Archive of SID

بهبود کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با استفاده از مسیریابی چندگانه

مرجان رادی[۱]، بهنام دزفولی[۲]، محمدعلی نعمت‌بخش[۳]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، radi@iaun.ac.ir
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، dezfouli@iaun.ac.ir
۳- دانشیار، دانشکده کامپیوتر، دانشگاه اصفهان، nematbakhsh@eng.ui.ac.ir

چکیده

از آنجا که در بسیاری از کاربردهای شبکه‌های حسگربی‌سیم نیازمند تضمین پارامترهای کیفی انتها به انتهای معینی می‌باشیم، حمایت از کیفیت خدمات در این شبکه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین دلیل در سال‌های اخیر تکنیک‌های مسیریابی چندگانه به‌عنوان روشی برای حمایت از کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مورد توجه قرار گرفته است. تکنیک‌های مسیریابی چندگانه با ایجاد چندین مسیر بین نودهای منبع و مقصد معیارهایی از قبیل قابلیت اطمینان، میزان توان مصرفی، تأخیر، گذردهی و پهنای باند را بهبود می‌بخشند. در این مقاله ابتدا چالش‌های موجود در حمایت از کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم را بیان کرده و سپس مزایای استفاده از روش‌های مسیریابی چندگانه را شرح می‌دهیم. همچنین عناصر تشکیل‌دهنده‌ی یک پروتکل مسیریابی چندگانه را معرفی خواهیم کرد. در ادامه تعدادی از پروتکل‌های مسیریابی طراحی شده برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم را براساس کاربردشان طبقه‌بندی نموده و طراحی آن‌ها را بررسی می‌کنیم. در پایان نیز برخی از راهبردهای مورد استفاده در شبیه‌سازی شبکه‌های حسگر بی‌سیم را ارائه می‌کنیم.

واژه‌های کلیدی

شبکه‌های حسگربی‌سیم، کیفیت خدمات، مسیریابی چندگانه، قابلیت اطمینان.

۱– مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در ساخت مدارهای مجتمع با اندازه‌های کوچک از یک‌سو و توسعه فناوری ارتباطات بی‌سیم از سوی دیگر زمینه‌ساز طراحی شبکه‌های حسگربی‌سیم[۱] می‌باشد.

با توجه به الگوی جدید جمع‌آوری اطلاعات توسط شبکه‌های حسگربی‌سیم این شبکه‌ها در زمینه‌های مختلف از قبیل مراقبت‌های پزشکی، کنترل محیط، گزارش بلایای طبیعی، سیستم‌های نظامی، سیستم‌های امنیتی، سیستم‌های نظارت و کنترل ترافیک کاربرد دارند [۱، ۲، ۳]. از آنجا که کاربردهای مختلف در شبکه‌های حسگربی‌سیم نیازمند برآورده‌سازی پارامترهای کیفی متفاوتی (مانند میزان تأخیر، میزان قابلیت اطمینان، میزان پهنای باند لازم و غیره) می‌باشند، ضروری است پروتکل‌هایی طراحی شوند که با توجه به مشکلات اشی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد شبکه‌های حسگر بی‌سیم (مانند توان و پهنای باند محدود، ارتباطات غیر قابل اعتماد، آسیب‌پذیری نودهای، و غیره)، نیازمندی‌های مربوط به کیفیت خدمات[۲] (QoS)، را در این شبکه‌ها درنظر بگیرند [۴، ۵، ۶ و ۷].

پروتکل‌های مسیریابی مختلفی تاکنون برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم طراحی شده است [۸، ۹ و ۱۰]. بسیاری از این پروتکل‌ها برای انتقال داده‌ها، تنها از یک مسیر بهینه استفاده می‌کنند. این

www.SID.ir

Archive of SID

مسیر براساس معیارهایی نظیر جهت انتقال داده‌ها، فاصله تا نود مقصد، و سطح انرژی باقی‌مانده در هر نود، تعیین می‌شود. در این دسته از پروتکل‌ها هنگامی که یک مسیر اصلی بین نودهای منبع و مقصد شناسایی شد داده‌ها از طریق مسیر شناسایی شده ارسال می‌شوند. اما استفاده‌ی مداوم از یک مسیر باعث می‌شود انرژی نودهای موجود در آن مسیر سریع‌تر از سایر نودهای شبکه مصرف شود و در مدت کوتاهی دسترسی به نودهایی که در همسایگی نودهای مسیر اصلی قرار گرفته‌اند امکان‌پذیر نباشد. به این ترتیب شبکه به چند بخش مجزا تفکیک شده و از آن پس کارآیی لازم را نخواهد داشت. درضمن با توجه به پایین بودن قابلیت اطمینان کانال‌های بی‌سیم، استفاده از یک مسیر منجر به کاهش قابلیت اطمینان در ارسال داده‌ها خواهد شد. بنابراین با توجه به موارد ذکر شده، پروتکل‌های مسیریابی تک‌مسیری کارایی لازم را در شبکه‌های حسگر بی‌سیم نخواهند داشت.

گروهی از پروتکل‌های مسیریابی به‌نام مسیریابی چندگانه[۳]، کلاسی از الگوریتم‌های مسیریابی را معرفی می‌کنند که به هر نود منبع اجازه می‌دهند برای ارسال داده‌ها چندین مسیر مختلف را به‌سمت نود مقصد شناسایی کند. با استفاده از این تکنیک می‌توان ترافیک شبکه را باتوجه به کیفیت هر مسیر، روی چندین مسیر تقسیم نمود. به‌این‌ترتیب از منابع سیستم به بهترین نحو استفاده شده و کیفیت خدمات لازم برای هر کاربرد نیز فراهم می‌شود. مسیریابی چندگانه برای اهداف متفاوتی (نظیر افزایش پهنای باند، کاهش تأخیر، کاهش ازدحام در شبکه، تحمل‌پذیری درمقابل خرابی‌ها و بهبود قابلیت اطمینان) در شبکه‌های مختلف بکار گرفته شده است [۱۱، ۱۲ و ۱۳]. اما محدودیت‌های موجود در شبکه‌های حسگر بی‌سیم نیازمندی‌های جدیدی را در استفاده از این تکنیک‌ها مطرح می‌کند.

ادامه‌ی این مقاله به‌این‌صورت سازمان‌دهی شده است. در بخش ۲ به بررسی چالش‌هایی می‌پردازیم که در حمایت از کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگربی‌سیم با آن‌ها مواجه هستیم. در بخش ۳ در مورد پروتکل‌های مسیریابی چندگانه صحبت شده و مزایای حاصل از روش‌های مسیریابی چندگانه را تحلیل می‌کنیم. سپس عناصر تشکیل دهنده‌ی یک پروتکل مسیریابی چندگانه را معرفی خواهیم کرد. در بخش ۴ تعدادی از پروتکل‌های مسیریابی چندگانه ارائه شده برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم و بی‌سیم موردی را براساس کاربرد آن‌ها طبقه‌بندی نموده و طراحی آن‌ها را شرح خواهیم داد. در بخش ۵ تعدادی از ابزارهای شبیه‌سازی شبکه‌های حسگر بی‌سیم را معرفی نموده و در ادامه‌ی آن به معرفی معیارهای ارزیابی عملکرد شبکه و پارامترهای شبیه‌سازی می‌پردازیم.

۲– چالش‌های موجود در حمایت از کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگربی‌سیم

روش‌های بسیاری برای حمایت از کیفیت خدمات در شبکه‌های سیمی پیشنهاد شده است، اما هیچ‌کدام از این روش‌ها را نمی‌توان به‌طور مستقیم در شبکه‌های حسگربی‌سیم بکار برد. بنابراین ضمن حمایت از کیفیت خدمات در این شبکه‌ها با چالش‌های فراوانی به شرح زیر روبرو هستیم [۱۴ و ۱۵]:

۱- ترافیک نامتعادل: در بسیاری از کاربردهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم، ترافیک موجود در شبکه از طرف تعداد زیادی نود حسگر به‌سمت تعداد کمی از نودهای مقصد جریان می‌یابد. بنابراین پروتکل‌های طراحی شده باید توزیع نامتعادل ترافیک را درنظر بگیرند.

۲- افزونگی در داده‌های جمع‌آوری شده: داده‌های جمع‌آوری شده توسط نودهای حسگر دارای افزونگی فراوانی هستند. اگرچه افزونگی موجود در داده‌های جمع‌آوری شده قابلیت اطمینان داده‌ها را افزایش می‌دهد اما به همین نسبت میزان توان مصرفی را نیز به‌شدت بالا می‌برد. برای حل این مشکل روش‌های متنوعی در رابطه با جمع‌آوری داده‌ها[۴] پیشنهاد شده است. اما استفاده از این تکنیک‌ها موجب ایجاد تأخیر در ارسال داده‌ها می‌شود.

۳- پویا بودن شبکه: خرابی نودها، خرابی لینک‌های ارتباطی و حرکت نودها، موجب تغییرات مداوم در توپولوژی شبکه می‌شود. همین امر باعث می‌شود حمایت از کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم به راحتی امکان‌پذیر نباشد.

۴- خطاهای مربوط به کانال‌های بی‌سیم: خطاهای مربوط به کانال‌های بی‌سیم در شبکه‌های حسگر بی‌سیم موجب گم‌شدن بسته‌های ارسالی می‌شود. با وجود طرح‌های موجود جهت کدکردن کانال، مکانیزم‌هایی جهت ایجاد قابلیت اطمینان در سطح لایه انتقال لازم است. بنابراین الگوریتم‌های جدیدی جهت تشخیص و کنترل ازدحام[۵] در این شبکه‌ها مورد نیاز می‌باشد.

۵- وجود انواع مختلف ترافیک: وجود نودهای حسگر ناهمگن نیز چالش‌هایی را در حمایت از کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم ایجاد می‌کند. ممکن است در برخی از کاربردها نیازمند انواع مختلفی از نودهای حسگر برای نظارت بر حرارت، فشار و رطوبت محیط باشیم. در این شرایط، نرخ دریافت اطلاعات از محیط متفاوت بوده، حمایت از کیفیت خدمات با مشکل مواجه می‌شود.

