها با متمرکز کردن توان ارسالی خود در یک زاویه خاص باعث کاهش تداخل در شبکه می‌شوند، اما در مسیریابی ترافیک‌های چندپخشی افزایش تعداد گره‌های ارسال کننده را به دنبال خواهند داشت. موضوع مورد بحث به‌ترتیب بیان‌گر یک مزیت و یک ایراد در کاربرد این آنتن‌ها است. زمانی که برد مخابراتی یک گره به زاویه خاصی محدود می‌شود تعداد گره‌هایی که در این زاویه قرار می‌گیرند کاهش یافته و به‌دنبال آن مقدار تداخلی که روی گره مفروض ایجاد می‌کنند نیز کاهش می‌یابد. اما از طرف دیگر، این اتفاق کاهش اثر WBA را در طراحی درخت‌های مسیریابی به همراه دارد. در نتیجه، طراحی شبکه‌هایی که در مصرف منابع رادیویی بهینه هستند، در گرو مدیریت صحیح مصالحه بین دو عامل مذکور است. دشواری این مصالحه در حضور فن‌آوری چند رادیویی چند کاناله دوچندان خواهد شد.

با توجه به موارد یاد شده، در این مقاله، مسئله مسیریابی چندپخشی، در شبکه‌های توری بی‌سیم چند رادیویی چند کاناله مجهز به آنتن‌های جهت‌دار، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تشکیل درخت‌های مسیریابی، از چهار عامل WBA، فن‌آوری چند رادیویی چند کاناله، آنتن‌های جهت‌دار و انتخاب آگاهانه مسیر به صورت توأم استفاده می‌شود. با مدیریت صحیح مصالحه بین مزایا و معایب عوامل مذکور، می‌توان تعداد ارسال‌ها در هر درخت مسیریابی و میزان تداخل میان درخت‌های چندپخشی را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. در این راستا، دو الگوریتم DMTC[۶] و DIMTC[۷] ارائه خواهد شد. در الگوریتم اول، از WBA برای کاهش تعداد ارسال‌ها در یک درخت مسیریابی استفاده می‌شود؛ در این الگوریتم، مزیت WBA به‌گونه‌ای تعمیم می‌یابد که قابلیت پشتیبانی از فن‌آوری آنتن‌های جهت‌دار را داشته باشد. در الگوریتم دوم، درخت‌های مسیریابی به‌صورتی طراحی می‌گردند که در آن‌ها علاوه بر تلاش جهت کاهش تعداد ارسال‌ها، مسیرها نیز به‌گونه‌ای انتخاب شوند که کمترین تداخل را روی یکدیگر ایجاد کنند.

ساختار این مقاله بر چندین بخش استوار است. در بخش (۲) کارهای انجام گرفته قبلی در زمینه موضوع مورد نظر بررسی می‌شود. در بخش (۳) مدل مورد استفاده برای شبکه و مفروضات کار بیان می‌گردد. بخش (۴) به تعریف مسئله مسیریابی چندپخشی با حداقل هزینه و میزان تداخل می‌پردازد. در بخش‌های (۵) و (۶) شرح کاملی از جزئیات و نحوه عملکرد دو الگوریتم ابتکاری ارائه می‌گردد. در بخش (۷) قابلیت اجرایی الگوریتم‌های معرفی شده، توسط شبیه‌سازی‌های متنوع مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش (۸) نیز به بیان نتیجه کار و پیشنهادهایی برای کارهای آینده پرداخته خواهد شد.

۲. کارهای مرتبط

در سال‌های اخیر، برخی از مراجع [۴ - ۶] به بررسی مسئله مسیریابی چندپخشی و همه پخشی در شبکه‌های توری بی‌سیم چند کاناله چند رادیویی مجهز به آنتن‌های همه‌جهته پرداخته‌اند که در ادامه به معرفی آنها می‌پردازیم. در [۴] محققان اثبات می‌کنند که مسئله مسیریابی MCMT در شبکه‌های توری بی‌سیم چند کاناله چند رادیویی، یک مسئله NP-hard است. آنها برای حل این مسئله الگوریتم ابتکاری WCTB[۸] را ارائه می‌دهند. این الگوریتم با به‌کاربردن مزیت WBA در ساخت درخت‌های مسیریابی، تعداد ارسال‌ها را در هر درخت کاهش می‌دهد. همچنین، آن‌ها برای غلبه بر تداخل بین درخت‌های چندپخشی الگوریتم ابتکاری MIMCR[۹] را معرفی می‌کنند که تعمیم یافته الگوریتم اول است. الگوریتم جدید، علاوه بر کاهش تعداد ارسال‌ها، با انتخاب آگاهانه مسیر در هر درخت تداخل میان درخت‌های چندپخشی متمایز را کاهش می‌دهد.

محققان در [۵] مسئله مذکور را در شبکه‌های $(MR)^2MC$-WMNs[۱۰] مورد بررسی قرار می‌دهند. آنها با به کار بستن توأم عواملی همچون انتخاب آگاهانه کانال، نرخ ارسال و مسیر، و مزیت WBA در ساخت هر درخت مسیریابی، به طراحی الگوریتم‌های IRMT[۱۱] و IRBT[۱۲] می‌پردازند. این الگوریتم‌ها نه‌تنها تعداد ارسال‌ها و میزان تداخل در درخت‌های مسیریابی را کاهش می‌دهند بلکه بار ترافیکی را به‌صورت متعادل بین کانال‌های مختلف توزیع می‌کنند. این امر باعث بهبود میزان پهنای طیف مصرفی در شبکه‌های مذکور می‌شود.

در مرجع [۶] نیز دو معیار مسیریابی چندپخشی FLMM[۱۳] و $FLMM^R$[۱۴] معرفی می‌گردد که هر دو آن‌ها سه عامل تنوع کانال، تداخل و مزیت WBA را به صورت توأم در ساخت درخت‌ها مد نظر قرار می‌دهند. همچنین، الگوریتم دوم علاوه بر موارد بالا عدم اطمینان در پروتکل MAC مورد استفاده را نیز در نظر می‌گیرد.

در راستای کاهش تعداد ارسال‌ها در یک درخت مسیریابی چندپخشی، مرجع [۷] با استفاده توأم از مزایای دو الگوریتم SPT و MST[۱۵]، به معرفی روش ابتکاری EMRAW[۱۶] در شبکه‌های توری بی‌سیم پرداخته است. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی الگوریتم جدید حاکی از عملکرد بهتر آن در کاهش تعداد ارسال‌ها، در مقایسه با دو الگوریتم قبلی است.

در [۸] محققان با استفاده از معیار EMTX[۱۷] به حل مسئله مسیریابی چندپخشی با گذردهی بالا در شبکه‌های توری بی‌سیم می‌پردازند. آنها در طراحی این معیار مسیریابی مبتنی بر EMTX از سه عامل قابلیت اطمینان پروتکل لایه MAC، مزیت WBA و کیفیت پیوندهای بی-سیم به‌صورت توأم استفاده می‌کنند. هدف این معیار کاهش مجموع EMTX در کل گره‌های ارسال کننده در یک درخت چندپخشی است.

همان‌طور که در بخش مقدمه نیز اشاره شد، مجهز کردن گره‌ها به آنتن‌های جهت‌دار، به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای استفاده هرچه بهتر از پهنای طیف موجود در شبکه، بسیار مورد توجه قرار گرفته است.میزان ظرفیت شبکه‌های بی‌سیم مجهز به آنتن‌های جهت‌دار و مقایسه آن با حالتی که گره‌های شبکه دارای آنتن‌های همه‌جهته باشند، مسئله‌ای است که در مراجع [۱۰]–[۱۴] مورد بررسی قرار گرفته است. نویسندگان در این پژوهش‌ها دریافته‌اند که در مدل‌های مختلف شبکه‌های بی‌سیم، با تجهیز گره‌ها به آنتن‌های جهت‌دار می‌توان به ظرفیت بیشتری در مقایسه با آنتن‌های همه‌جهته دست یافت. همچنین، در این مراجع نشان داده شده که با کاهش پهنای گلبرگ اصلی آنتن‌های جهت‌دار، ظرفیت شبکه رو به افزایش می‌گذارد.

پژوهشگران در مرجع [۱۵] میزان گذردهی قابل دست‌یابی برای هر گره در شبکه‌های اقتضایی مجهز به آنتن‌های جهت‌دار را مورد بررسی قرار می‌دهند. در این تحقیق، مقایسه‌ای بین میزان گذردهی مدل ایده‌آل و مدل واقعی آنتن‌های جهت‌دار صورت می‌گیرد. شبیه‌سازی نتایج به دست آمده مشخص می‌کند که مدل پهنای بیم ایده‌آل عملکردی بسیار نزدیک به مدل پهنای بیم واقعی دارد.

