فهرست مطالب

عنوان | صفحه

فهرست مطالب.....هشت

چکیده.....۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه :.....۲

۱-۲ هدف پایان نامه:.....۳

۱-۳ ساختار پایان نامه:.....۴

فصل دوم:معرفی کدینگ شبکه

۲-۱ مقدمه :.....۵

۲-۲ تعریف و معرفی کدینگ شبکه:.....۵

۲-۳ تاریخچه کدینگ شبکه:.....۷

۲-۴ مزایای کدینگ شبکه:.....۷

۲-۴-۱ افزایش توان:.....۷

۲-۴-۲ تعادل بار:.....۷

۲-۴-۳ صرفه جویی در مصرف پهنای باند:.....۸

۲-۴-۴ افزایش استحکام خطا:.....۸

۲-۴-۵ افزایش امنیت:.....۹

۲-۵ معایب کدینگ شبکه:.....۹

۲-٦ مدل سیستم مخابراتی بیسیم و کدینگ شبکه.....۱۰

۲-۷ مسیریابی و کدینگ شبکه در شبکه‌های ad hoc بیسیم چند گامی:.....۱۳

۲-۸ مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه و فرصت‌طلب در شبکه‌های بی‌سیم : ۱۴
۲-۸-۱ مسیریابی آگاه به کدینگ (و آگاه به تداخل): ۱۴
۲-۹ مسیریابی در شبکه‌های بی‌سیم مبتنی بر کدینگ شبکه و آگاه به کدینگ شبکه : ۱۵
۲-۱۰ مسیریابی فرصتطلب: ۱۵
۲-۱۰-۱ مفهوم : ۱۵
۲-۱۰-۲ ویژگی‌های جزئی : ۱۶
۲-۱۰-۳ طبقه‌بندی و پروتکل‌های وابسته : ۱۶
۲-۱۱ مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه : ۱۷
۲-۱۱-۱ COPE : ۱۷
۲-۱۲ طبقه بندی پروتکل‌های مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه : ۱۹
۲-۱۳ معیار انتخاب مسیریابی : ۲۰
۲-۱۳-۱ معیارمسیریابی مبتنی بر تعداد گام : ۲۰
۲-۱۳-۲ معیار تعداد ارسال‌های مورد انتظار : ۲۱
۲-۱۳-۳ معیار تعداد مورد انتظار ارسال‌های کد شده : ۲۱
۲-۱۳-۴ معیار مبتنی بر بار : ۲۱
۲-۱۴ خلاصه و نتیجه‌گیری: ۲۲
فصل سوم: بررسی پروتکل‌های مربوط به آگاه بودن به کدینگ شبکه
۳-۱ مقدمه: ۲۳
۳-۲ مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه‌ی متمرکز: ۲۳
۳-۳ مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه‌ی توزیع شده : ۲۵
۳-۴ مسیریابی منبع : ۲۵
۳-۵ مسیریابی گام به گام : ۳۱

۳-۶ مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه فعال : ۴۴
۳-۷ خلاصه و نتیجه‌گیری ۴۵
فصل چهار: پروتکل پیشنهادی
۴-۱ مقدمه ۴۶
۴-۲ توضیحی درباره COPE: ۴۶
۴-۳ قوانین کدینگ و فرضیات مدلسازی: ۴۸
۴-۴ توضیحی درباره پروتکل AODV: ۴۹
۴-۴-۱ کشف مسیر: ۴۹
۴-۴-۲ ایجاد مسیر معکوس: ۴۹
۴-۴-۳ ایجاد مسیر مستقیم: ۵۰
۴-۵ توضیح پروتکل جدید ۵۱
۴-۶ تاثیر دریافت‌های ناموفق بسته ۵۲
۴-۷ جمع‌بندی تحلیل دو معیار نرخ گذردهی و متوسط بسته‌های گم شده ۵۶
۴-۸ مدل لینک خطادار ۵۹
۴-۹ روش مسیریابی ۶۰
۴-۱۰ مشخصات طراحی پروتکل جدید ۶۰
۴-۱۰-۱ فرمت بسته‌های کد شده ۶۰
۴-۱۱ تفاوت پیاده‌سازی پروتکل جدید و COPE ۶۱
۴-۱۱-۱ تابع پردازش بسته‌های کد نشده ۶۲
۴-۱۱-۲ ساختارهای کدینگ ۶۳
۴-۱۲ جزئیات پیاده‌سازی ۶۳
۴-۱۲-۱ الگوریتم کد کردن بسته‌ها ۶۳