۶- توسعه‌پذیری: یک شبکه حسگر بی‌سیم شامل هزاران نود حسگر است. بنابراین نباید هنگام افزایش تعداد نودها کیفیت خدمات کاهش یابد.

www.SID.ir

Archive of SID

۷- محدودیت‌های منبعی: محدودیت‌های منبعی موجود در شبکه‌های حسگر بی‌سیم شامل محدودیت‌های موجود در میزان انرژی، پهنای باند، حافظه، اندازه بافر، توانایی پردازشی و قدرت انتقال می‌باشد. در این میان، توان مصرفی اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. در بسیاری از کاربردها (نظیر کنترل مرزهای یک کشور)، لازم است که شبکه حسگر بی‌سیم ماه‌ها بدون حمایت‌های اضافی از نظر توان مصرفی به فعالیت خود ادامه دهد. بنابراین در شبکه‌های حسگر بی‌سیم باید نیازمندی‌های مربوط به حمایت از کیفیت خدمات با کمترین توان مصرفی برآورده شود. همچنین به‌علت محدودیت‌های موجود در سایر منابع یک نود پروتکل‌های استفاده شده در این شبکه‌ها باید کمترین میزان سربار را در برقراری ارتباطات داشته باشند و تنها بخشی از میزان حافظه فعال موجود را استفاده کنند.

۸- لینک‌های نامطمئن: شبکه‌های حسگر بی‌سیم دارای لینک‌های ضعیفی هستند که به‌طور وسیعی تحت تأثیر عوامل محیطی قرار دارند. بنابراین، تأخیرهای ارتباطی و میزان قابلیت اطمینان، غیرقابل پیش‌بینی می‌باشند.

۳- مسیریابی چندگانه

مسیریابی چندگانه برای اهداف مدیریتی و کنترلی متنوع در شبکه‌های مختلف بکار گرفته شده است. با استفاده از پروتکل‌های مسیریابی چندگانه می‌توان مشکلات ناشی از تغییرات مداوم در توپولوژی و لینک‌های نامطمئن را حل کرد. اما میزان بهبود پارامترهای کیفیت خدمات، وابسته به توانایی پروتکل مسیریابی چندگانه در شناسایی مسیرهای مجزا می‌باشد. در این بخش به بیان مزایای حاصل از روش‌های مسیریابی چندگانه می‌پردازیم و در ادامه‌ی آن مروری بر عناصر اصلی این پروتکل‌ها خواهیم داشت.

۳-۱- مزایای روش‌های مسیریابی چندگانه

۳-۱-۱- بهبود قابلیت اطمینان و تحمل‌پذیری در مقابل خرابی

ازآنجاکه توپولوژی شبکه‌های حسگر بی‌سیم مدام در حال تغییر است و تداخل امواج رادیویی نیز باعث گم‌شدن تعداد زیادی از بسته‌ها می‌شود، تضمین قابلیت اطمینان در این شبکه‌ها بسیار مشکل است. گروهی از پروتکل‌های مسیریابی‌چندگانه، قابلیت اطمینان و تحمل‌پذیری در مقابل خرابی‌ها را با ارسال چندین کپی از داده‌ها برروی چندین مسیر مجزا بهبود می‌بخشند. اگرچه این روش توان مصرفی را افزایش می‌دهد، اما در هنگام خرابی لینک‌ها احتمال گم‌شدن داده‌ها کاهش می‌یابد. برای حل این مشکل روش‌های مختلفی درجهت کاهش سربار حاصل از ارسال داده‌ها ارائه شده است [۱۶ و ۱۷]. دسته‌ی دیگری از پروتکل‌ها در هرلحظه تنها از یک مسیر برای انتقال داده‌ها استفاده می‌کنند و درصورت خرابی مسیر اصلی، داده‌ها از طریق مسیر پشتیبان ارسال می‌شوند. احتمال گم شدن داده‌ها در اثر خرابی مسیر کاهش می‌یابد.

۳-۱-۲- توزیع متعادل بار

باتوجه به کاربردهای شبکه‌های حسگربی‌سیم، انتظار می‌رود یک شبکه در درازمدت به عملیات خود ادامه دهد. بنابراین با توجه به منابع انرژی محدود در هر نود، تمرکز اصلی پروتکل‌های مسیریابی چندگانه برروی جنبه‌های توزیع متعادل بار می‌باشد.

طرح‌های مسیریابی متعارف، همواره از مجموعه نودهای خاصی برای ارسال بسته‌ها به سمت نود مقصد استفاده می‌کنند. در این‌گونه موارد، انرژی نودهایی که پیوسته درحال ارسال داده‌ها به نود مقصد هستند سریع‌تر از انرژی سایر نودها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین نودهای موجود در همسایگی نودهای مسیر بهینه، پس از گذشت مدت کوتاهی قابل دسترسی نیستند. اگر انرژی مصرفی در تمامی نودهای موجود در شبکه یکسان باشد میانگین زمان خرابی هر نود افزایش یافته،بنابراین طول عمر شبکه افزایش می‌یابد. درنتیجه با توجه به‌این‌که پروتکل‌های مسیریابی چندگانه ترافیک شبکه را براساس انرژی باقی‌مانده در هر نود بین نودهای موجود در شبکه تقسیم می‌کنند، می‌توان از این تکنیک برای استفاده یکسان از انرژی موجود در تمامی نودهای شبکه استفاده کرد.

۳-۱-۳- افزایش پهنای باند

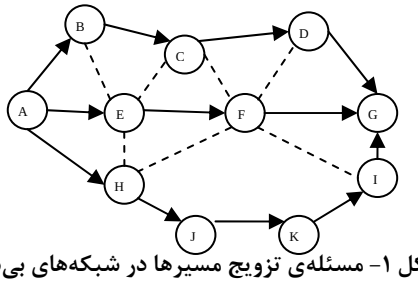
با تقسیم داده‌های ارسالی مربوط به یک مقصد به چندین جریان داده‌ای با مسیرهای متفاوت، پهنای باند لازم فراهم می‌شود. این روش زمانی سودمند است که یک نود دارای چندین لینک با پهنای باند پایین بوده اما نیازمند پهنای باندی فراتر از پهنای باند هرکدام از لینک‌هایش باشد. ضمن اینکه با ایجاد پهنای باند بیشتر، تأخیر انتها به انتها نیز به‌طور قابل توجهی کاهش خواهد یافت.

این امر در شبکه‌های سیمی که در آن‌ها مسیرهای مختلف کاملاً مجزا هستند به‌وضوح قابل مشاهده است. اما در شبکه‌های حسگر بی‌سیم وجود کانال‌های بی‌سیم اشتراکی دستیابی به این هدف را مشکل می‌سازد. هنگامی که نودهای موجود در شبکه، یک کانال بی‌سیم را به اشتراک می‌گذارند و از پروتکل‌های دسترسی به رسانه برای هماهنگی دسترسی به کانال اشتراکی استفاده می‌کنند، فعالیت‌های ارتباطی بین لینک‌های مختلف، مستقل از هم نیستند. مثلاً در شکل (۱) هنگامی که نود E بسته‌ای را برای نود F ارسال می‌کند تمامی نودهای موجود در همسایگی این دو نود باید ارسال و دریافت خود را قطع کنند تا نود F بسته ارسالی نود E را به‌درستی دریافت کند. بنابراین در شبکه‌هایی که از یک کانال اشتراکی

www.SID.ir

Archive of SID

استفاده می‌شود، مسیرهای نود مجزا عدم وابستگی مسیرها به یکدیگر را تضمین نمی‌کنند. این مشکل در شبکه‌های بی‌سیم تزویج مسیرها[۶] نامیده می‌شود [۱۸ و ۱۹].



شکل ۱- مسئله‌ی تزویج مسیرها در شبکه‌های بی‌سیم تک‌کانالی

تزویج مسیرها زمانی به‌وجود می‌آید که مسیرها نزدیک یکدیگر قرار گرفته باشند. الگوریتم‌های مسیریابی چندگانه‌ای که هنگام انتخاب مسیرها میزان تداخلات[۷] رادیویی بین آن‌ها را درنظر نمی‌گیرند بهینه‌سازی ناچیزی را نسبت به الگوریتم‌های تک‌مسیری ارائه می‌دهند [۲۰].

نویسندگان در [۲۱] این مشکل را با تعریف فاکتور وابستگی[۸] تا حدودی حل نموده‌اند. در این روش، فاکتور وابستگی دو مسیر نود مجزا براساس تعداد لینک‌های متصل‌کننده دو مسیر تعریف می‌شود. به‌این‌ترتیب، پروتکل مسیریابی چندگانه مسیرهایی را انتخاب می‌کند که فاکتور وابستگی کمتری داشته باشند. همین امر احتمال تداخل داده‌های در حال انتقال روی مسیرهای مختلف را کاهش می‌دهد. نویسندگان در [۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵] تزویج مسیرها را به‌وسیله ایجاد تغییراتی در لایه اتصال داده و یا لایه فیزیکی (مانند استفاده از چندین کانال مختلف برای انتقال داده‌ها و یا آنتن‌های جهت‌دار) کاهش داده‌اند.