مرجع [۱۶] مسئله مسیریابی همه‌پخشی در شبکه‌های توری بی‌سیم چند نرخی مجهز به آنتن‌های جهت‌دار را مورد بررسی قرار می‌دهد. هدف این مقاله، کاهش میزان تأخیر در درخت‌های مسیریابی است که

برای رسیدن به این هدف تلاش می‌کند گلبرگ آنتن هریک از گره‌های فرستنده به‌گونه‌ای انتخاب شود که کمترین تأخیر را برای درخت به همراه داشته باشد.

مراجع [۱۷] و [۱۸] به بررسی مسئله مسیریابی چندپخشی در شبکه‌های اقتضایی مجهز به آنتن‌های جهت‌دار می‌پردازند. در [۱۷] محققان، یک پروتکل مبتنی بر کاهش مجازی پیوندها (VLR)[۱۸]، به منظور استفاده بهینه از پهنای طیف و انرژی در شبکه‌های مذکور ارائه کرده‌اند. در [۱۸] نیز الگوریتم‌های D-IPCB/M[۱۹] و DB-D-IPCB/M[۲۰] برای تولید درخت‌های چندپخشی معرفی می‌شود که هدف آنها کمینه کردن مصرف انرژی و مقدار تداخل در هر درخت مسیریابی، به صورت توأم است.

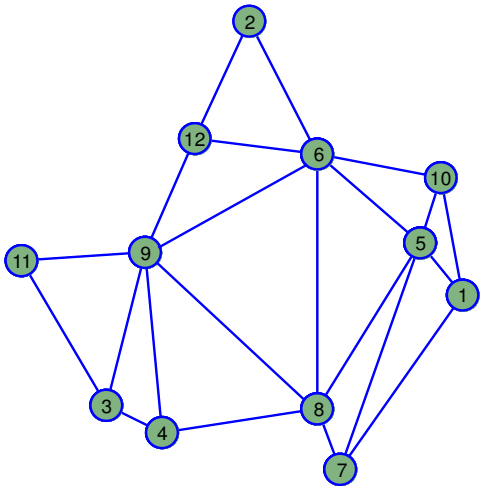
همان‌طور که در بخش مقدمه نیز اشاره شد، به‌کارگیری توأم عواملی چون تنوع رادیو و کانال، WBA و انتخاب آگاهانه مسیر یک راه‌کار بسیار مناسب برای افزایش ظرفیت شبکه‌های توری بی‌سیم است. برخلاف مراجع [۴]- [۸] که فقط عوامل مذکور را در ساخت درخت مسیریابی در نظر می‌گیرند، در این مقاله، علاوه بر این عوامل، فن‌آوری آنتن‌های جهت‌دار نیز در ساخت درخت‌های چندپخشی اثر گذار است. با توجه به قابلیت آنتن‌های جهت‌دار در کاهش تداخل، استفاده از آنها در کنار تنوع رادیو و کانال و انتخاب آگاهانه مسیر، می‌تواندعملکردی به مراتب بهتر از مراجع مذکور داشته باشد. همچنین، در مراجع [۱۷] و [۱۸] مسئله مسیریابی چندپخشی در بستر شبکه‌های اقتضایی مجهز به آنتن‌های جهت‌دار بررسی شده که این شبکه‌ها با محدودیت توان و انرژی مواجه هستند و در نتیجه هدف مقالات مذکور کاهش میزان انرژی مصرفی در شبکه است. این در حالی است که در شبکه‌های توری بی‌سیم که در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرند، هیچگونه محدودیت انرژی وجود ندارد و هدف این مقاله بهبود مصرف منابع رادیویی (پهنای طیف) شبکه است.

۳. مدل شبکه و مفروضات

در این بخش، مقدمات مسئله از جمله مدل بستر شبکه، مدل آنتن‌ها، مدل تداخل و مفروضات تشریح می‌شوند.

۳-۱- مدل بستر شبکه

مطابق شکل (۱)، شبکه توری بی‌سیمی مشتمل بر N گره ثابت در نظر بگیرید. هر گره x در این شبکه دارای r رادیو نیمه دوطرفه[۲۱] است که هر کدام از این رادیوها روی یک کانال مجزا کار می‌کند؛ مجموعه کل کانال‌های مورد استفاده در شبکه برابر C فرض می‌شود. همچنین، بُرد مخابراتی برای همه گره‌ها ثابت و یکسان است. در این مقاله، شبکه مذکور به صورت گراف جهت‌دار G=(V,E) مدل می‌شود که در آن V و E به ترتیب نشان‌گر مجموعه رئوس و مجموعه یال‌های گراف متناظر شبکه هستند. هر رأس گراف بیان‌گر یک گره شبکه و هر یال برابر یک پیوند بی‌سیم در شبکه است. $(x , y)_k$ نشان‌دهنده یک پیوند بی‌سیم است که فرستنده آن گره x و گیرنده گره y است و از کانال k برای ارسال بسته‌های داده استفاده می‌کند. این پیوند بی‌سیم زمانی محقق می‌گردد که اولاً هر دو گره x و y دارای رادیویی باشند که روی کانال k تنظیم شده و ثانیاً گره y داخل گلبرگ اصلی گره x قرار گرفته باشد.

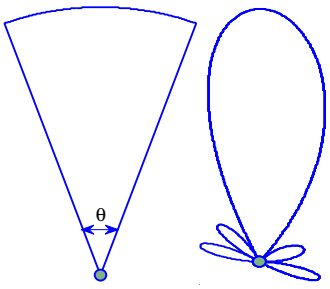


شکل (۱): مثالی از گراف شبکه

Fig. (1): Network graph

۳-۲- مدل آنتن‌های جهت‌دار

هر یک از رادیوهای یک گره در شبکه مفروض روی یک آنتن جهت‌دار تنظیم می‌شوند. مطابق شکل (۲-الف)، در حالت واقعی هر آنتن جهت-دار از یک گلبرگ اصلی و چندین گلبرگ فرعی تشکیل می‌گردد، که به ترتیب نشان‌دهنده بزرگی توان ارسالی در یک راستا و کوچکی آن در راستاهای دیگر است. در این مقاله، به خاطر کوچکی بهره توان گلبرگ‌های فرعی در مقایسه با گلبرگ اصلی، از وجود آنها صرفنظر می‌گردد. شکل گلبرگ اصلی از الگوی تشعشعی ایده‌آل پیروی می‌کند. در این الگو، مطابق شکل (۲-ب) گلبرگ آنتن به صورت قطاعی از یک دایره، با پهنای $0<\theta<2\pi$ مدل شده و توان ارسالی در تمام نقاط داخل این قطاع به طور یکنواخت توزیع و مقدار آن در خارج گلبرگ صفر فرض می‌شود.



(الف) (a) (ب)(b)

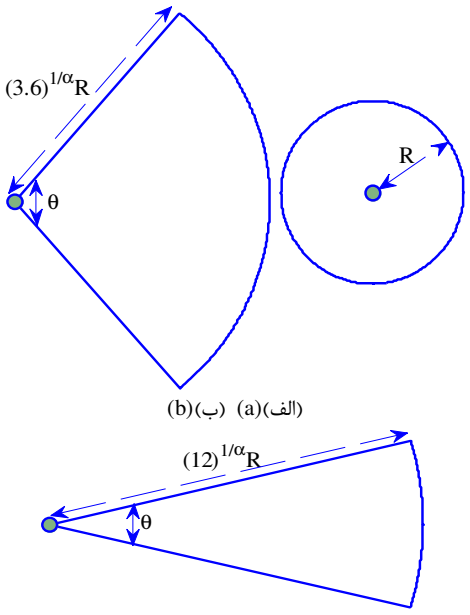
شکل (۲): مدل آنتن‌های جهت‌دار، (الف): مدل گلبرگ واقعی و (ب): مدل گلبرگ ایده‌آل

Fig. (2): Directional antenna model, (a): realistic model and (b): ideal model

بُرد مخابراتی گلبرگ اصلی متناسب با پهنای آن و بُرد حالت ۳۶۰ درجه است و از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۱۵]:

$$R(\theta)=\left(\frac{2\pi}{\theta}\right)^{\frac{1}{\alpha}}R(2\pi). \quad (۱)$$

که در آن α، R و θ به‌ترتیب بیان‌گر ضریب تضعیف مسیر، بُرد مخابراتی آنتن همه‌جهته و پهنای گلبرگ آنتن است. این رابطه نشان می‌دهد که بُرد مخابراتی گلبرگ اصلی با پهنای آن و ضریب تضعیف مسیر نسبت معکوس دارد. یا به عبارت دیگر با افزایش θ یا α، R کاهش پیدا می‌کند که این موضوع در شکل (۳) نشان داده شده است.



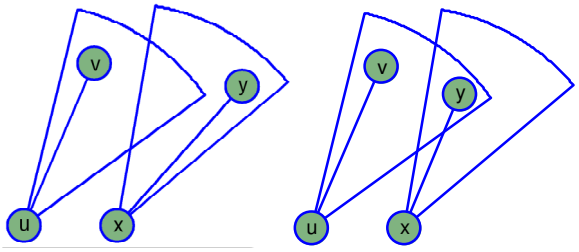
شکل (۳): تغییرات بُرد مخابراتی آنتن جهت‌دار برحسب تغییرات پهنای گلبرگ اصلی (الف): حالت $\theta = 360$، (ب): حالت $\theta = 100$ و (ج): حالت $\theta = 30$

Fig. (3): Communication range of directional antenna versus its beam width (a): $\theta = 360$, $\theta = 100$ and $\theta = 30$.