۴-۱۲-۲ الگوریتم کدگشایی بسته‌ها ۶۷
۴-۱۲-۳ شنود فرصت‌طلبانه ۶۷
۴-۱۳ خلاصه و نتیجه‌گیری ۶۷
فصل پنجم: نتایج شبیه‌سازی
۵-۱ نتایج شبیه‌سازی ۶۸
۵-۱-۱ تنظیمات عمومی شبیه‌سازی ۶۸
۵-۱-۲ مدل ترافیکی ۶۹
۵-۲ ارزیابی۱ ..... ۶۹
۵-۳ارزیابی۲ ..... ۷۱
۵-۴ ارزیابی۳ ..... ۷۳
۵-۵ نتیجه‌گیری ۷۶
فصل ششم: نتیجه‌گیری
نتیجه‌گیری ۷۷
۶-۱ نتیجه‌گیری ۷۷
۶-۲ پیشنهادات ۷۹
مراجع: ۸۰

چکیده: شبکه‌های بی‌سیم امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته و استفاده از آن در حال افزایش است. این مساله باعث شده که محققان شبکه در پی راه حل‌هایی برای بهبود عملکرد و افزایش توان عملیاتی شبکه‌های بی‌سیم باشند. یکی از این راه حل‌ها کدینگ شبکه می‌باشد که از سال ۲۰۰۰ بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است.

در این پایان نامه برای بهبود توان عملیاتی شبکه‌ی بی‌سیم تلاش شده‌است. در ابتدا مختصری به معرفی کدینگ شبکه و بررسی مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه که موضوع اصلی پایان نامه است پرداخته شده‌و به طبقه‌بندی پروتکل‌های آن می‌پردازیم. در ادامه توضیح مختصری درباره-ی انواع پروتکل‌های مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه داده شده‌است و بخصوص پروتکل COPE که اولین پروتکل ارائه شده در کاربر تک-پخشی در کدینگ شبکه می‌باشد، در این پایان نامه برای بهبود عملکرد و افزایش توان عملیاتی پروتکل COPE تلاش شده‌که در نتیجه منجر به ارائه‌ی یک پروتکل جدید شده‌است. هنگامی‌که در COPE کانال را ایده‌آل و بدون خطا در نظر بگیریم عملکرد شبکه خیلی خوب خواهد بود اما در واقعیت کانال دارای نویز می‌باشد، که منجر به خطا در رسیدن بسته‌ها به مقصد می‌شود. به همین دلیل ما ابتدا با در نظر گرفتن احتمال ناموفق بسته‌ها در ارسال تک‌پخشی و همه‌پخشی در ارسال‌ها احتمال موفقیت را بدست آورده سپس در پروتکل جدید علاوه بر دریافت بسته‌های محلی، ارسال‌های همه‌پخشی و شنود فرصت‌طلبانه هم در زمره‌ی ارسال‌های نامطمئن قرار می‌گیرد. به این ترتیب عدم دریافت بسته از طریق آن‌ها در قالب پارامترهایی مجزا مدلسازی شده‌اند و تحلیلی بر اساس دو معیار میزان گم شدن بسته‌ها و نرخ گذردهی انجام شده است و به محاسبه‌ی این دو معیار در پروتکل COPE و پروتکل ارائه شده پرداخته‌ایم، همچنین مقایسه‌ای را بر حسب این دو معیار انجام داده‌ایم. در ادامه پروتکلی به این صورت ارائه شده که در سناریوی توپولوژی COPE ساده یک گره فرعی اضافه شده که در حال گوش دادن به ارسال‌های درون شبکه است و آن‌ها را دریافت و ذخیره می‌کند که در هنگام رخ دادن خطا بوسیله‌ی تاخیرهای ایجاد شده در گره فرعی و میانی از آن‌ها برای کد کردن و ارسال به مقصدها استفاده شود. شبیه‌سازی آن با نرم‌افزار NS3 انجام و به مقایسه‌ی نتایج آن با پروتکل COPE پرداخته شده، و در نهایت مشاهده شد که توان عملیاتی پروتکل ارائه شده بهبود یافته‌است.