۳-۱-۴- کاهش تأخیر

نتایج شبیه‌سازی بسیاری از پروتکل‌های مسیریابی چندگانه، کاهش تأخیر و افزایش گذردهی[۹] قابل توجه‌ی را نشان داده‌اند. اگر شبکه‌های حسگربی‌سیم از الگوریتم‌های مسیریابی تک‌مسیری برای انتقال داده‌ها استفاده کنند، درصورت خرابی مسیر اصلی، فرآیند شناسایی مسیر، مجدداً راه اندازی خواهد شد. همین امر باعث ایجاد تأخیر در انتقال داده‌ها می‌شود، زیرا پروتکل‌های مسیریابی عندالمطالبه[۱۰] در شبکه‌های حسگر بی‌سیم علاوه بر تأخیرهای انتقال، انتشار و صف شامل دو نوع تأخیر دیگر نیز می‌باشند: ۱) تأخیر مربوط به شناسایی مسیر بین نود منبع و مقصد، ۲) تأخیر مربوط به شناسایی مسیر جدید هنگام خرابی مسیر فعال، که تأخیر نوع دوم به مراتب طولانی‌تر از تأخیر نوع اول می‌باشد زیرا خود شامل سه نوع تأخیر است: ۱) زمان طی شده از حرکت بسته از نود منبع تا زمانی که بسته به لینک خراب در مسیر می‌رسد، ۲) مدت زمان لازم برای تشخیص خرابی لینک توسط یکی از نودهای موجود در مسیر، ۳) مدت زمان لازم برای ارسال پیام خطا به نود منبع توسط نودی که خرابی لینک را تشخیص داده است.

تأخیرهای بیان شده را می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های مسیریابی چندگانه کاهش داد. به‌این‌صورت که اگر هر نود چندین مسیر به سمت مقصد داشته باشد هنگام خراب شدن مسیر فعال، می‌تواند سریعاً داده‌ها را به‌وسیله‌ی مسیر دیگری ارسال کند. بنابراین علاوه‌بر این‌که تأخیرها را کاهش می‌دهد از گم شدن بسته‌ها نیز تا حد امکان جلوگیری خواهد شد.

۳-۲- عناصر تشکیل‌دهنده یک پروتکل مسیریابی چندگانه

سه عنصر تشکیل‌دهنده یک پروتکل مسیریابی چندگانه عبارتند از: شناسایی مسیرها، توزیع ترافیک و نگهداری مسیرها.

۳-۲-۱- شناسایی مسیرها

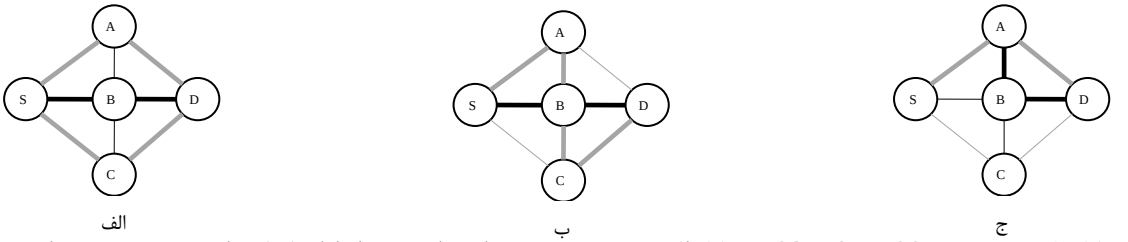
در مرحله شناسایی مسیرها، مسیرهای فعال بین هر جفت نود منبع و مقصد شناسایی می‌شوند. هر پروتکل معیارهای متفاوتی را برای تعیین مجموعه‌ای از مسیرهای فعال، استفاده می‌کند.

یکی از معیارهای عمومی موجود جهت انتخاب مسیرها، میزان مجزا بودن مسیرها از یکدیگر است. انواع مسیرهای مجزا عبارتند از: لینک مجزا، نود مجزا، و مجزای جزئی. در شکل (۲) انواع مختلف مسیرهای مجزا نشان داده شده است. مجموعه‌ای از مسیرهای نود مجزا دارای هیچ‌گونه نود مشترکی به‌جز نود منبع و مقصد نمی‌باشند. همچنین مسیرهای لینک مجزا، دارای هیچ‌گونه لینک مشترکی نیستند، اما ممکن است تعدادی نود مشترک را شامل شوند. درحالی که مسیرهای مجزای جزئی می‌توانند دارای تعدادی لینک یا نود مشترک باشند. مسیرهای نود مجزا، مجزا بودن تمامی لینک‌های موجود در مسیرها را تضمین می‌کنند.

بنابراین هنگامی که یک نود میانی در مسیرهای نود مجزا خراب شود، تنها مسیری که شامل آن نود می‌باشد از کار می‌افتد در حالی که اگر یک نود میانی در مسیرهای لینک مجزا خراب شود ممکن است مجموعه‌ای از مسیرهای موجود را غیرفعال نماید. خرابی هر لینک در مسیرهای نود مجزا و یا لینک مجزا تنها فعالیت یک مسیر از چندین مسیر فعال را با مشکل مواجه می‌کند.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲- مسیرهای SAD, SBD, SCD در شکل الف مسیرهای دو مجزا می‌باشند زیرا دارای لینک یا نود مسیر نمی‌باشند. مسیرهای SABCD, SBD در شکل ب مسیرهای لینک مجزا می‌باشند زیرا شامل نود مشترک B می‌باشند. و مسیرهای SAD,SABD در شکل ج مسیرهای مجزای جزئی می‌باشند زیرا شامل نود مشترک B و لینک مشترک SA می‌باشند.

۳-۲-۲- توزیع ترافیک

تکنیک‌های مختلفی جهت تخصیص ترافیک به مسیرهای فعال در پروتکل‌های مسیریابی چندگانه وجود دارد. یک پروتکل مسیریابی چندگانه ممکن است ترافیک موجود در شبکه را تنها از طریق یک مسیر با بهترین معیارها ارسال نماید و سایر مسیرهای شناسایی شده را به‌عنوان مسیرهای پشتیبان استفاده کند، یا از آن‌ها هم‌زمان برای ارسال داده‌ها استفاده نماید. معیارهای عمومی انتخاب مسیر عبارتند از: تعداد پرش‌ها[11] تا مقصد، قابلیت اطمینان مسیر، انرژی موجود در مسیر، میزان مجزا بودن مسیرها، پهنای باند موجود، میزان تزویج مسیرها، یا ترکیبی از چندین معیار فوق. وقتی هدف اصلی طراحی پروتکل مسیریابی چندگانه، بهبود کیفیت خدمات باشد، مسیرهایی انتخاب می‌شوند که در آن‌ها، ترکیب معیارهای موجود، نیازمندی‌های کیفی موردنظر را برآورده می‌سازد.

۳-۲-۳- نگهداری مسیرها

ممکن است مسیرهای شناسایی شده، به مرور به‌علت خرابی نودها، خرابی لینک‌ها یا حرکت نودها، خراب شوند. فرآیند نگهداری مسیرها عبارت است از شناسایی مجدد چندین مسیر پس از خرابی مسیرهای اولیه. این عملیات بعد از خرابی هر مسیر و یا پس از خرابی تمام مسیرهای فعال شروع می‌شود. بسیاری از پروتکل‌های مسیریابی چندگانه از الگوریتم‌های مسیریابی پویا جهت کنترل و ثبوت معیارهای کیفیت خدمات در مسیرهای فعال استفاده می‌کنند.

۴- مسیریابی چندگانه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم و بی‌سیم موردی

تاکنون، پروتکل‌های مسیریابی چندگانه زیادی با اهداف مختلف برای شبکه‌های حسگربی‌سیم و بی‌سیم موردی ارائه شده است. در این بخش تعدادی از آن‌ها را بر اساس کاربردشان مرور خواهیم کرد.

۴-۱- قابلیت اطمینان و تحمل‌پذیری در مقابل خرابی

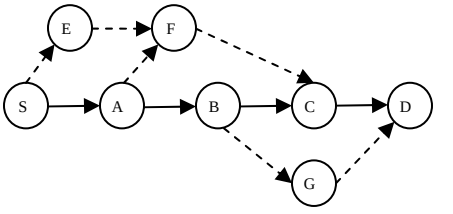
نویسندگان در [۲۶] پروتکل مسیریابی چندگانه‌ای را با هدف افزایش تحمل‌پذیری شبکه‌های حسگر بی‌سیم درمقابل خرابی‌ها، ارائه داده‌اند. در این پروتکل تلاش می‌شود مسیرهای مجزای جزئی شناسایی شوند. به‌عنوان مثال، مسیری که تفاوت آن با مسیر اصلی تنها در یک نود باشد نیز یک مسیر پشتیبان است. این الگوریتم براساس الگوریتم Directed Diffusion [۲۷] طراحی شده است و از دو نوع پیام تأکیدی[12] و تکنیک‌های محلی برای ساخت مسیرهای مجزای جزئی استفاده می‌کند.

طرز کار این الگوریتم به‌این‌صورت است که نود منبع ابتدا پیام تأکیدی مربوط به مسیر اصلی را برای یکی از بهترین همسایگان خود ارسال می‌کند. مثلاً در شکل (۳)، نود منبع (S)، این پیام را به نود A می‌فرستد. ضمناً پیام تأکیدی مربوط به مسیر پشتیبان ثانویه را نیز به همسایه بعدی خود که نسبت به همسایه قرار گرفته برروی مسیر اصلی، اولویت پایین‌تری دارد ارسال می‌کند. مثلاً در شکل (۳)، نود منبع (S) این پیام را به نود E می‌فرستد. نودهای میانی هنگام دریافت پیام تأکیدی مربوط به مسیر اصلی، آن را به بهترین همسایه بعدی خود به سمت مقصد مورد نظر ارسال می‌کنند. بنا بر این مسیر پیموده شده توسط پیام تأکیدی مربوط به مسیر اصلی، مسیر اصلی بین نود منبع و نود مقصد را تشکیل می‌دهد. در کنار ارسال پیام تأکیدی مربوط به مسیر اصلی، هر نود برروی مسیر اصلی، مانند نود B نیز پیام تأکیدی مربوط یک مسیر پشتیبان را به همسایه بعدی خود که نسبت به همسایه قرارگرفته برروی مسیر اصلی اولویت پایین‌تری دارد ارسال می‌کند. به‌عنوان مثال، در شکل (۳) نود B پیام تأکیدی مربوط یک مسیر پشتیبان را به نود G می‌فرستد. هنگامی‌که پیام تأکیدی مربوط یک مسیر پشتیبان توسط نودی که بر روی مسیر اصلی قرار نگرفته است دریافت شود، آن را به بهترین همسایه بعدی خود به‌سمت مقصد ارسال می‌کند؛

www.SID.ir

Archive of SID

درحالی‌که اگر این پیام توسط نودی که بر روی مسیر اصلی قرار گرفته است دریافت شود، نود دریافت کننده‌ی پیام، انتشار پیام دریافتی را متوقف خواهد کرد. بنابراین پیام تأکیدی مربوط به یک مسیر پشتیبان که توسط یکی از نودهای مسیر اصلی ارسال شده است، مسیر پشتیبانی در اطراف نود بعدی که برروی مسیر اصلی قرار گرفته ایجاد می‌کند. این مسیر پشتیبان در نهایت بعد از چند مرحله، به مسیر اصلی پیوند می‌خورد. ساختار مسیرهای شناسایی شده با استفاده از تکنیک بیان شده شبیه شکل (۳) می‌باشد.