شایان ذکر است که در این مقاله پیرو مراجع [۱۶] - [۱۸]، آنتن‌های فرستنده جهت‌دار و آنتن‌های گیرنده همه‌جهته فرض می‌شوند.

۳-۳- مدل تداخل

در این مقاله، از مدل تعمیم یافته تداخل پروتکلی برای آنتن‌های جهت‌دار، به‌منظور محاسبه تداخل بین درخت‌های چندپخشی استفاده می‌شود. بر اساس این مدل، با فرض تساوی کانال، زمانی دو پیوند با یکدیگر تداخل دارند که گیرنده یکی در گلبرگ تداخلی فرستنده دیگری واقع باشد. برای روشن‌تر شدن موضوع به مثال شکل (۴) توجه کنید. مطابق شکل (۴-الف)، پیوندهای $(x , y)_k$ و $(u , v)_k$ در صورت هم‌زمانی در ارسال بر روی یکدیگر تداخل ایجاد می‌کنند زیرا که گره y داخل گلبرگ تداخلی گره u قرار گرفته است. همچنین، شکل (۴-ب) نیز نشان‌دهنده عدم تداخل بین پیوندهای مذکور است، زیرا هیچ یک از گره‌های y و v در گلبرگ تداخلی u و x قرار نگرفته‌اند.



(b) (ب) (a) (الف)

شکل (۴): رابطه تداخلی بین دو پیوند در شبکه (الف): حالت دارای تداخل و (ب): حالت بدون تداخل

Fig. (4): Interference relationship between wireless links (a): with interference and (b): without interference.

۴. بیان مسئله

در این مقاله، درخت مسیریابی چندپخشی با T و مجموعه گره‌های ارسال‌کننده هر درخت روی کانال k با V(T , k) نمایش داده می‌شود.

تعریف (۱): سه‌تایی (G, s, M) را در نظر بگیرید. فرض کنید G، s و M به‌ترتیب بیانگر گراف شبکه، گره منبع و مجموعه گره‌های مقصد باشند. هدف مسئله MCMT یافتن درختی از گراف شبکه است، که ریشه آن گره s باشد و با کمترین هزینه، تمام گره‌های موجود در M را پوشش دهد. در این مسئله، هزینه کل درخت مسیریابی از رابطه (۲) به دست می‌آید [۴].

$$Tree_cost(T) = \sum_{k\epsilon\, ch}|V(T , k)|. \quad (۲)$$

مجموعه پیوندهای درخت T که ارسال گره x روی کانال k برای آن‌ها تداخل ایجاد می‌کند نیز، با نماد $IL (x , k ,T)$[۲۲] بیان می‌گردد.

حال، اگر فرض کنیم مجموعه‌ای از چند درخت مسیریابی چندپخشی به نام T_{set} در شبکه موجود باشند، مجموع تداخل ناشی از ارسال گره x روی کانال k برای پیوندهای عضو T_{set} را می‌توان از رابطه (۳) محاسبه نمود.

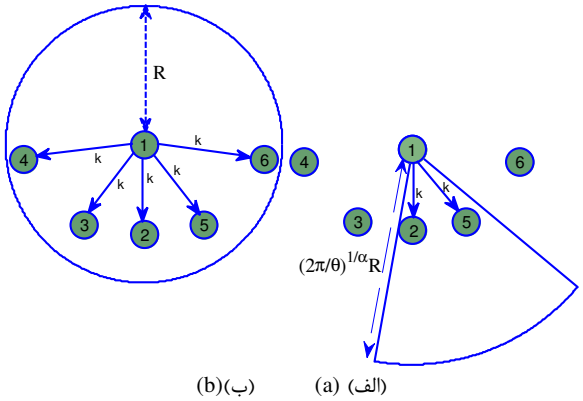
$$NCI(x,k, T_{set}) = \sum_{T^{'}\epsilon T_{set}}\left|IL(x, k,T^{'})\right|. \quad (۳)$$[۲۳]

تعریف (۲): مقدار کل تداخل ایجاد شده توسط پیوندهای عضو درخت $T^{'}$ روی مجموعه درخت‌های مسیریابی T_{set} برابر مجموع تداخلی است که هر یک از گره‌های ارسال کننده درخت مذکور، روی پیوندهای عضو مجموعه T_{set} ایجاد می‌کنند و از رابطه (۴) می‌توان آن را محاسبه کرد.

$$TCI\left(T^{'} ,T_{set}\right) = \sum_{k\,\epsilon\, ch}\sum_{(x\,,\,k)\,\epsilon\, T^{'}} NCI(x, k, T_{set}). \quad (۴)$$[۲۴]

۵- الگوریتم DMTC

در این بخش، با ارائه الگوریتم ابتکاری DMTC به حل مسئله MCMT در شبکه‌های MRMC-WMN مجهز به آنتن‌های جهت‌دار می‌پردازیم. الگوریتم پیشنهادی تعمیم‌یافته الگوریتم WCTB [۴] برای آنتن‌های جهت‌دار است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد مجهز کردن گره‌ها به آنتن‌های جهت‌دار اگرچه باعث کاهش تداخل می‌شود ولی در مقابل، کاهش اثر WBA را به دنبال دارد؛ این موضوع در شکل (۵) به تصویر کشیده شده است.



شکل (۵): مقایسه اثر مزیت WBA برای دو حالت آنتن‌های همه‌جهته و آنتن‌های جهت‌دار (الف): آنتن جهت‌دار و (ب): آنتن همه‌جهته

Fig. (5): Comparing the effect of WBA in directional versus omni-directional antennas (a): directional antenna and (b): omni-directional antenna.

با توجه به شکل (۵-الف)، زمانی که توان ارسالی گره فرستنده به داخل ناحیه لوب اصلی محدود می‌شود، تعداد گره‌های تحت پوشش فرستنده در مقایسه با حالت همه‌جهته (شکل (۵-ب)) کاهش می‌یابد. این موضوع باعث افزایش تعداد ارسال‌ها در درخت مسیریابی و در نتیجه افزایش منابع مصرفی شبکه می‌شود. هدف الگوریتم مذکور این است که ضمن استفاده از مزایای آنتن‌های جهت‌دار، اجازه ندهد تعداد ارسال‌های هر درخت به میزان زیادی افزایش پیدا کند. این الگوریتم برای مدیریت صحیح بین دو عامل فوق، از یک معیار انتخاب کانال در کنار فن‌آوری آنتن‌های جهت‌دار بهره می‌برد. مطابق رابطه (۵)، طراحی این معیار به‌گونه‌ای است که برای هر ارسال، کانالی را انتخاب می‌کند که گلبرگ آنتن آن تعداد بیش‌تری از گره‌های همسایه که دارای آن کانال هستند را تحت پوشش قرار دهد.

$$\text{WBA_Number}(x , k) = |A(x , k)|. \qquad (۵)$$

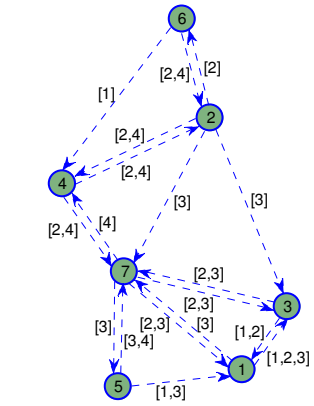
در این رابطه $A(x,k)$ بیانگر مجموعه گره‌های واقع در بُرد مخابراتی گلبرگ مربوط به کانال k است. در مقایسه با الگوریتم WCTB [۴] که در آن کانال مربوط به هر ارسال به صورت تصادفی انتخاب می‌شود، الگوریتم DMTC با به‌کارگیری معیار مذکور، از WBA به‌نحو مؤثرتری در راستای کاهش هزینه کل هر درخت مسیریابی استفاده می‌کند. در نتیجه الگوریتم پیشنهادی کارآیی بهتری در کاهش منابع مصرفی شبکه در مقایسه با الگوریتم WCTB خواهد داشت. در ادامه، با طرح یک مثال به شرح نحوه عملکرد الگوریتم پیشنهادی می‌پردازیم.

شکل (۶-الف) مثالی از یک شبکه توری بی‌سیم است که در آن، پهنای گلبرگ هر یک از آنتن‌های فرستنده ثابت و برابر ۱۰۰ درجه فرض می‌گردد. جهت هر گلبرگ نیز به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود. همچنین، در این شکل پیکان‌ها نشان‌دهنده جهت ارسال و اعداد نوشته شده روی هر پیکان بیان‌گر مجموعه کانال‌های قابل دسترس برای آن ارسال است.