کلمات کلیدی: ۱-مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه ۲-توان عملیاتی ۳-نرخ گذردهی ۴-متوسط بسته‌های گم شده

فصل اول

مقدمه

۱. مقدمه

استفاده از شبکه‌های بی‌سیم[1] علی‌رغم ظرفیت محدود آن در حال افزایش است. این مسئله باعث می‌شود که محققان شبکه برای پیدا کردن راه‌های مختلف برای بهبود عملکرد شبکه‌های بی‌سیم تشویق شوند. کدینگ شبکه[2] یکی از معدود راه حل‌هایی برای گسترش ظرفیت فن‌آوری بی‌سیم فعلی است. یکی از مسائل اصلی در شبکه‌های کامپیوتری مسیریابی است. در مسیریابی سنتی، هر مسیریاب[3] تنها بسته‌ها را ذخیره و ارسال می کند. ایده کدینگ شبکه که توسیعی از مسیریابی است و به مسیریاب‌ها اجازه می دهد بر روی بسته‌ها پردازش انجام دهند در سال ۲۰۰۰ مطرح شد. در کدینگ شبکه برای پردازش بسته هادر برخی موارد به جای ارسال یک بسته، دو یا چند بسته را با یکدیگر کد کرده و ارسال می کند. بدین ترتیب هر گره به‌جای تنها کپی کردن ورودی بر خروجی، می تواند توابع دلخواهی را بر روی ورودی‌هایش اعمال کند و بر روی هر یک از خروجی‌هایش قرار دهد. در واقع قبل از سال ۲۰۰۰، کدینگ در مسیریاب‌ها به عنوان ابزاری برای مقابله با خطا و یا کاهش تاخیر مطرح بود اما نشان داده‌شد که کدینگ شبکه حتی در یک شبکه با کانال‌های مطمئن، بدون خطا و بدون تاخیر نیز می‌تواند در شرایط خاصی به افزایش ظرفیت منجر شود. از مزایای کدینگ شبکه می توان به کارایی بیشتر در استفاده از منابع (انرژی، پهنای باند،...) و مقاومت بیشتر در برابر تغییرات شبکه اشاره کرد.[۶]

---

[1] Network wireless
[2] Network coding
[3] Router

در مفهوم مخابرات تعداد زیادی از شبکه‌ها وجود دارند. برای مثال شبکه‌ی تلفنی، اینترنت، شبکه‌ی نقطه به نقطه[1]، شبکه‌های ad hoc بی‌سیم. تحقیقات قابل توجهی روی عملکردها و مدیریت شبکه‌های مخابراتی با هدف انتقال اطلاعات در شرایطی با قابلیت اطمینان بالا، امنیت، توان عملیاتی متمرکزشده‌است. کدینگ شبکه تکنیکی است که در شروع دهه‌ی قبل با هدف اولیه‌ی بهبود توان عملیاتی شبکه ظهور یافته‌است و از آغاز به کار خود، علاقه‌ی محققان را به خود جذب کرده به‌طوری که بهبود استفاده از منابع و شبکه‌های سیمی و بی‌سیم را مورد بررسی قرار داده‌اند.

طرح کدینگ شبکه جریان دقیقی از بسته‌های اطلاعاتی[2] را در شبکه بوسیله‌ی انتقال پیام دیجیتال ترکیب شده از منبع به مقصد تصحیح می‌کند. قبل از کدینگ شبکه، این کار فقط در گره‌های میانی(سوئیچ‌ها[3] و مسیریاب‌ها)درون شبکه برای انتقال بسته‌های اطلاعاتی به سمت مقصد انجام می‌شد. ایدئولوژی کدینگ شبکه علاوه‌بر انتقال بسته‌های اطلاعاتی، ترکیب هوشمندانه‌ی بسته‌ها را برای افزایش توان عملیاتی شبکه تشویق می‌کند. در کدینگ شبکه، مسیریاب‌ها و سوئیچ‌ها بوسیله‌ی کدکننده‌هایی که در گره‌های میانی[4] برای کد کردن پیام‌های ورودی و سپس ارسال این پیام‌ها به گره‌های دیگر صورت می‌گیرد جایگزین می‌شود.