شکل ۳- مسیرهای مجزای جزئی

هدف اصلی پروتکل طراحی‌شده در [۲۸] افزایش قابلیت اطمینان و تحمل‌پذیری در مقابل خرابی‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. این پروتکل مسیرهای نود مجزایی را بین جفت نودهای منبع و مقصد شناسایی می‌کند. فرآیند مسیریابی با ایجاد درختی توسط نود منبع در دو فاز مجزا انجام می‌شود. به‌این‌صورت که در فاز اول، درختی که ریشه آن نود منبع می‌باشد ایجاد شده و هر نود در شبکه با پیمایش این درخت مسیری را به سمت نود مقصد شناسایی می‌کند. تعداد مسیرهای مجزایی که در این فاز شناسایی می‌شوند برابر با تعداد شاخه‌های اصلی درخت می‌باشد. در فاز دوم، هر نود از طریق همسایگان خود که متعلق به شاخه‌های دیگری از درخت می‌باشند مسیرهای مجزای بیشتری را به سمت نود مقصد شناسایی می‌کند. این مسیرهای اضافه برای افزایش قابلیت اطمینان و تحمل‌پذیری در مقابل خرابی‌ها هنگام ارسال داده‌ها استفاده می‌شوند.

هدف از طراحی پروتکل H-SPREAD [۲۹] افزایش امنیت و قابلیت اطمینان هنگام ارسال داده‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌باشد. این پروتکل نسخه‌ی توسعه یافته‌ای از پروتکل ارائه شده در [۲۹] است. در این پروتکل، پیام m به‌وسیله طرح تسهیم راز آستانه‌ای به چندین بخش S1,S2,... تقسیم شده و سپس از طریق چندین مسیر مجزا به‌سمت نود مقصد ارسال می‌شود. به‌دلیل ویژگی خاص طرح تسهیم راز آستانه‌ای[۱۳]، حتی اگر تعدادی از مسیرها، نودها و یا بخش‌های کوچکتر پیام خراب شوند پیام اصلی باز هم با استفاده از بخش‌های سالم باقی مانده قابل بازیابی می‌باشد.

AOMDV [۳۰] نسخه‌ی چندمسیری از الگوریتم مسیریابی AODV [۳۱] می‌باشد. این پروتکل سعی می‌کند مسیرهای لینک مجزا و نود مجزایی را شناسایی کند. تمامی جدول‌های مسیریابی در AOMDV برای حمایت از مسیریابی چندگانه شامل لیستی از چندین مسیر برای هر مقصد می‌باشند. تمام مسیرهای مربوط به یک مقصد دارای شماره توالی یکسانی هستند. این پروتکل برای جلوگیری از ایجاد چرخه در شبکه و نیز اطمینان از مجزا بودن مسیرها، دو مقدار فاصله تا نود منبع و آخرین پرش را برای هر مسیر ذخیره می‌کند. مقدار فیلد داده‌ای مربوط به فاصله تا نود منبع تا زمانی که یک مسیر برای شماره توالی بالاتری دریافت نشده باشد بدون تغییر باقی خواهد ماند. هر نود برای اطمینان از لینک مجزا بودن مسیرهای موجود در جدول مسیریابی، پیام درخواست مسیری را که دارای پرش بعدی مشابه و یا آخرین پرش مشابه با یکی از مسیرهای موجود در جدول مسیریابی باشد را حذف می‌کند. مشاهده می‌شود تا زمانی‌که تمامی نودها به این قانون پایبند باشند تمامی مسیرها با شماره توالی یکسان لینک مجزا خواهند بود.

MP-DSR [۳۲] پروتکل مسیریابی چندگانه با هدف افزایش قابلیت اطمینان است. این پروتکل قابلیت اطمینان را به‌صورت احتمال انتقال موفقیت‌آمیز بین دو نود در دوره زمانی t_0 تا t_1 بیان می‌کند:

$$P(t) = 1 - \prod_{k \in K} (1 - p(k,t))$$

K مجموعه‌ای از مسیرهای نود مجزا بین منبع و مقصد می‌باشد. P(k, t) قابلیت اطمینان مسیر kام را مشخص می‌کند. میزان قابلیت اطمینان هر مسیر با ضرب میزان فعال‌بودن لینک‌های موجود در مسیر kام محاسبه می‌شود. به‌عبارت دیگر P(t) احتمال سالم‌بودن حداقل یک مسیر بین نود منبع و مقصد در دوره زمانی t را بیان می‌کند. این پروتکل ابتدا تعداد مسیرهای لازم (m_0) جهت برآورده‌سازی میزان قابلیت اطمینان مورد نیاز هر کاربرد را محاسبه می‌کند. فرآیند مسیریابی توسط نود منبع، با ارسال m_0 کپی از پیام درخواست مسیر به m_0 همسایه از نود منبع شروع می‌شود. هنگامی که یک نود میانی پیام درخواست مسیری را دریافت کرد بررسی می‌کند که آیا میزان قابلیت اطمینان محاسبه شده تا این لحظه، میزان قابلیت اطمینان مورد نظر را برآورده می‌سازد؟ در این شرایط، m_0 کپی آن را به همسایگان خود ارسال می‌کند و درغیراین‌صورت پیام دریافتی را ازبین‌می‌برد. هنگامی که نود مقصد تمامی پیام‌های درخواست مسیر را دریافت نمود، تعدادی از مسیرهای نود مجزا، که میزان قابلیت اطمینان لازم را برآورده می‌سازند، انتخاب می‌کند. این پروتکل به‌طور دوره‌ای قابلیت اطمینان انتها به انتها را کنترل می‌کند تا از کیفیت مسیرهای فعال مطمئن شود. هنگامی که قابلیت اطمینان موجود قابل قبول نباشد و یا تمامی مسیرها تا مقصد خراب شده باشند فرآیند شناسایی مسیرهای جدید مجدداً آغاز می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

۴-۲- کاهش تأخیر

پروتکل مسیریابی چندگانه ارائه شده در [۳۳] براساس پروتکل AOMDV می‌باشد. این الگوریتم از مکانیزم‌های پروتکل AOMDV برای یافتن مسیرهای نود مجزا استفاده می‌کند. با این تفاوت که اگر برای یک مقصد معین مسیری در جدول مسیریابی باشد، مسیر بعدی برای آن مقصد را درصورتی به جدول مسیریابی اضافه می‌کند که: ۱) شماره توالی مربوط به آن پیام بزرگ‌تر یا مساوی با شماره توالی مسیر موجود در جدول مسیریابی باشد، ۲) اولین پرش در آن با تمامی مسیرهای موجود در جدول مسیریابی برای مقصد مورد نظر متفاوت باشد، ۳) تعداد پرش یکسانی با مسیر موجود در جدول مسیریابی داشته باشد.

هنگامی‌که پیام درخواست مسیری با تعداد پرش کمتری توسط یکی از نودهای میانی دریافت شد تمام مسیرهای موجود در جدول مسیریابی پاک شده و مسیر جدید به جدول اضافه می‌شود. اگر پیام درخواست مسیر تکراری که تمام شرایط مربوط به نود مجزا بودن مسیرها را دارد توسط یکی از نودهای میانی دریافت شود، درصورتی‌که از نظر تعداد پرش‌ها نیز بهینه باشد آنگاه به جدول مسیریابی اضافه می‌شود. این پروتکل جهت توزیع ترافیک، از اطلاعات لایه دسترسی به رسانه برای کاهش تأخیر در ارسال داده‌ها استفاده می‌کند. در این الگوریتم، هنگام ارسال داده‌ها، هر نود بسته دریافتی را به نودی از جدول مسیریابی می‌دهد که زمان کمتری تا بیدار شدنش باقی مانده باشد و به‌این‌ترتیب تأخیر موجود در انتقال داده‌ها را کاهش می‌دهد.

نویسندگان در [۳۴] نسخه‌ی بهبود یافته‌ای از الگوریتم مسیریابی چندگانه SMR [۳۵] را با نام Split Equal-cast Multipath Routing (SEMR) ارائه داده‌اند. در این مقاله معیار مسیریابی جدیدی تحت عنوان میزان ازدحام موجود در هر مسیر ارائه شده است. درابتدا نود منبع مسیری را انتخاب می‌کند که حجم داده‌ی کمتری از طریق آن انتقال یابد. سپس مسیر دوم را طوری انتخاب می‌کند که تعداد نود مشترک کمتری با مسیر اول داشته باشد. با استفاده از این معیار، مسیرهایی انتخاب می‌شوند که حجم داده‌ی کمتری از طریق آن‌ها انتقال می‌یابد. بنابراین از وقوع ازدحام در شبکه جلوگیری شده، تأخیر ارسال داده‌ها نیز کاهش می‌یابد.