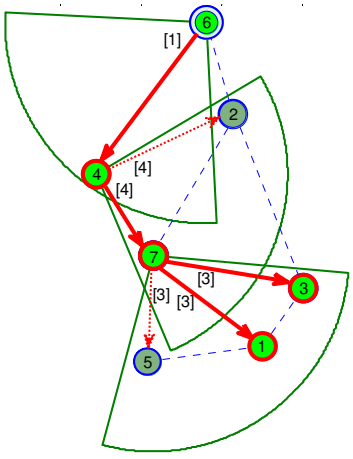
در این شبکه، گره $S = \{6\}$ و مجموعه گره‌های $M = \{1, 3, 4, 7\}$ را به ترتیب به عنوان گره منبع و مجموعه گره‌های مقصد در درخت مسیریابی در نظر بگیرید. هدف الگوریتم DMTC آن است که با در نظر گرفتن آنتن‌های جهت‌دار برای گره‌های شبکه، درخت مسیریابی را به گونه‌ای شکل دهد که ریشه آن گره S باشد و تمام گره‌های موجود در مجموعه M را پوشش دهد. در این الگوریتم، در ابتدا وزن تمام پیوندهای بی‌سیم موجود در شبکه برابر یک در نظر گرفته می‌شود. سپس در هر مرحله کوتاه‌ترین مسیر ممکن بین هر یک از گره‌های گیرنده و گره منبع مشخص و از میان آنها کوتاه‌ترین مسیر انتخاب و به درخت مسیریابی اضافه می‌شود. شایان ذکر است با اضافه شدن مسیر جدید وزن پیوندهای آن و همچنین، وزن پیوندهای تحت پوشش گره‌های فرستنده مسیر مذکور صفر خواهد شد. منظور از پیوندهای تحت پوشش هر فرستنده، پیوندهایی است که داخل گلبرگ اصلی آنتن آن فرستنده قرار دارند. مطابق شکل (۶-ب) پیوندهای $(7, 1)_3$، $(7, 3)_3$ و $(7, 5)_3$، پیوندهای تحت پوشش ارسال $(7, 3)$ هستند؛ یعنی گره ۷ با یک بار ارسال بسته‌های داده روی کانال ۳ هر سه پیوند مذکور را به‌طور هم‌زمان پوشش می‌دهد.

برای روشن‌تر شدن نحوه کار الگوریتم، فرض کنید در ابتدا هزینه کل درخت برابر صفر است ($\text{Tree_cost}(T) = 0$). حال، مطابق شکل (۶-ب) کوتاه‌ترین مسیر بین گره ۶ و گره ۴، یعنی پیوند $(6, 4)$ را در نظر بگیرید. با توجه به شکل (۶-الف) می‌توان دریافت که تنها کانال قابل دسترس برای این پیوند کانال ۱ است؛ درنتیجه نیازی به محاسبه مقدار WBA_Number برای آن نیست و الگوریتم همین کانال را برای آن انتخاب می‌کند. پس از انتخاب کانال، وزن این پیوند با مقدار اولیه هزینه درخت جمع می‌شود؛ بنابراین $\text{Tree_cost}(T) = ۱$ و وزن پیوند مذکور نیز که تنها پیوند تحت پوشش گلبرگ اصلی فرستنده ۶ است، برابر صفر خواهد شد. در مرحله ۲، مسیر $\{(6, 4)_1 , (4, 7)_4\}$ به عنوان کوتاه‌ترین مسیر بین گره منبع و گره ۷ انتخاب می‌گردد. در این مسیر، پیوند $(6, 4)_1$ در مرحله قبل به عضویت درخت در آمده لذا در این مرحله وزن آن برابر صفر است. در مورد پیوند $(4, 7)_4$ نیز در ابتدا مقدار معیار WBA_Number برای هرکدام از کانال‌های قابل دسترس این پیوند (کانال‌های ۲ و ۴) محاسبه می‌شود. در این مورد چون مقدار این معیار برای هر دو کانال برابر ۲ است، از بین آنها یکی به طور تصادفی انتخاب می‌گردد که در اینجا کانال مذکور کانال ۴ است. در انتها مجموع وزن پیوندهای عضو این مسیر که برابر ۱ است، به مقدار به دست آمده برای هزینه درخت در مرحله قبل اضافه می‌شود؛ که در این صورت مقدار $\text{Tree_cost}(T) = ۲$ می‌گردد. در مرحله ۳ کوتاه‌ترین مسیر ممکن بین گره ۶ و ۱ که همان مسیر $\{(6, 4)_1, (4, 7)_4, (7, 1)_3\}$ است به درخت مسیریابی اضافه می‌شود. دو پیوند اول عضو این مسیر در مراحل قبلی به عضویت درخت در آمده و وزن آن‌ها برابر صفر است؛ اما برای پیوند $(7, 1)_3$ الگوریتم از بین کانال‌های مشخص شده در شکل (۶-الف) کانال ۳ را انتخاب می‌کند زیرا مقدار به دست آمده برای

معیار WBA_Number(7, 3) آن از کانال ۲ بیشتر است؛ به عبارت دیگر فرستنده ۷ با ارسال روی کانال شماره ۳ تعداد سه پیوند را پوشش داده، که این مقدار در مقایسه با WBA_Number(7, 2) = ۲ بیشتر است. بعد از آن، وزن این مسیر با مقدار قبلی هزینه درخت جمع شده و Tree_cost(T) =۳ قرار می‌گیرد.به‌دنبال آن، وزن پیوند $(7, 1)_3$ و پیوندهای $(7, 3)_3$ و $(7, 5)_3$ که توسط گلبرگ اصلی آنتن فرستنده گره ۷ پوشش داده می‌شوند، برابر صفر قرار می‌گیرد.



(a)(الف)



(b)(ب)

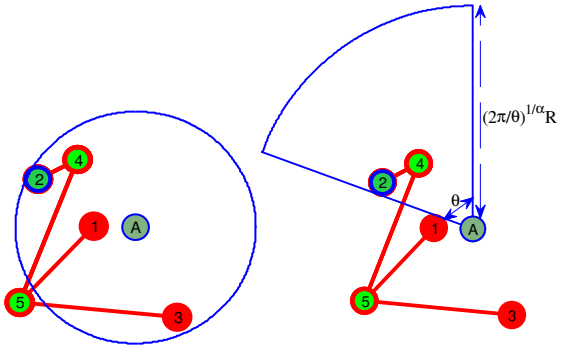
شکل (۶): نمایش عملکرد الگوریتم DMTC(الف): مدل گراف شبکه (ب): نمایش درخت مسیریابی

Fig. (6): Operation of the DMTC algorithm (a): network model and (b): the multicast routing tree.

در مرحله آخر، مسیر $\{(7, 3)_3 , (4, 7)_4 , (6, 4)_1\}$ به‌عنوان کوتاه‌ترین مسیر بین گره‌های ۶ و ۳ توسط الگوریتم انتخاب می‌شود. در این مسیر نیز، دو پیوند اول پیش از این عضو درخت بوده و پیوند $(7, 3)_3$ در مرحله قبل توسط ارسال گره ۷ روی کانال ۳ پوشش داده شده و در نتیجه، وزن هر سه برابر صفر است. حال با توجه به صفر بودن مجموع وزن این مسیر، مقدار هزینه نهایی درخت برابر ۳ = Tree_cost(T) خواهد شد.

۶- الگوریتم DIMTC

در بخش قبل، تمرکز اصلی روی کاهش تعداد ارسال‌ها در یک درخت مسیریابی چندپخشی در شبکه‌های توری بی‌سیم مجهز به آنتن‌های جهت‌دار بود. می‌دانیم که علاوه بر هزینه ارسال‌ها، تداخل میان پیوندها یکی دیگر از دلایل به هدر رفتن پهنای طیف شبکه است. مسیریابی نامناسب می‌تواند منجر به مقدار زیادی تداخل بین درخت‌های مسیریابی شود. از اینرو، در این بخش ما برآنیم تا با استفاده از الگوریتم مسیریابی DIMTC مقدار تداخل میان یک درخت مسیریابی جدید و درخت‌های قبلی را در شبکه‌های توری بی‌سیم مجهز به آنتن‌های جهت‌دار، کاهش دهیم. در این الگوریتم، با استفاده توأم از آنتن‌های جهت‌دار و انتخاب آگاهانه مسیرها در ساخت یک درخت چندپخشی جدید، میزان تداخل در درخت مذکور کاهش می‌یابد. مطابق شکل (۷-الف) مجهز کردن گره‌ها به آنتن‌های جهت‌دار باعث می‌شود تعداد پیوندهایی که در بُرد فرستنده A قرار دارند، در مقایسه با حالت همه‌جهته (شکل (۷-ب)) کاهش چشمگیری داشته باشد. از این بحث می‌توان دریافت که گرچه استفاده از آنتن‌های جهت‌دار باعث افزایش تعداد ارسال‌ها می‌گردد، ولی در مقابل کاهش تداخل را نیز در پی دارد.