۱-۲ هدف پایان نامه

از آن‌جا که اخیرا کدینگ شبکه بسیار مورد استفاده بوده‌است، دارای مزیت‌های زیادی از جمله افزایش توان در شبکه است. همچنین کدینگ شبکه تعداد ارسال‌ها را در هزینه‌ی انجام بعضی پردازش‌ها کاهش می‌دهد.

اولین طرح کدینگ شبکه‌ی عملی برای شبکه‌های بی‌سیم COPE نامیده می‌شود. COPE بهره‌ی کدینگ تبادل اطلاعات را با استفاده از کدینگ فرصت‌طلب از دو یا چند بسته در یک ارسال مجزا گسترش می‌دهد. COPE این کار را با داشتن گره‌هایی که ارسال‌های دیگر را در همسایه‌ها می‌شنود و گزارش شنود[5] را برای گفتن به همسایه‌ها که کدام بسته‌ها را دارند ارسال می‌کند، انجام می‌دهد. همچنین COPE فرصت شنیدن و کدینگ را برای بدست آوردن افزایش توان بکار می‌گیرد.

در ادامه، بیان می‌شود که مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه به دو طبقه‌ی فعال و غیر فعال، طبقه‌ی غیر فعال خود به دو قسمت متمرکز و توزیع شده، و قسمت توزیع شده نیز به دو قسمت مسیریابی منبع و مسیریابی گام به گام تقسیم می‌شود. سپس پروتکل‌های مربوط به هر قسمت معرفی و توضیح داده شده‌اند، از جمله پروتکل‌های NJCAR,CORE,CAOR.

در این پایان نامه با بررسی‌های لازم بر روی انواع پروتکل‌ها و به خصوص پروتکل COPE روشی را برای بهبود این پروتکل در جهت افزایش توان در آن مورد بررسی قرار می‌دهیم.

---

[1] Peer-to-peer
[2] Data
[3] Switch
[4] Intermediate node
[5] Reception report

۱-۳ ساختار پایان نامه

در ادامه بحث، فصل دوم به معرفی کدینگ شبکه و تاریخچه‌ای از آن و مزیت‌ها و معایب آن می‌پردازد، همچنین به بررسی انواع سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم و معرفی مسیریابی فرصت‌طلب و همچنین معرفی انواع معیارهای مسیریابی پرداخته می‌شود.

در فصل سوم به معرفی انواع مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه و بررسی پروتکل‌های آن‌ها می‌پردازیم.

در فصل چهارم، به ارائه‌ی پروتکل جدیدی جهت افزایش توان عملیاتی شبکه پرداخته‌ایم، در ابتدا به بررسی پروتکل COPE می‌پردازیم. سناریوی در نظر گرفته‌شده برای بررسی این پروتکل توضیح داده شده و در نهایت دو پروتکل با هم مقایسه شده‌اند.

در فصل پنجم نتایج شبیه‌سازی قرار داده شده‌است.
در فصل ششم به ارائه‌ی پیشنهادات و نتیجه‌گیری نهایی اختصاص دارد.

فصل دوم

معرفی کدینگ شبکه

۲-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا به معرفی کدینگ شبکه و تعریفی از آن می‌پردازیم، سپس تاریخچه و مزایا و معایب آن را بیان می‌کنیم. مفهوم مسیریابی فرصت‌طلب بیان شده، و در ادامه طبقه‌بندی و بیان کلی از پروتکل‌های وابسته به آن معرفی می‌شود. سپس طبقه‌بندی از پروتکل‌های مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه بیان شده که به تفصیل در فصل ۳ توضیح داده می‌شود. و در ادامه‌ی فصل دوم اولین پروتکلی که در کاربرد تک‌پخشی در کدینگ شبکه معرفی شده به نام COPE توضیح داده می‌شود. در ادامه هم انواع معیارهای انتخاب مسیریابی معرفی شده‌اند.