۴-۳- کاهش میزان انرژی مصرفی در شبکه

نویسندگان در [۳۶]، پروتکل مسیریابی چندگانه توزیع‌شده‌ای، را برای انتخاب چندین مسیر نود مجزا بین هر جفت نود منبع و مقصد ارائه داده‌اند. به‌علاوه، الگوریتم توزیع باری نیز برای توزیع ترافیک روی مسیرهای شناسایی شده در فاز شناسایی مسیرها ارائه کرده‌اند. الگوریتم توزیع بار ارائه شده، به نود منبع امکان می‌دهد که ترافیک موجود را براساس میزان انرژی و طول هر مسیر توزیع نماید.

این پروتکل جهت شناسایی مسیرهای نود مجزای موجود از سه فاز مجزا تشکیل شده است. در فاز اول نوعی پیام کنترلی در شبکه منتشر می‌شود. با انتشار این پیام در شبکه، هر نود از وضعیت نودهای موجود در همسایگی خود مطلع شده، نودهای مقصد و کمترین فاصله ممکن تا هرکدام از آن‌ها را نیز شناسایی خواهد کرد. فاز دوم زمانی شروع می‌شود که تعدادی از نودهای حسگر رخدادی را شناسایی نموده و قصد ارسال داده‌های جمع آوری شده به نود مقصد را دارند. در این فاز مسیرهای نود مجزایی بین هر جفت نود منبع و مقصد شناسایی شده، پس از شناسایی مسیرهای موجود، نود منبع نرخ داده‌ای مناسبی را به هر مسیر، براساس هزینه‌ی آن مسیر، انتساب می‌کند. فاز سوم بعد از فاز شناسایی مسیرها، برای انتقال داده‌ها به نود مقصد و نگهداری از مسیرهای شناسایی شده، شروع می‌شود. چون ممکن است نرخ داده‌ی اولیه که به هر مسیر نسبت داده شده مناسب نباشد یا به‌مرور زمان میزان انرژی موجود در هر مسیر به‌طور قابل توجهی کاهش یابد، هنگام ارسال داده‌ها در هر مسیر، مقادیر کنترلی دیگری برای کنترل میزان انرژی موجود در مسیرهای فعال نیز انتقال می‌یابد. هنگامی که نود مقصد با توجه به این اطلاعات مطلع شد که هزینه مسیر اصلی از میزان معینی بیشتر شده نرخ داده نسبت داده شده به هر مسیر را براساس شرایط جاری مسیرها مجدداً تغییر می‌دهد. نود منبع میزان تأخیر بین بسته‌های دریافتی خود را برای اطلاع از خرابی مسیرها، کنترل می‌کند. هنگامی که تأخیر یک مسیر بیش از حد معینی شد نود منبع احتمال می‌دهد که مسیر خراب شده باشد. بنابراین نرخ داده‌ای نسبت داده شده به هر مسیر را براساس شرایط جاری مسیرهای فعال موجود مجدداً تنظیم می‌کند. همچنین هنگامی که تنها دو مسیر فعال یا کمتر باقی مانده باشد نود مقصد پیامی را جهت شروع مجدد فاز شناسایی مسیرهای جدید به نود منبع ارسال می‌کند.

نویسندگان در [۳۷] پروتکل ارائه شده در [۲۸] را جهت توزیع متعادل ترافیک شبکه روی مسیرهای شناسایی شده توسعه داده‌اند. این پروتکل با تولید اطلاعات بیشتری به هر مسیر وزن خاصی اختصاص داده و براساس آن قابلیت انتقال میزان داده هر مسیر را مشخص می‌کند. در این روش جهت انتساب وزن‌ها به هر مسیر و توزیع ترافیک از روش توزیع بار عمومی ارائه شده در [۳۸] با کمی تغییرات جزئی استفاده شده است.

پروتکل Interference Minimized Multipath Routing (I2MR) [۳۹]، با هدف افزایش گذردهی شبکه توسط توزیع بار بین چند مسیر مجزا که میزان تزویج کمتری دارند طراحی شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

همچنین هنگام انتقال هم‌زمان داده‌ها روی مسیرهای مختلف، از یک روش کنترل ازدحام جهت افزایش گذردهی شبکه استفاده می‌شود. همان‌طور که قبلاً ذکر شد ویژگی‌های خاص کانال‌های بی‌سیم باعث می‌شوند مزایای حاصل از توزیع متعادل بار در شبکه‌های بی‌سیم قابل توجه نباشند. بنابراین برای داشتن توزیع بار مؤثر در شبکه‌های بی‌سیم، به‌دلیل تداخلات رادیویی موجود هنگام ارسال هم‌زمان داده‌ها روی مسیرهایی که از نظر فیزیکی به هم نزدیک هستند، داشتن مسیرهای نود مجزا به‌تنهایی کافی نمی‌باشد.

در این پروتکل جهت مدل‌سازی تداخلات رادیویی در شبکه‌های بی‌سیم تک‌کانالی از گراف تداخل[۱۴] استفاده شده است. این گراف مشخص می‌کند کدام گروه از لینک‌های شبکه با یکدیگر در تداخل بوده و نمی‌توانند همزمان برای انتقال داده‌ها استفاده شوند. بدین وسیله معیار جدیدی به‌نام میزان تداخل کلی[۱۵](TICF) برای مجموعه‌ای از مسیرهای نود مجزا بدست می‌آید. ایده اصلی این پروتکل این است که بعد از شناسایی اولین مسیر، ناحیه تداخلی آن و مسیرهای بعدی به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که در این ناحیه قرار نگیرند. هنگام انتقال همزمان داده‌ها برروی مسیرهای شناسایی شده الگوریتم کنترل ازدحام استفاده شده در این پروتکل میزان داده قابل انتقال از طریق هر مسیر را به‌طور پویا به‌گونه‌ای تنظیم می‌کند که هر مسیر بیشترین مقدار داده ممکن را انتقال دهد.

در [۴۰] تکنیک مسیریابی چندگانه‌ای جهت مصرف بهینه انرژی در شبکه‌های حسگربی‌سیم ارائه شده است. هدف اصلی طراحی این پروتکل افزایش طول عمر شبکه با توزیع ترافیک برروی تعداد زیادی از نودهای شبکه می‌باشد. در این پروتکل ترافیک شبکه برروی نودهای موجود در مسیرهای مختلف بین هر جفت نود منبع و مقصد با توجه به میزان انرژی باقی‌مانده در آن‌ها و قدرت سیگنال دریافتی توسط آن‌ها تقسیم می‌شود. درنتیجه ترافیک بیشتری به مسیرهای کمتر استفاده شده اختصاص می‌یابد و به مسیرهایی که بیشتر اند میزان ترافیک کمتری اختصاص خواهد یافت. در این پروتکل، فاز شناسایی مجدد مسیرهای جدید زمانی شروع می‌شود که تعداد مسیرهای فعال بین هر جفت نود منبع و مقصد کمتر یا مساوی دو مسیر باشد. درغیراین‌صورت با خرابی یک مسیر، ترافیک شبکه بین مسیرهای فعال موجود مجدداً توزیع می‌شود.

Split Multipath Routing [۳۵]، نسخه‌ی چندمسیری از پروتکل مسیریابی DSR [۴۱]است. در این پروتکل هر نود منبع، هم‌زمان از دو مسیر مجزا برای ارسال بسته‌ها در شبکه استفاده می‌کند. در پروتکل SMR پیام‌هایی که توسط نودهای منبع برای درخواست مسیر ارسال شده‌اند تنها توسط نود مقصد پاسخ داده می‌شوند. درحالی‌که نودهای میانی اجازه‌ی چنین کاری را با استفاده از اطلاعات محلی ندارند. این امر به نود مقصد اجازه می‌دهد که پیام‌های درخواست مسیر بیشتری را دریافت کند، که می‌تواند از بین آن‌ها دو مسیر مجزا را که دارای نودها یا لینک‌های مشترک کمتری باشند، انتخاب نماید. اما این روش سربار فرآیند شناسایی مسیر را افزایش می‌دهد. در این پروتکل، نود مقصد، مسیری را که از طریق آن اولین پیام درخواست مسیر را دریافت نموده به‌عنوان مسیری با کمترین میزان تأخیر انتخاب می‌کند و مسیر دیگری که تعداد نود یا لینک مشترک کمتری با مسیر اول دارد را به‌عنوان دومین مسیر انتخاب می‌کند. هنگامی که یک مسیر در حال استفاده خراب شود، تمامی مسیرهای موجود در جدول مسیریابی که دارای نود مشترکی با مسیر خراب شده می‌باشند بدون توجه به نود مقصدشان حذف می‌شوند. اگر سایر مسیرها قابل استفاده باشند، فرایند مسیریابی جدیدی می‌تواند برای یافتن مسیرهای جایگزین همان لحظه شروع شود یا تا زمان خراب شدن مسیر دوم به تأخیر افتد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که پروتکل SMR از لحاظ میزان تأخیر و بسته‌های گم‌شده کارآمدتر از پروتکل DSR می‌باشد، ضمن این‌که اگر فرآیند جستجوی مسیر جدید بعد از خرابی هر دو مسیر شروع شود، سربار کنترلی کمتری تحمیل خواهد شد.

در جدول (۱) پروتکل‌های مسیریابی چندگانه بیان شده با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۵– شبیه‌سازی و ارزیابی شبکه

۵–۱– ابزارهای شبیه‌سازی

ابزارهایی که در مدل‌سازی و شبیه‌سازی شبکه‌های حسگربی‌سیم به‌کار می‌روند دارای محدوده وسیعی می‌باشند. این ابزارها می‌توانند نرم‌افزارهای تحلیلی مثل Mathematica و Matlab باشند و یا نرم‌افزارهای شبیه‌سازی خاصی باشند که بر جنبه‌های خاصی از شبکه تأکید دارند. در میان ابزارهایی که استفاده متداول‌تری دارند، سه دسته اصلی را می‌توان برشمرد. این تقسیم‌بندی در جدول (۲) نشان داده شده است.