(b)(ب) (a) (الف)

شکل (۷): مقایسه میزان تداخل برای دو فن‌آوری (الف):آنتن‌های جهت‌دار و (ب): آنتن‌های همه‌جهته

Fig. (7): Comparing the amount of interference between directional and omni-directional antennas (a): directional antenna and (b): omni-directional antenna.

یک راه‌کار مناسب برای مدیریت مصالحه فوق آن است که معیار انتخاب کانال برای هر فرستنده در درخت مسیریابی به‌گونه‌ای باشد که در آن اثر WBA و میزان تداخل به‌صورت توأم مدنظر قرار گیرد. به عبارت دیگر، برای هر ارسال کانالی انتخاب شود که هر دو عامل را به‌صورت متعادل برآورده سازد. در این راستا از معیار زیر برای انتخاب کانال استفاده می‌گردد.

$$^{۲۵}\mathrm{CSM}(x, k) = \frac{\mathrm{NCI}(x, k, T_{set})}{\mathrm{WBA_Number}(x , k)}. \qquad (۶)$$

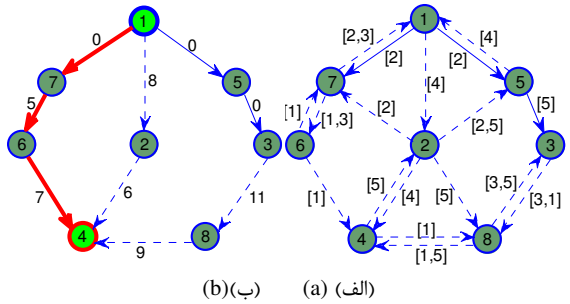
طبیعی است برای هر ارسال، کانالی اولویت دارد که معیار CSM را حداقل کند. قبل از توضیح جزئیات مربوط به الگوریتم پیشنهادی، به تعریف مسئله مسیریابی چندپخشی با حداقل مقدار تداخل می‌پردازیم.

تعریف (۴): فرض کنید مسئله (G, s, M, T_{set}) مثالی از یک مسئله MIMT[۲۶] باشد که در آن G، s، M و T_{set} به‌ترتیب نشان‌دهنده گراف شبکه، گره منبع، مجموعه گره‌های مقصد و مجموعه درخت‌های چندپخشی موجود در شبکه هستند. هدف مسئله MIMT یافتن درختی روی گراف شبکه است که ریشه آن، گره s باشد و گره‌های موجود در M را به گونه‌ای پوشش دهد که برای درخت‌های مجموعه T_{set} کمترین تداخل را ایجاد کند.

در این الگوریتم نیز مشابه الگوریتم بخش قبل، در ابتدا وزن تمام پیوندهای گراف شبکه یک در نظر گرفته می‌شود. سپس، از بین تمام کوتاه‌ترین مسیرهای موجود در گراف بین گره منبع و یک گره مقصد، مسیری انتخاب می‌شودکه مجموع CSMهای یال‌های آن کمینه باشد. یا به بیان دیگر در هر مرحله، مقدار معیار CSM برای هر یک از فرستنده‌های عضو این مسیرها محاسبه شده و پس از آن مسیری انتخاب می‌گردد که مقدار CSM(path(x,y)) آن که از رابطه (۷) به دست می‌آید، از بقیه مسیرها کمتر باشد.

$$CSM(path(x,y)) = \sum_{x \in path(x,y)} CSM(x\ ,\ k). \qquad (۷)$$

برای مثال، گراف نشان داده شده در شکل (۸-الف) را در نظر بگیرید. در این گراف، اعداد نوشته شده کنار هر یک از پیکان‌ها بیانگر مجموعه کانال‌های قابل دسترس برای آن پیوند است. عدم تقارن در کانال‌های قابل دسترس برای پیوندهای رفت و برگشت بین دو گره ناشی از مجهز بودن گره‌ها به آنتن‌های جهت‌دار و انتخاب تصادفی بیم ارسال در این آنتن‌ها است. در این شرایط، ممکن است برای گره اول تنها گلبرگ یک کانال آن گره دوم را تحت پوشش قرار دهد و در حالت عکس دو یا سه گلبرگ از گره دوم، گره اول را پوشش دهد. پیوندهایی که با خط پُر نمایش داده شده‌اند نیز نشانگر پیوندهایی هستند که از قبل به عضویت درخت مسیریابی در آمده‌اند و وزن آن‌ها برابر صفر است. فرض کنید در این گراف کوتاه‌ترین مسیر بین گره منبع شماره ۱ و گره مقصد شماره ۴ مد نظر باشد. الگوریتم DIMTC برای یافتن این مسیر ابتدا تمام کوتاه‌ترین مسیرهای موجود بین گره منبع و گره مقصد مذکور را پیدا می‌کند (با در نظر گرفتن هزینه ارسال هر پیوند که در ابتدا برابر یک فرض شد). این مسیرها در شکل (۸-ب) به تصویر کشیده شده‌اند. بعد از پیدا کردن این مسیرها، باید از بین آنها مسیری انتخاب گردد که مقدار معیار CSM(path(1, 4)) به دست آمده برای آن از بقیه مسیرها کمتر باشد. برای این منظور، الگوریتم ابتدا برای هر یک از کانال‌های موجود برای هر یک از پیوندهای عضو این مسیرها، معیار CSM را محاسبه و سپس، از میان آنها کانالی انتخاب می‌کند که CSM کمتری نسبت به بقیه کانال‌های آن پیوند داشته باشد (اعداد نوشته شده روی پیوندهای شکل (۸-ب) نشانگر این مقادیر است). به عنوان مثال، پیوند (7, 6) را در نظر بگیرید. الگوریتم برای این پیوند، مقدار معیار CSM را برای هر دو کانال قابل دسترس آن یعنی کانال‌های شماره ۱ و ۳ محاسبه می‌کند. حال فرض کنید مقدار معیار CSM(7, 1) = ۹ و CSM(7, 3) =۵ باشد؛ در اینجا کانال شماره ۳ برای این پیوند انتخاب می‌شود؛ زیرا مقدار معیار CSM برای کانال مذکور از مقدار این معیار برای کانال شماره ۱ کمتر است. البته توجه به این نکته ضروری است که مقدار معیار CSM برای پیوندهایی که از قبل به عضویت درخت مسیریابی در آمده‌اند، محاسبه نمی‌شود. یا به عبارت دیگر مقدار این معیار برای پیوندهای مذکور صفر در نظر گرفته می‌شود. زیرا هزینه این پیوندها در مسیرهای قبلی محاسبه شده و دیگر نیازی به محاسبه مجدد آنها نیست. بعد از محاسبه مقدار معیار CSM برای همه پیوندهای نمایش داده شده در شکل (۸-ب) مسیری انتخاب می‌گردد که مقدار معیار CSM(path(1, 4)) آن از همه مسیرها کمتر باشد. مطابق شکل (۸-ب) مسیر انتخاب شده در این مثال مسیر $\{(1, 7)_2, (7, 6)_3, (6, 4)_1\}$ است. زیرا برای آن معیار ۱۲ = CSM(path(1, 4)) است که از مقادیر به دست آمده برای دیگر مسیرها کمتر می‌باشد.



(ب)(b) (الف) (a)

شکل (۸): نمایش نحوه عملکرد الگوریتم DIMTC (الف): مدل گراف شبکه و (ب): کوتاه‌ترین مسیرها بین گره ۱ و ۴

Fig. (8): Operation of DIMTC in path selection (a): network model and (b): the shortest path from node 1 to node 4.

پس از مشخص شدن مسیر، در این الگوریتم نیز مانند الگوریتم بخش قبل، وزن تمام پیوندهای عضو مسیر و همچنین، پیوندهای تحت پوشش هر فرستنده صفر می‌شود و این فرآیند تا جایی ادامه پیدا می‌کند تا تمام گره‌های عضو مجموعه M توسط درخت مسیریابی پوشش داده شود.