۲-۲ تعریف و معرفی کدینگ شبکه

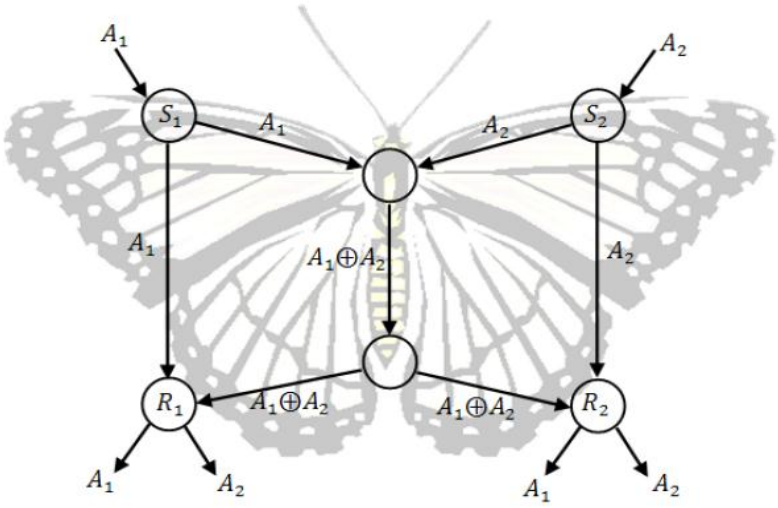
کدینگ شبکه، تکنولوژی تبادل اطلاعات است که کدینگ ومسیریابی را ترکیب می‌کند. روشی است که در آن به سادگی دریافت اطلاعات به جای استفاده از رله[1] از طریق بسته صورت می‌گیرد و گره‌هایی از شبکه بسته‌های مختلف و ترکیب آن‌ها را با یکدیگر برای انتقال می‌فرستند که می‌توان از آن برای رسیدن به حداکثر جریان اطلاعات ممکن در شبکه و همچنین افزایش ظرفیت و یا توان عملیاتی شبکه استفاده‌کرد.

اطلاعات در شبکه اغلب غیر قابل تغییر فرض می‌شوند. بسته‌های اطلاعاتی در شبکه اغلب در بعضی راه‌ها به‌عنوان ماشین و شبکه‌ی انتقال به‌عنوان بزرگراه طراحی می‌شوند. یعنی، جریان اطلاعات به‌طور جداگانه و همه توابع شبکه، مانند مسیریابی، ذخیره‌ی اطلاعات و غیره حفظ می‌شوند. اما باید توجه کنیم که اطلاعات اساسا متفاوت از ماشین یا مایعات

[1] Relay

است. برای مثال، وقتی یک ماشین به تقاطع می‌رسد، فقط در طول یک جاده می‌تواند حرکت کند، اما جریان می‌تواند تکرار شود و در شبکه به‌طور همزمان در سراسر بسیاری از کانال‌ها ارسال شود. برای مثال، اگر یک مسیریاب دو بیت دریافت کند، x و y، می‌تواند توابع آن‌ها یعنی $x \oplus y$ را ارسال کند. در کدینگ شبکه به‌جای این‌که فقط اطلاعات را ذخیره و ارسال کند، گره‌ها ممکن است چندین بسته را ترکیب و بعد ارسال کنند و در این راه آن‌ها می‌توانند چندین بسته را در یک ارسال مجزا منتقل کنند. ایده‌ی اساسی کدینگ شبکه معمولا با استفاده از مثال پروانه‌ای[1] معروف نشان داده می‌شود.[۱]