اکثر شبیه‌سازهایی که به شبیه‌سازی سیستم‌عامل می‌پردازند (مانند TOSSIM و PTOSSIM) تنها مخصوص شبیه‌سازی عملیات سیستم‌عامل خاصی (TinyOS) هستند و نمی‌توان آن‌ها را برای شبیه‌سازی سایر سیستم‌عامل‌ها به‌کار گرفت. همچنین شبیه‌سازهای دستورالعمل بخاطر فراهم کردن جزئیات سطح پایین زمان‌بندی و توان مصرفی، دارای سرعت پایینی هستند. اما در مقایسه با شبیه‌سازهای سطح سیستم‌عامل و شبیه‌سازهای سطح دستورالعمل، شبیه‌سازهای شبکه و شبیه‌سازهای سیستم‌های

www.SID.ir

Archive of SID

گسسته-پیشامد دارای کاربرد وسیع‌تری می‌باشند. این ابزارها به‌ویژه برای شبیه‌سازی و ارزیابی پروتکل‌های مسیریابی کاربرد دارند. اما این ابزارها برخلاف ابزارهای شبیه‌سازی سیستم‌عاملی هیچ‌گونه مدل‌سازی در مورد محیط اطراف نودها، محاسبات درونی نودها، کانال ارتباطات بی‌سیم و توان مصرفی نودها درنظر نمی‌گیرند و تنها جنبه‌های اولیه تبادل پیام در این گونه سیستم‌ها را شبیه‌سازی می‌کنند. برای مثال نرم‌افزار OMNeT++ مفاهیمی از قبیل نودهای تشکیل دهنده شبکه، وقایعی که نودها دریافت و ارسال می‌کنند، و ابزارهایی برای جمع‌آوری اطلاعات و آمار نودهای در حال کارکرد شبکه را فراهم می‌کند. کاربری که می‌خواهد یک شبکه حسگربی‌سیم را مدل کند باید به ساخت مدلی از کانال، افت سیگنال، خطای بیت‌ها و سایر موارد بپردازد. برای سهولت این امر، می‌توان ازINET Framework و یا Mobility Framework استفاده نمود. این کتابخانه‌ها به توسعه‌ی قابلیت‌های OMNeT++ درزمینه شبیه‌سازی شبکه‌های ثابت و متحرک کمک می‌کنند. اگرچه Mobility Framework برای شبیه‌سازی شبکه‌های موردی معرفی شد، اما دارای قابلیت‌هایی در زمینه مدل‌سازی لایه‌های شبکه‌های بی‌سیم می‌باشد که می‌تواند برای مدل‌سازی شبکه‌های حسگر بی‌سیم نیز بکار گرفته شود.

جدول ۱- طبقه‌بندی تعدادی از الگوریتم‌های مسیریابی چندگانه

نوع کاربرد	نحوه نگهداری مسیرها	نحوه توزیع ترافیک	انتخاب‌گر مسیرها	تعداد مسیرها	نوع مسیرها	پروتکل مسیریابی چندگانه
تحمل‌پذیری در مقابل خرابی‌ها	پس از خرابی آخرین مسیر	یک مسیر	نودهای میانی	N	مجزای جزئی	Braided Multi-Path Routing [26]
تحمل‌پذیری در مقابل خرابی‌ها	خرابی آخرین مسیر	یک مسیر	نودهای میانی و نود مقصد	N	لینک مجزا (قابل توسعه به نود مجزا)	AOMDV [30]
بهبود قابلیت اطمینان	زمانی که قابلیت اطمینان مورد نظر برآورده نشود.	-	نود مقصد	N	نود مجزا	MP-DSR [32]
تحمل‌پذیری در مقابل خرابی‌ها	پس از خرابی آخرین مسیر	یک مسیر	نودهای میانی	N	نود مجزا	N-to-1 Multi Path Routing [28]
بهبود قابلیت اطمینان و امنیت	پس از خرابی آخرین مسیر	چندین مسیر	نودهای میانی	N	نود مجزا	H-SPREAD [29]
کاهش تأخیر	پس از خرابی آخرین مسیر	چندین مسیر	نود مقصد	N	نود مجزا	[33]
کاهش تأخیر و ازدحام	پس از خرابی یکی از مسیرها	چند مسیر	نود مقصد	۲(قابل توسعه)	نود مجزا	SEMR [34]
کاهش میزان انرژی مصرفی	پس از خرابی آخرین مسیر	چند مسیر	نود مقصد	۲(قابل توسعه)	نود مجزا	SMR [35]
کاهش میزان انرژی مصرفی	تنها دو مسیر یا کمتر فعال باشند	چند مسیر	نود مقصد	N	نود مجزا	[36]
کاهش میزان انرژی مصرفی	پس از خرابی آخرین مسیر	چند مسیر	نودهای میانی	N	نود مجزا	[37]
کاهش میزان انرژی مصرفی و افزایش گذردهی شبکه	پس از خرابی ۲ مسیر	چند مسیر	نودهای میانی	۳	نود مجزا	I2MR [39]
کاهش میزان انرژی مصرفی	تنها دو مسیر یا کمتر فعال باشند	چند مسیر	نود منبع	N	نود مجزا	[40]

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲- ابزارهای شبیه‌سازی متعارف برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم

نمونه نرم‌افزار	نوع شبیه‌سازی
TOSSIM [42]	شبیه‌سازی سیستم‌عامل نودها
PTOSSIM [43]	
OMNeT++ [44]	شبیه‌سازهای شبکه و سیستم‌های گسسته-پیشامد
NS-2 [45]	
GloMoSim [46]	
Avrora [47]	شبیه‌سازهای سطح دستورالعمل
ATEMU [48]	
Worldsens [49]	
Sunflower [50]	
Ptolemy [51]	سایر شبیه‌سازها
Empro [52]	
SenQ [53]	

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده در ارزیابی پروتکل‌های شبکه‌های حسگر بی‌سیم

پارامتر	توضیح	مقادیر
طول عمر شبکه	عموماً زمان اتمام انرژی اولین نود شبکه است.	چندین ماه تا چندین سال
توان مصرفی هر نود	به شدت به کارکرد بخش رادیویی هر نود وابسته می‌باشد. بهینه‌سازی پروتکل‌های مسیریابی و دسترسی به رسانه توان مصرفی را کاهش می‌دهد.	بر حسب mW و یا mJ بیان می‌شود
نرخ دریافت بسته‌ها	درصد نسبت بسته‌های دریافتی به بسته‌های ارسالی. به پروتکل مسیریابی و پروتکل‌های لایه اتصال داده‌ها وابسته می‌باشد.	درصدی از بسته‌های ارسالی
تأخیر انتها به انتها	تأخیر دریافت از زمان ارسال تا دریافت در مقصد. به پروتکل مسیریابی و پروتکل دسترسی به رسانه وابستگی زیادی دارد.	از میلی ثانیه تا چندین ثانیه و یا حتی دقیقه (بر حسب کاربرد)
تأخیر هر جهش	مقدار تأخیر ارسال بسته‌ها در هر جهش. به پروتکل دسترسی به رسانه وابستگی زیادی دارد.	عموماً بر حسب میلی ثانیه و یا ثانیه

۵-۲- معیارهای ارزیابی عملکرد شبکه

در جدول (۳) معیارهای مرتبط با ارزیابی عملکرد شبکه را بیان کرده‌ایم. در ادامه به بررسی این معیارها در رابطه با مسیریابی چندگانه خواهیم پرداخت.

۵-۲-۱- طول عمر شبکه

با استفاده از این معیار می‌توان مدت زمان پایداری شبکه را محاسبه نمود. در مقالات مختلف تعاریف گوناگونی از طول عمر شبکه ارائه شده است. اما در بسیاری از مقالات این پارامتر نشانگر زمانی می‌باشد که انرژی اولین نود حسگر تمام می‌شود. گروه دیگری از مقالات، این پارامتر را به‌عنوان زمانی که انرژی درصد مشخصی از نودها تمام می‌شود معرفی کرده‌اند.

۵-۲-۲- میانگین میزان توان مصرفی در هر نود

با استفاده از این معیار می‌توان میانگین انرژی مصرفی به‌وسیله هر نود برای ارسال داده‌ها از نود منبع به نود مقصد را محاسبه نمود. این معیار را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$E_a = \frac{\sum_{i=1}^{M}(e_{i,init} - e_{i,res})}{M \sum_{i=1}^{S} dataN_j}$$

در این فرمول پارامتر M بیانگر تعداد نودهای شبکه می‌باشد. پارامترهای $e_{i,init}$ و $e_{i,res}$ به‌ترتیب میزان انرژی اولیه و باقی‌مانده در نود iام را نشان می‌دهند. پارامتر S حاوی تعداد نودهای مقصد بوده و پارامتر N_j نیز میزان داده دریافتی توسط نود مقصد jام را تعیین می‌کند.

نتایج شبیه‌سازی بسیاری از پروتکل‌های مسیریابی ارائه شده حاکی از این حقیقت است که هرچه تعداد نودهای شبکه افزایش یابد به همان نسبت توانایی پروتکل مسیریابی چندگانه برای شناسایی مسیرهای بیشتر بالا خواهد رفت. بنابراین میزان ترافیک ارسالی توسط هر نود کاهش یافته و همین امر میانگین انرژی مصرفی در هر نود را کاهش می‌دهد.

۵-۲-۳- نرخ دریافت بسته‌ها

با استفاده از این معیار می‌توان نسبت بین تعداد بسته‌های ارسالی توسط نود منبع و تعداد بسته‌های دریافتی توسط نود مقصد را نشان داد. این معیار نرخ گم‌شدگی حاصل از هر پروتکل مسیریابی چندگانه را نشان می‌دهد. در حالت ایده‌آل مقدار این پارامتر برابر یک می‌باشد. اگر مقدار این معیار به‌طور قابل توجهی زیر حد ایده‌آل قرار گیرد نشان دهنده اشکالاتی در طراحی پروتکل مسیریابی است. درحالی‌که اگر این مقدار بالاتر از حد ایده‌آل باشد به‌این معنا است که نود مقصد تعداد زیادی از بسته‌ها را بیش از یک‌بار دریافت کرده است که این امر در شبکه‌های حسگربی‌سیم خوشایند نیست، چراکه باعث می‌شود منابع فعال شبکه به‌سرعت مصرف شده و طول عمر شبکه به‌طور قابل توجهی کاهش یابد.

www.SID.ir

Archive of SID

۵-۲-۴- تأخیر

با استفاده از معیار تأخیر می‌توان میانگین زمان سپری شده برای ارسال داده‌ها از نود منبع به نود مقصد را اندازه‌گیری کرد. نتایج شبیه‌سازی بسیاری از پروتکل‌های مسیریابی چندگانه ارائه شده نشان می‌دهند که تأخیرهای موجود در ارسال داده‌ها را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های مسیریابی چندگانه به‌طور قابل توجهی کاهش داد.