در مقایسه با الگوریتم [۴MIMCR]، الگوریتم پیشنهادی DIMTC تداخل بین درخت‌های مسیریابی چندپخشی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد که این موضوع به دو دلیل اتفاق می‌افتد. دلیل اول، مجهز کردن گره‌های فرستنده در الگوریتم DIMTC به آنتن‌های جهت‌دار است. دلیل دیگر، این است که در الگوریتم MIMCR معیار انتخاب کانال تصادفی است. به بیان دیگر، زمانی که در این الگوریتم تمام کوتاه‌ترین مسیرهای موجود در شبکه بین گره منبع و مقصد مشخص می‌شود، برای هر کدام از پیوندهای عضو این مسیرها یک کانال به صورت تصادفی از بین کانال‌های قابل دسترس آن پیوند انتخاب می‌شود. این معیار نمی‌تواند معیار مطلوبی برای انتخاب کانال ارسال باشد، زیرا ممکن است ارسال روی کانال مذکور تداخل بیشتری را نسبت به ارسال روی کانال‌های دیگر به همراه داشته باشد. حال آنکه

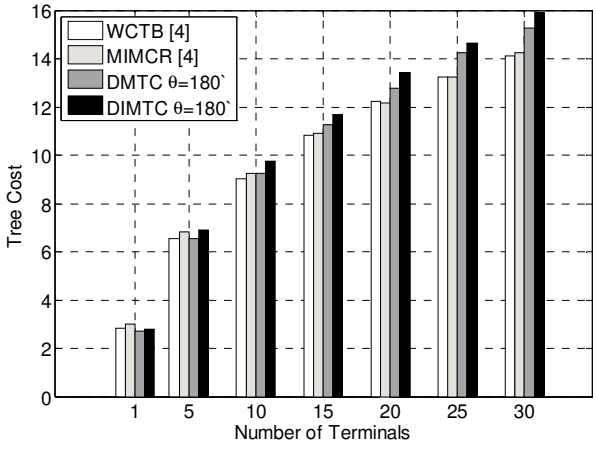
در الگوریتم DIMTC برای هر یک از کانال‌های قابل دسترس یک پیوند، معیار CSM محاسبه می‌گردد که در آن مقدار تداخل و تعداد ارسال‌ها به صورت توأم در نظر گرفته می‌شود. توسط این معیار، از بین کانال‌های موجود برای یک پیوند، بهترین کانال که کمترین میزان تداخل و بیشترین تأثیر را در کاهش هزینه درخت دارد، انتخاب می‌شود. در نتیجه استفاده توأم از فن‌آوری آنتن‌های جهت‌دار و معیار CSM کارآیی بهتری را برای الگوریتم DIMTC در مقایسه با الگوریتم MIMCR رقم می‌زند.

مزیت الگوریتم DIMTC نسبت به الگوریتم قبلی در این است که در این الگوریتم کاهش تعداد ارسال‌ها در هر درخت مسیریابی و کاهش تداخل میان درخت‌های مسیریابی مختلف به طور همزمان صورت می‌گیرد.

۷- شبیه‌سازی و نتایج عددی

در این بخش، با استفاده از شبیه‌سازی‌های متنوع به راستی آزمایی قابلیت اجرایی الگوریتم‌های ارائه شده و مقایسه آن با الگوریتم‌های WCTB و MIMCR [۴] می‌پردازیم. بستر آزمایش شبکه توری بی‌سیم است که گره‌های آن در یک ناحیه مربعی با ابعاد ۱۰۰۰متر × ۱۰۰۰متر، به صورت تصادفی توزیع شده‌اند. هر یک از گره‌های شبکه در حالت پیش‌فرض دارای ۳ رادیو است که روی ۳ کانال مجزا به طور تصادفی تنظیم می‌شوند. هر یک از این رادیوها مجهز به یک آنتن جهت‌دار بوده که در آنها گلبرگ ارسال به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود. به عبارت دیگر، جهت ارسال بسته‌های داده در هر گره به‌صورت تصادفی مشخص می‌گردد. بُرد مخابراتی برای هر گره در حالت همه جهته ۳۰۰ متر در نظر گرفته می‌شود و بُرد مخابراتی برای آنتن‌های جهت‌دار نیز از رابطه (۱) به‌دست می‌آید. همچنین بُرد تداخلی در هر حالت دو برابر بُرد مخابراتی آن فرض می‌شود. تمام شبیه‌سازی‌ها روی گراف‌های پیوسته اجرا می‌گردد. بدین ترتیب، اگر گرافی شرط پیوستگی را دارا نبود پیش از اجرای محاسبات حذف می‌گردد. هر کدام از نتایج عددی با میانگین‌گیری روی نتایج ۱۰۰ تکرار از آزمایش به دست می‌آید. در همه سناریوها پارامترهای f، t، N و ch به ترتیب نشان‌دهنده تعداد درخت‌های چندپخشی، تعداد گره‌های مقصد، تعداد گره‌های شبکه و تعداد کانال‌های قابل استفاده در شبکه است. در تمام شبیه‌سازی‌ها ضریب تضعیف مسیر برابر ۴ فرض می‌شود ($\alpha = 4$). همچنین درخواست ترافیک‌های چندپخشی به طور متوالی وارد شبکه می‌گردد و هر درخواست هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد درخواست‌های بعدی در اختیار نمی‌گذارد.

سناریوی اول: در این سناریو، به مقایسه تغییرات تعداد ارسال‌ها نسبت به تغییرات تعداد گره‌های مقصد در الگوریتم‌های مختلف می‌پردازیم. بدین منظور، مقادیر پارامترهای f، N و ch به ترتیب برابر ۳۰، ۳۱ و ۶ فرض می‌شوند. سپس، مقدار پارامتر t را از ۱ تا ۳۰ افزایش داده و نمودار تغییرات تعداد ارسال‌ها در الگوریتم‌های مذکور را رسم می‌کنیم (شکل (۹)). همان‌طور که انتظار می‌رفت، با مجهز کردن گره‌ها به آنتن‌های جهت‌دار تعداد متوسط ارسال‌ها افزایش می‌یابد. دلیل این اتفاق این است که آنتن‌های جهت‌دار با متمرکز کردن توان ارسالی خود در یک جهت، باعث کاهش اثر WBA در ساخت درخت‌های مسیریابی می‌شوند. با کاهش اثر WBA هزینه کل درخت مسیریابی افزایش پیدا می‌کند. ولی با این حال این افزایش هزینه در الگوریتم‌های پیشنهادی اندک بوده است. درصد افزایش هزینه هر درخت در دو الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم WCTB در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین، می‌توان مشاهده کردکه هزینه هر درخت مسیریابی با افزایش t افزایش پیدا می‌کند. زیرا با افزایش تعداد گره‌های مقصد درخت مسیریابی بزرگتر شده و در نتیجه تعداد ارسال‌ها در درخت افزایش می‌یابد.



شکل (۹): نمودار مقایسه تغییرات تعداد ارسال‌ها نسبت به تعداد گره‌های مقصد، برای الگوریتم‌های مختلف

Fig. (9):Changes of the number of transmissions versus the number of receivers

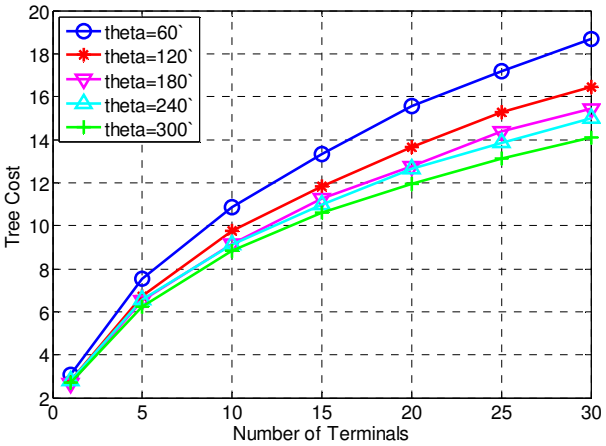
جدول (۱): درصد افزایش هزینه در دو الگوریتم DMTC و DIMTC نسبت به الگوریتم WCTB

Table (1): Increment of the tree cost in DMTC and DIMTC versus WCTB

Number of terminals		t = 10	t = 15	t = 20	t = 25	t = 30
WCTB	Tree cost	9	10.9	12.2	13.2	14.1
DMTC	Tree cost	9.2	11.1	12.8	14.2	15.5
	Cost increment	2.2%	1.8%	4.9%	7.5%	8.5%
DIMTC	Tree cost	9.8	11.8	13.5	14.7	16
	Cost increment	8.8%	8.2%	10.6%	11.3%	12.7%

سناریوی دوم: در این سناریو، به بررسی تغییرات تعداد ارسال‌ها نسبت به تغییرات تعداد گره‌های مقصد و پهنای گلبرگ آنتن‌ها در الگوریتم DIMTC پرداخته می‌شود. در ابتدا مقادیر هر یک از پارامترهای مذکور را برابر f = ۳۰، N = ۳۱، ch = ۶ قرار می‌دهیم. سپس، مقدار پارامتر t را از ۱ تا ۳۰ و پهنای گلبرگ اصلی هر آنتن را از ۶۰ درجه تا ۳۰۰ درجه افزایش داده و نمودار تغییرات تعداد

ارسال‌ها در الگوریتم مذکور را رسم می‌کنیم. این نمودار در شکل (۱۰) نمایش داده می‌شود. از این نمودار می‌توان دریافت که با کاهش پهنای گلبرگ آنتن‌ها تعداد متوسط ارسال‌ها افزایش می‌یابد. زیرا که با کاهش پهنای گلبرگ آنتن‌ها اثر WBA نیز رو به کاهش می‌گذارد؛ که این موضوع افزایش زیاد تعداد ارسال‌ها در پهناهای باریک‌تر را به دنبال دارد. مقادیر عددی افزایش تعداد ارسال‌ها در گلبرگ‌های با پهنای مختلف نسبت به پهنای گلبرگ ۳۰۰ درجه در جدول (۲) مرقوم شده است.



شکل (۱۰): نمودار مقایسه تغییرات تعداد ارسال‌ها نسبت به تعداد گره‌های مقصد برای θهای مختلف

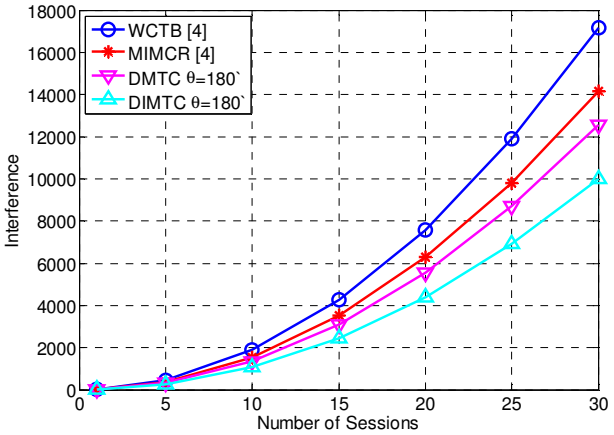
Fig. (10): Effect of beam-width on the number of transmissions

جدول (۲): درصد افزایش تعداد ارسال‌ها در گلبرگ‌های با پهنای مختلف نسبت به $\theta = ۳۰۰$ در الگوریتم DIMTC

Table (2): Numerical results of increment of the tree cost at the different θs versus $\theta = 300$.

Beam-width		$\theta = 240$	$\theta = 180$	$\theta = 120$	$\theta = 60$
Tree cost	t = 10	9.4	9.4	9.8	10.9
	t = 15	11	11.4	11.9	13.7
	t = 20	12.8	13	13.8	15.8
	t = 25	14	14.5	15.4	17.2
	t = 30	15	15.5	16.5	18.9
Cost increment	t = 10	4.4%	4.4%	8.8%	21.11%
	t = 15	2.80%	6.54%	11.21%	28.03%
	t = 20	6.66%	8.33%	15%	31.66%
	t = 25	6.87%	10.68%	17.55%	31.29%
	t = 30	6%	9.03%	14.54%	34.04%

سناریوی سوم: در این سناریو، به مقایسه تغییرات مقدار تداخل در دو الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های WCTB و MIMCR می‌پردازیم. در ابتدا، مقادیر پارامترهای چهارگانه به ترتیب برابر f = ۳۰، t = ۱۰، N = ۳۱ و ch = ۶ فرض می‌شوند. نمودار شکل (۱۱) نشان می‌دهد که با افزایش تعداد درخت‌های مسیریابی در شبکه مقدار تداخل نیز زیاد می‌شود. توجیه این مسئله این است که با افزایش تعداد درخت‌ها تعداد کل ارسال‌های موجود در شبکه افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار تداخل ایجاد شده توسط این ارسال‌ها روبه افزایش می‌گذارد.



شکل (۱۱): نمودار مقایسه تغییرات مقدار تداخل در الگوریتم‌های مختلف

Fig. (11):Changes the amount of interference versus the number of sessions

در نمودار مذکور می‌توان مشاهده کرد که دو الگوریتم پیشنهادی این مقاله تداخل بین درخت‌های چندپخشی را به میزان قابل‌توجهی کاهش داده‌اند. همچنین می‌توان دید که الگوریتم DIMTC دارای تداخل کمتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها است. توجیه این مسئله این است که در الگوریتم مذکور با استفاده توأم از فن‌آوری آنتن‌های جهت‌دار، معیار CSM و انتخاب آگاهانه مسیر (به‌طوری که مسیرهای با کم‌ترین تداخل انتخاب شوند) مقدار تداخل در بین درخت‌های مسیریابی بسیار کاهش پیدا می‌کند. این موضوع، برتری میزان گذردهی و استفاده هرچه بهتر از منابع رادیویی، در الگوریتم مذکور را در پی دارد. مقادیر کمی کاهش تداخل (بر حسب درصد)، در الگوریتم‌های DMTC و DIMTC نسبت به الگوریتم WCTB در جدول (۳) آورده شده است.

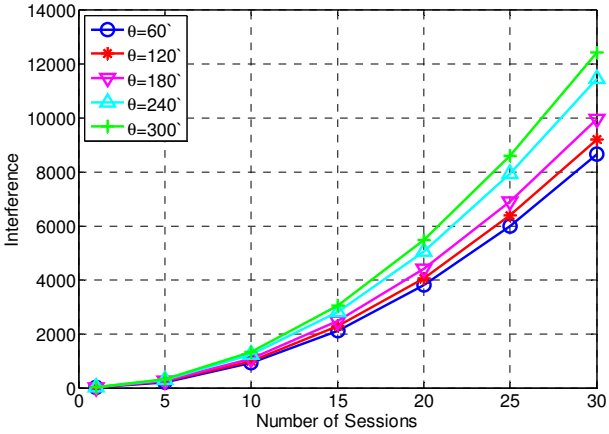
جدول (۳): مقادیر عددی کاهش تداخل در الگوریتم‌های پیشنهادی نسبت به الگوریتم WCTB

Table (3): Numerical results of the interference reduction in DMTC and DIMTC versus WCTB

Number of terminals		t = 10	t = 15	t = 20	t = 25	t = 30
WCTB	Interference	2000	4200	7600	12000	17100
DMTC	Interference	1400	3000	5600	8900	12700
	Interference reduction	30%	28.57 %	26.31 %	25.83 %	25.73 %
DIMTC	Interference	1000	2500	4400	7000	10000
	Interference reduction	50%	40.47 %	42.1 %	41.66 %	41.52 %

سناریوس چهارم:در این قسمت قصد داریم تا با شبیه‌سازی مقادیر به دست آمده برای تداخل در الگوریتم DIMTC، میزان تغییرات این مقادیر را نسبت به تغییرات پهنای گلبرگ آنتن‌ها مورد بررسی قرار دهیم. مانند سناریوهای قبلی، مقادیر پارامترهای چهارگانه را به‌ترتیب برابر f = ۳۰، t = ۱۰، N = ۳۱ و ch = ۶ قرار می‌دهیم. شکل (۱۲) نمایشگر نتایج به دست آمده از این شبیه‌سازی است. این نتایج حاکی از این است که اگرچه استفاده از آنتن‌های جهت‌دار، افزایش تعداد ارسال‌ها در هر درخت مسیریابی را به‌دنبال دارد و این موضوع باعث

استفاده بیشتر از منابع رادیویی شبکه می‌شود اما از طرف دیگر مقدار تداخل هر درخت چندپخشی را به طور مؤثری کاهش می‌دهد و از این طریق، اثر منفی افزایش تعداد ارسال‌ها بر گذردهی شبکه را از بین می‌برد. از مشاهده این نمودارها درمی‌یابیم که هرچه پهنای گلبرگ اصلی در آنتن‌ها کمتر باشد مقدار تداخل کل هر یک از درخت‌های چندپخشی کمتر است. این کاهش تداخل باعث می‌شود که مصرف منابع رادیویی در شبکه بهبود یابد. مقادیر عددی کاهش تداخل (برحسب درصد) در پهنای گلبرگ‌های مختلف، نسبت به پهنای گلبرگ ۳۰۰ درجه در جدول (۴) آورده شده است.



شکل (۱۲): نمودار تغییرات مقدار تداخل در الگوریتم DIMTC

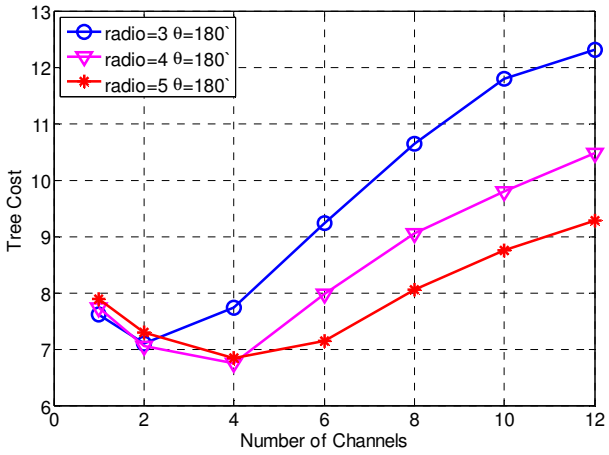
Fig. (12): Effect of beam-width on the amount of interference

جدول (۴): درصد کاهش مقدار تداخل در گلبرگ‌هایبا پهنای مختلف نسبت به $\theta = ۳۰۰$ در الگوریتم DIMTC

Table (4): Numerical results of the interference reductionat the different θs versus $\theta = 300$.