۵-۳- پارامترهای شبیه‌سازی

با درنظرگرفتن ابزار شبیه‌سازی OMNeT++، کاربر باید پارامترهای مختلفی را در شبیه‌سازی شبکه بکار بگیرد تا نتایج قابل اعتمادی را به‌همراه داشته باشد. از جمله مواردی که تأثیر زیادی برروی سرعت شبیه‌سازی و نتایج شبیه‌سازی دارد تعداد نودها و مساحت محیط می‌باشد.

با افزایش تعداد نودها و یا کاهش مساحت محیط، چگالی شبکه زیاد شده، تعداد همسایگان هر نود افزایش می‌یابد و پروتکل مسیریابی تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. اثر مشابهی در هنگام افزایش توان مصرفی هر نود قابل مشاهده است. اما برای آن‌که بتوان اثرات چگالی را برروی کارایی پروتکل مسیریابی بررسی نمود، معمولاً توان مصرفی ثابت در نظر گرفته می‌شود و تعداد نودها و یا مساحت محیط تغییر می‌کند.

برای آن‌که بتوان نودها را در محیط قرار داد سه توپولوژی وجود دارد: خطی، مشبک و اتفاقی. از آنجایی که پروتکل مسیریابی چندمسیری بر روی توپولوژی خطی کاربردی ندارد لذا این توپولوژی در شبیه‌سازی استفاده نمی‌شود. از میان دو توپولوژی مشبک و اتفاقی، کابر می‌تواند هر دو و یا یکی را با توجه به کاربرد شبکه انتخاب نماید. درصورت استفاده از توپولوژی اتفاقی باید شبیه‌سازی‌های گسترده‌ای را انجام داد و میانگین نتایج شبیه‌سازی را به‌عنوان نتایج اصلی درنظر گرفت.

برای آن‌که بتوان محیط واقعی قرارگیری نودها را مدل نمود و تأثیرات کانال بی‌سیم را در شبیه‌سازی درنظر گرفت، نیازمند مدل‌سازی دقیق کانال هستیم. در [۵۴ و ۵۵] روش‌های کاربردی مدل‌سازی کانال بی‌سیم ارائه شده‌اند. می‌توان از مدل‌های ارائه شده در این مقالات برای مدلسازی دقیق کانال بی‌سیم استفاده نمود. اما در شبیه‌سازی محیط و کانال بی‌سیم، به پارامترهایی برمی‌خوریم که انتخاب دقیق مقادیر آن‌ها در بدست آوردن نتایج قابل اعتماد ضروری است.

جدول (۴) این پارامترها را نشان می‌دهد. در این جدول مقادیر متعارف هر پارامتر در شبکه‌های حسگر بی‌سیم داده شده است.

جدول ۴- پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	توضیح
Modulation	نوع مدولاسیون به‌کار گرفته شده در رادیو (FSK, ASK, PSK,…)
Encoding	نوع کدگذاری سیگنال‌های ارسالی (Manchester,NRZ, 4B5B, SECDEC)
Output Power (P_t)	توان ارسالی رادیو برای MICA2: (-20 dBm< P_t < 5 dBm)
Frame Length	اندازه فریم‌های داده (شامل اندازه داده+هدرهای MAC و Physical)
Path Loss Exponent (*n*)	نرخ تضعیف سیگنال
Noise Floor	بستگی به نوع رادیو و محیط دارد (-110 dBm, -105 dBm,…)
D_0	فاصله مرجع (معمولاً ۱ متر)
PL_{D0}	-55 dB

جدول ۵- مقادیر قابل استفاده در شبیه‌سازی یک شبکه حسگر بی‌سیم

پارامترهای رادیو			
Modulation	FSK	Encoding	Manchester
Output Power	-7 dBm	Frame	50 Byte
پارامترهای رسانه انتقال			
Path Loss Exponent(n)	4	PL_{D0}	55 dBm
Noise Floor	-105 dBm	D_0	1 m

با توجه با آزمایشات عملی انجام شده، برای شبکه‌هایی که در محیط‌های داخلی کار می‌کنند، مقدار n باید حدوداً برابر ۳ باشد ($2.67<n<3.23$) اما برای محیط‌های خارجی مقدار ۴,۷ درنظر گرفته می‌شود ($4.3<n<5.1$). اندازه هدرهای لایه MAC و لایه فیزیکی در MicaZ برابر ۱۶ بایت است، بنابراین با درنظر گرفتن طول داده باید اندازه این دو هدر را به طول داده اضافه نمود تا اندازه هر فریم حاصل شود. با توجه به آن‌که توان ارسالی نودها را در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مقدار کمی درنظر می‌گیرند، مقدار توان ارسالی بین 0 dBm تا -20 dBm قابل قبول می‌باشد. در جدول (۵) برای هر یک از پارامترهای شبیه‌سازی مقداری معرفی شده است. این مقادیر با یک کاربرد عمومی از شبکه حسگر بی‌سیم مطابقت دارد و می‌تواند منجربه نتایج قابل قبولی شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش‌های مسیریابی چندگانه را به‌عنوان تکنیکی برای بهبود کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم معرفی

www.SID.ir

Archive of SID

کردیم. با توجه به مزایای حاصل از روش‌های مسیریابی چندگانه، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه توسعه این نوع پروتکل‌ها در حال انجام است. با این وجود، هنوز مشکلات عمده‌ای (از قبیل تداخلات رادیویی بین مسیرهای مختلف) در رابطه با بکارگیری این تکنیک‌ها در شبکه‌های بی‌سیم وجود دارد که به‌اندازه کافی مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. همچنین در پروتکل‌هایی که تاکنون طراحی شده‌اند هزینه‌ی هر لینک براساس فاصله تا مقصد و یا سطح انرژی باقی‌مانده در هر نود محاسبه می‌شود. اما می‌توان برای بهبود کارآیی پروتکل‌های مسیریابی چندگانه و افزایش دقت در ارزیابی هزینه‌ی هر لینک، از اطلاعات لایه‌ی اتصال داده و لایه‌ی فیزیکی استفاده نمود، درحالی‌که برای تحقق این امر نیازمند تحقیقات گسترده‌ای درزمینه‌ی روش‌های بهینه‌سازی بین لایه‌ای[۱۶] می‌باشیم.

به‌دلیل محدودیت‌های فضایی، در این مقاله تنها مجال یافتیم اصول اصلی مربوط به پروتکل‌های مسیریابی چندگانه را بیان کنیم. در این راستا، تکنیک‌های اصلی استفاده شده جهت شناسایی چندین مسیر بین هر جفت نود منبع و مقصد و نیز معیارهای در نظر گرفته شده در طراحی پروتکل‌های مسیریابی چندگانه ارائه شدند.

۷– مراجع

[1] J. Heidemann, R. Govindan; **"An Overview of Embedded Sensor Networks",** Springer, 2004.

[2] K. Karenos, V. Kalogeraki; **"Real-Time Traffic Management in Sensor Networks"**, Proceedings of the 27th IEEE International Real-Time Systems Symposium, pp. 422-434, December 2006.

[3] LF. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, **"A Survey on Sensor Networks"** Communications Magazine IEEE, Vol. 40, No. 8, pp. 102-114, Aug 2002.

[4] JA. Stankovic, TE. Abdelzaher, C. Lu, L. Sha, JC. Hou; **"Real-Time Communication and Coordination in Embedded Sensor Networks",** in Proceedings of the IEEE, Vol. 91, No. 7, pp. 1002-1022, July 2003.

[5] M. Younis, K. Akkaya, M. Eltoweissy, A.Wadaa; **"On Handling QoS Traffic in Wireless sensor Network",** IEEE, Jan 2004.

[6] Y. li, Ch. Shue Chen, Ye. Song, Z. Wang; **"Real-Time QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey",** In 7th IFAC International Conference on Fieldbuses & Networks in Industrial & Embedded Systems, 2007.

[7] K. Akkaya, M. Younis; **"An Energy-Aware QoS Routing Protocol for Wireless Sensor Networks"** IEEE, pp. 710- 715, May 2003.

[8] L. Buttyan, G. Acs; **"A Taxonomy of Routing Protocols for Wireless Sensor Networks"**, Hiradastechnika, January 2007.

[9] J. N. Al-Karaki, A. E. Kamal; **"Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: a Survey",** Wireless Communications, IEEE, Vol. 11, No. 6, pp. 6-28, Dec 2004.

[10] K. l. Akkaya, M. Youni; **"A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks"**, ScienceDirect, Vol. 3, No. 3, pp. 325-349, May 2005.

[11] W. Lou, W. Liu, Y. Zhang; **"Performance Optimization using Multipath Routing in Mobile Ad Hoc and Wireless Sensor Networks"**, Combinatoral Optimization in Communication Networks, 2005.

[12] M. Yabandeh, H. Mohammadi, N. Yazdani; **"Multipath Routing in Mobile Ad Hoc Networks: Desing Issues",** in 12 international CSI Computer Conference (CSICC07), Tehran, February 2007.

[13] J. Tsai, T. Moors; **"A Review of Multipath Routing Protocols: From Wireless Ad Hoc to Mesh Networks",** in Proccedings of the ACoRN Early Career Researcher Workshop on, Australia, 2006.