Beam-width		$\theta = 240$	$\theta = 180$	$\theta = 120$	$\theta = 60$
Interference	t = 10	1100	1000	900	800
	t = 15	2950	2400	2200	2100
	t = 20	5100	4400	4000	3850
	t = 25	7950	7000	6200	5950
	t = 30	11500	10000	9100	8700
Interference reduction	t = 10	8.33%	16.66%	25%	33.33%
	t = 15	4.83%	16.13%	29.03%	32.25%
	t = 20	7.27%	20%	27.27%	30%
	t = 25	7.55%	18.6%	27.9%	30.81%
	t = 30	8%	20%	27.2%	30.4%

سناریوی پنجم: در این قسمت تغییرات تعداد ارسال‌ها در الگوریتم DIMTC نسبت به تغییر تعداد کانال‌ها برای تعداد رادیوهای مختلف بررسی می‌شود. در این شبیه‌سازی مقادیر پارامترهای f، t و N به ترتیب برابر ۳۰، ۱۰ و ۴۱ فرض می‌شود و مقدار پارامتر ch از ۱ تا ۱۲ تغییر می‌کند. از نمودار شکل (۱۳) می‌توان فهمید که با افزایش تعداد کانال‌ها، تعداد متوسط ارسال‌ها در یک درخت مسیریابی افزایش می‌یابد. دلیل این اتفاق این است که با افزایش تعداد کانال‌ها تنوع انتخاب کانال برای هر پیوند بیشتر می‌شود؛ که این موضوع کاهش اثر WBA در ساخت درخت‌های مسیریابی را به دنبال دارد. در نتیجه کمتر شدن اثر مذکور تعداد ارسال‌ها در هر درخت چندپخشی رو به افزایش می‌گذارد. همچنین، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش تعداد رادیوها نیز هزینه کل درخت افزایش پیدا می‌کند. دلیل این موضوع نیز آن است که با افزایش تعداد رادیوهای هر گره تعداد کانال‌های قابل دسترس برای هر پیوند افزایش می‌یابد و در نتیجه هزینه کل در هر درخت افزایش پیدا می‌کند. علت کاهش تعداد ارسال‌ها در هر نمودار این است که تا زمانی که تعداد کانال‌های موجود در شبکه کمتر از تعداد رادیوها است، اضافه شدن یک کانال برای گره‌ها، به منزله استفاده از یک رادیو اضافه‌تر است. حال چون آنتن هر رادیو از نوع جهت‌دار با پهنای گلبرگ محدود است، اضافه شدن یک رادیو قابل استفاده برای یک گره باعث پوشش تعداد بیشتری از گره‌های همسایه توسط گره مذکور می‌شود و بنابراین تعداد متوسط ارسال‌ها کاهش می‌یابد.



شکل (۱۳): نمودار مقایسه تغییرات تعداد ارسال‌ها بر حسب تعداد کانال‌ها برای تعداد رادیوهای مختلف

Fig. (13): Changes of the number of transmissions versus the number of channels

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله دو مسئله مسیریابی MCMT و MIMT در شبکه‌های توری بی‌سیم مجهز به آنتن‌های جهت‌دار مورد بررسی قرار گرفت. برای حل این مسئله‌ها دو الگوریتم ابتکاری DMTC وDIMTC ارائه شد. در الگوریتم اول، هدف تنها کاهش تعداد ارسال‌ها در یک درخت چندپخشی بود؛ اما در الگوریتم دوم علاوه بر کاهش تعداد ارسال‌ها، با انتخاب آگاهانه مسیرها مقدار تداخل ایجاد شده روی هر درخت توسط درخت‌های مسیریابی دیگر نیز کاهش می‌یافت. در الگوریتم DIMTC با ارائه معیار CSM مصالحه بین دو عامل مذکور به نحو مطلوبی مدیریت شد. همچنین، نشان داده شد که با مجهز کردن گره‌ها به آنتن‌های جهت‌دار و فن‌آوری چند کاناله چند رادیویی می‌توان مقدار تداخل در هر درخت را به میزان قابل‌توجهی کاهش داد. در انتها نیز با شبیه‌سازی نتایج به دست آمده مشخص گردید که دو الگوریتم پیشنهادی این مقاله کارایی مطلوب‌تری نسبت به الگوریتم‌های ارائه شده در مرجع [۴] دارند.

پی‌نوشت:

1. Shortest Path Multicast Tree
2. Minimum Cost Multicast Tree
3. Wireless Broadcast Advantage
4. Switched beam pattern
5. Steerable beam pattern
6. Directional Multicast Tree Construction
7. Directional Interference Aware Multicast Tree Construction
8. Wireless Closest Terminal Branching
9. Wireless Closest Terminal Branching with Minimum Interference Multicast Tree
10. Multi-Rate Multi-Radio Multi-channel Wireless Mesh Networks
11. Interference- and Rate-aware Multicast Tree
12. Interference- and Rate-aware Broadcast Tree
13. Flow Load Multicast Metric
14. Reliable Flow Load Multicast Metric
15. Minimum Steiner Tree
16. Efficient Multicast Routing Algorithm for WMN
17. Expected Multicast Transmission Count
18. Virtual Link Reduction
19. Interference and Power Constrained Broadcast/ Multicast
20. Delay-bounded Interference and Power Constrained Broadcast/Multicast
21. Half duplex
22. Interfering Links
23. Node Co-Channel Interference
24. Tree Co-Channel Interference
25. Channel Selection Metric
26. Minimum Interference Multicast Tree

References

[1] I.F. Akyildiz, X. Wang, W. Wang, "Wireless mesh networks: a survey", Computer Networks, Vol. 47, No. 4, pp. 445-487, Mar. 2005.

[2] P.H. Pathak, R. Dutta, "A survey of network design problems and joint design approaches in wireless mesh networks", IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 13, No. 3, pp. 396-428, June 2010.

[3] U.T. Nguyen, "On multicast routing in wireless mesh networks", Computer Communications, Vol. 31, No. 7, pp. 1385-1399, May 2008.

[4] T. Liu, W. Liao, "Multicast routing in multi-radio multi-channel wireless mesh networks", IEEE Trans. on Wireless Communications, Vol. 9, No. 10, pp. 3031-3039, Oct. 2010.

[5] A. Avokh, G. Mirjalily, "Interference-aware multicast and broadcast routing in wireless mesh networks using both rate and channel diversity", Computers and Electrical Engineering, Vol. 40, No. 2, pp. 624-640, Feb. 2014.

[6] F. Li, Y. Fang, F. Hu, X. Liu, "Load-aware multicast routing metrics in multi-radio multi-channel wireless mesh networks", Computer Networks, Vol. 55, No. 9, pp. 2150-2167, June 2011.

[7] R. Matam, S. Tripathy, "Improved heuristics for multicast routing in wireless mesh networks", Wireless Networks, Vol. 19, No. 8, pp. 1829-1837, Nov. 2013.

[8] X. Zhao, J. Guo, C.T. Chou, A. Misra, S.K. Jha, "High-throughput reliable multicast in multi-hop wireless Mesh networks", IEEE Trans. on Mobile Computing, Vol. 14, No. 4, pp. 728-741, Apr. 2015.

[9] Y. Shi, Y.T. Hou, J. Liu, S. Kompella, "How to correctly use the protocol interference model for multi-hop wireless networks", Proceedings of the tenth ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, pp. 239-248, 2009.

[10] P. Yeh, W. E. Stark, S.A. Zummo, "Performance analysis of wireless networks with directional antennas", IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 57, No. 5, pp. 3187-3199, Sep. 2008.

[11] P. Li, C. Zhang, Y. Fang, "The capacity of wireless ad hoc networks using directional antennas ", IEEE Trans. on Mobile Computing, Vol. 10, No. 10, pp. 1374-1387, Oct. 2011.

[12] G. Zhang, Y. Xu, X. Wang, M. Guizani, "Capacity of hybrid wireless networks with directional antenna and delay constraint", IEEE Trans. on Communications, Vol. 58, No. 7, pp. 2097-2106, July 2010.

[13] J. Zhang, X. Jia, "Capacity analysis of wireless mesh networks with omni or directional antennas", Proceeding of the IEEE/INFOCOM, pp. 2881-2885, Rio de Janeiro, Brazil, 2009.

[14] C.T. Chang, C.Y. Chang, T.L. Wang, Y.J. Lu, "Throughput enhancement by exploiting spatial reuse opportunities with smart antenna systems in wireless ad hoc networks", Computer Networks, Vol. 57, No. 13, pp. 2483-2498, Sep. 2013.

[15] Y. Chen, J. Liu, X. Jiang, O. Takahashi, "Throughput analysis in mobile ad hoc networks with directional antennas", Ad Hoc Networks, Vol. 11, No. 3, pp. 1122-1135, May 2013.

[16] Y. Chang, Q. Liu, X. Jia, K. Zhou, "Routing and transmission scheduling for minimizing broadcast delay in multirate wireless mesh networks using directional antennas", Wireless Communications and Mobile Computing, Vol. 15, No. 1, pp. 87-99, Jan. 2015.

[17] M. Li, L. Ding, Y. Shao, Z. Zhang, B. Li, "On reducing broadcast transmission cost and redundancy in ad hoc wireless networks using directional antennas", IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 59, No. 3, pp. 1433-1442, Mar. 2010.

[18] Z. Li, D. Li, M. Liu, "Interference and power constrained broadcast and multicast routing in wireless ad hoc networks using directional antennas", Computer Communications, Vol. 33, No. 12, pp. 1428-1439, July 2010.