[14] D. Chen, K. Varshney; **"QoS Support in Wireless Sensor Networks: A survey",** International Conference on Wireless Networks, 2004.

[15] F. Xia; **"QoS Challenges and Opportunities in Wireless Sensor/ Actuator Networks"**, Diversity Preservation International (MDPI), Vol. 8, pp. 1099-1110, February 2008.

[16] Chih-Lin, R. D. Gitlin, J. E. Mazo E. Ayanoglu; **"Diversity Coding for transparent Self-Healing and Fault-Tolerant Communication Networks",** IEEE, Vol. 41, pp. 1677-1686, 1993.

[17] S. Dulman, T. Nieberg, J. Wu, P. Havinga; **"Trade-Off between Traffic Overhead and Reliability in Multi-path Routing for Wireless Sensor Networks"**, WCNC Workshop, 2003.

[18] Y. H. Wang, H. Z. Lin, Sh. M. Chang; **"Interference on Multipath QoS Routing for Ad Hoc Wireless Network"** IEEE, Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops-W7: EC (ICDCSW'04), Vol. 7, pp. 104-109, March 2004.

[19] Z. J. Haas, P. Sholander, S. S. Tabrizi M. R. Pearlman; **"On the Impact of Alternate Path**

www.SID.ir

Archive of SID

[20] K. Jain, J. Padhye, V. N. Padmanabhan; **"Impact of Interference on Multi-Hop Wireless Network Performance"**, in MobiCom 03: Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking, ACM, pp. 66-80, 2003.

[21] K. Wu, J. Harms; **"Performance Study of a Multipath Routing Method for Wireless Mobile Ad Hoc Networks",** 9th international symposium on modeling, analysis and simulation of computer and telecommunication system (MAS-COTS 01), August 2001.

[22] S. Toy, S. Bandyopadhyay, T. Ueda, S. Tanaka D. Saha; **"An Adaptive Framework for Multipath Routing Via Maximally Zone-Disjoint Shortest Paths in Ad Hoc Wireless Networks with Directional Antenna"**, Global Telecommunications Conference, IEEE, 2003.

[23] B. Yan, H. Gharavi; **"Multi-Path Multi-Channel Routing Protocol",** Proceedings of the Fifth IEEE International Symposium on Network Computing and Applications, pp. 27 - 31 , 2006.

[24] S. Roy, S. Bandyopadhyay, T. Ueda, K. Hasuike; **"Multipath Routing in Ad Hoc Wireless Networks with Omni Directional and Directional Antena: A Comprative Study",** in IWDC 02: proceedings of 4th international Workshop on Distributed Computing, Mobile and Wireless Computing. Springer, pp. 184-191, 2002.

[25] W. H. Tam, Y. C. Tseng; **"Joint Multi-Channel Link Layer and Multi-Path Routing Design for Wireless Mesh Networks",** INFOCOM 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE, pp. 2081-2089, May 2007.

[26] D. Ganesan, R. Govindan, S. Shenker, D. Estrin; **"Highly-Resilient, Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks",** ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, Vol. 5, No. 4, pp. 11-25, October 2001.

[27] C. Intanagonwiwat, R. Govindan ,D. Estrinl; **"Directed Diffusion: a Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks",** proceeding of ACM MobiCom, pp. 56-67, August 2000.

[28] W. Lou, **"An Efficient N-to-1 Multipath Routing Protocol in Wireless Sensor Networks",** IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, Vol. 7, No. 7, Nov 2005

[29] W. Lou, Y. K; **"H-SPREAD: a Hybrid Multipath Scheme for Secure and Reliable Data Collection in Wireless Sensor"** IEEE, Vol. 55, No. 4, pp. 1320 - 1330, July 2006.

[30] M. Marina, S. Das, **"On-demand multipath Distance Vector Routing in Ad Hoc Networks",** Ninth International Conference for Network Protocols (ICNP), Nov 2001.

[31] C. E. Perkins, E. m. Royer, S. R. Dos; **"Ad Hoc on Demand Distance Vector (AODV) Routing",** IETF Internet Draft, July 2000.

[32] R. Leung, J. Liu, E. Poon, ALC Chan, B. Li, **"MP-DSR: a QoS-aware Multi-Path Dynamic Source Routing Protocol for Wireless ad-hoc Networks",** Local Computer Networks, IEEE, pp. 132-141, 2001.

[33] P. Hurni, T. Braun; **"Energy-Efficient Multi-Path Routing in Wireless Sensor Network,"** Springer, Vol. 5198, pp. 72-85, September 2008.

[34] Ch. Ahn, J. Shin, E-N. Huh, **"Enhanced Multipath Routing Protocol Using Congestion Metric in Wireless Ad Hoc Networks"** International Federation for Information Processing, pp. 1089-1097, 2006.

[35] S. J. Lee, M. Gerla; **"Split Multipath Routing with Maximally Disjoint Paths in Ad Hoc Networks"**, IEEE International Conference on Communications, Vol. 10, pp. 3201-3205, 2001.

[36] YM. Lu, V. W. S. Wong; **"An Energy-Efficient Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks",** International Journal of Communication Systems, Vol. 20, No. 7, pp. 747-766, July 2007.

[37] J. R. Gallardo, A. Gonzalez, L. Villasenor-Gonzalez, J. Sanchez; **"Multipath Routing Using Generalized Load Sharing for Wireless Sensor Networks",** ACTA, 2007.

[38] K. C. Leung, VO. K. Li; **"Generalized Load Sharing for Packet-Switching Networks. I. Theory and Packet-Based Algorithm",** Parallel and Distributed Systems, IEEE , Vol. 17, No. 7, pp. 694 - 702, July 2006.

[39] JY. Teo, Y. Ha, Ch-kh. Tham; **"Interfrence-Minimized Multipath Routing with Congestion Control in Wireless Sensor Network for High-Rate Streaming",** Journal of IEEE transaction of mobile computing, Vol. 7, No. 9, pp. 1124-1137, April 2008.

Routing for Load Balancing in Mobile Ad hoc Networks", 1st ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, Boston, Massachusetts: IEEE Press, 2000.

www.SID.ir

Archive of SID

(HiPEAC 2007) / Lecture Notes on Computer Science 4367, p. 168–182, 2007.

[51] P. Baldwin, S. Kohli, E. A. Lee, X. Liu, Y. Zhao; **"Modeling of Sensor Nets in Ptolemy II",** In IPSN '04: Proceedings of the third international symposium on Information processing in sensor networks, ACM, p. 359–368, April 2004.

[52] C. Park, P. H. Chou; **"Empro: an Environment/Energy Emulation and Profiling Platform for Wireless Sensor Networks"**, Third Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, p. 158–167, 2006.

[53] M. Varshney, D. Xut, M. Srivastavat, R. Bagrodiat; **"Senq: a Scalable Simulation and Emulation Environment for Sensor Networks",** In IPSN '07: Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks, ACM, p. 196–205, April 2007.

[54] M. Zuniga and B. Krishnamachari; **"Analyzing in the Transitional Region in Low Power Wireless Links",** IEEE SECON'04, 2004.

[55] B. Krishnamachari and M. Zúñiga Zamalloa; **"An Analysis of Unreliability and Asymmetry in Low-Power Wireless Links"** ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), Vol. 3, No. 2, 2007

۸– پی‌نوشت‌ها

1- Wireless Sensor Network
2- Quality of Service
3- Multi-Path Routing
4- Data Aggregation
5- Congestion Control
6- Route Coupling
7- Interference
8- Correlation Factor
9- Throughput
10- On-demand Routing
11- Hop
12- Enforcement Message
13- Threshold Secret Sharing
14- Conflict Graph
15- Total Interference Correlation Factor
16- Cross-Layer Optimization

[40] R. Vidhyapriya, P. T. Vanathi; **"Energy Efficient Adaptive Multipath Routing for Wireless Sensor Networks",** IAENG International Jornal of Computer Sience, August 2007.

[41] D. B. Johnson, D. A. Maltz, Y. C. Hu, J.G. Jetcheva; **"The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks",** in IETF Internet Draft, Oct 1999.

[42] P. Levis, N. Lee, M. Welsh, D. Culler; **"Tossim: accurate and scalable simulation of entire tinyos applications",** In SenSys '03: Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems. ACM, p. 126–137, 2003.

[43] V. Shnayder, M. Hempstead, B. Chen, G. V. Allen, M. Welsh; **"Simulating the Power Consumption of Large-Scale Sensor Network Applications",** In SenSys '04: Proceedings of the, p. 188–200, 2004.

[44] A. Varga; **"The OMNeT++ Discrete Event Simulation System"**, In Proceedings of the European Simulation Multiconference, ESM, 2001.

[45] **"ns-2 Network Simulator",** http:// www.isi.edu / nsnam/ns/, ISI , (March, 2008)

[46] X. Zeng, R. Bagrodia, M. Gerla; **"Glomosim: a Library for Parallel Simulation of Large-Scale Wireless Networks",** ACM SIGSIM Simulation Digest, Vol. 28, No. 1, pp. 154 - 161, 1998.

[47] B. L. Titzer, D. K. Lee, J. Palsberg, **"Avrora: Scalable Sensor Network Simulation with Precise Timing",** In IPSN '05: Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks, IEEE, pp. 477- 482, April 2005.

[48] J. Polley, D. Blazakis, J. McGee, D. Rusk, J. S. Baras, **"ATEMU: a Fine-Grained Sensor Network Simulator"** In First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, p. 145–152, Oct 2004.

[49] A. Fraboulet, G. Chelius, E. Fleury; **"Worldsens: Development and Prototyping Tools for Application Specific Wireless Sensors Networks",** In IPSN'07: Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks, ACM, p. 176–185, April 2007.

[50] P. Stanley-Marbell, D. Marculescu; **"Sunflower: Full-System, Embedded Microarchitecture Evaluation",** 2nd European conference on High Performance Embedded Architectures and Computers

www.SID.ir