شبکه‌ی پروانه‌ای در شکل ۲-۱ نمایش داده شده‌است، که در آن ظرفیت هر لینک[2] یک بسته در واحد زمان است. در این سناریوی ساده، منبع S_1 می‌خواهد بسته‌ی A_1 را به هر دو گیرنده‌ی R_1 و R_2 بفرستد، و منبع S_2 نیز می‌خواهد بسته‌ی A_2 را به این دو گیرنده تحویل بدهد. اگر مسیریاب‌ها فقط بسته‌های دریافتی را ارسال کنند، لینک میانی تنگنا[3] خواهد بود، زیرا در هر واحد از زمان می‌تواند یکی از بسته‌های A_1 و A_2 را حمل کند. برای مثال، وضعیتی که بسته‌ی A_1 حمل شده را ملاحظه می‌کنیم، مثل R_1 که این بسته را دوبار دریافت می‌کند، اما هنوز درباره‌ی بسته‌ی A_2 اطلاعی ندارد، و همین مشکل برای R_2 رخ خواهد داد اگر بسته‌ی A_2 توسط لینک میانی حمل شود، گیرنده‌ها هر دو بسته را در ۵ ارسال بدست می‌آورند.



شکل ۲-۱ : مثال پروانه‌ای معروف

از سوی دیگر، اگر روتر لینک میانی دو بسته را XOR کرده و سپس ترکیب خطی $A1 \oplus A2$ را ارسال کند، همان‌طور که در شکل ۲-۱ مشاهده می‌شود در R_1، A_2 می‌تواند از A_1 و $A1 \oplus A2$ بدست آید و به‌طور مشابه، A_1 می‌تواند در

[1] Butterfly
[2] Link
[3] Bottleneck

R_2 بدست آید. هر دو گیرنده‌ها می‌توانند هر دو بسته‌ها را در ۳ ارسال بدست آورند. چنان‌که می‌بینیم کدینگ شبکه می‌تواند توان شبکه را افزایش دهد.

۲-۳ تاریخچه کدینگ شبکه

مفهوم کدینگ شبکه اولین بار توسط آقای Ashlswede و همکارانش[۱] مطرح شد. Ashlswede نشان داد که با استفاده از کدینگ شبکه، می‌توان به بیشینه‌ی توان انتقال داده در شبکه های چندپخشی[1] دست یافت. درحالی‌که الگوریتم‌های مسیریابی قادر به چنین دستاوردی نیستند. پس از آن در سال ۲۰۰۳ توسط shuo نشان داده شد که کدینگ شبکه‌ی خطی[2] برای دستیابی به ظرفیت در حالت چند پخشی کفایت می‌کند[۲]. در سال ۲۰۰۵ توسط Yc ظرفیت شبکه‌های بی‌سیم در حضور کدینگ مورد بررسی قرار گرفته شد[۳]. یکی از مسائل مهم در شبکه‌های بی‌سیم به خصوص شبکه‌های سنسوری[3]، میزان توان مصرفی در هر یک از رئوس شبکه و همچنین توان مصرفی در کل شبکه می‌باشد و بررسی‌هایی برروی کارایی کدینگ در کاهش توان مصرفی در سال ۲۰۰۷ توسط Katti و همکارانش صورت گرفته است [٤].

۲-۴ مزایای کدینگ شبکه

استفاده از کدینگ شبکه در شبکه‌های ارتباطی دارای مزایای مختلفی است که به شرح زیر می‌باشد:

۲-۴-۱ افزایش توان

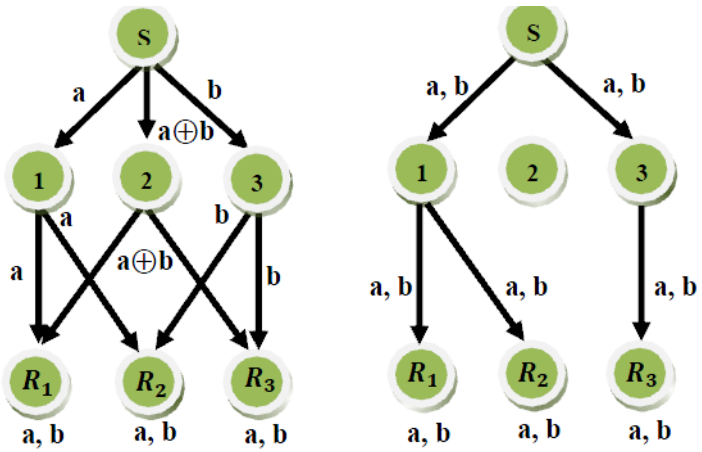
مثال پروانه‌ای معروف، بهترین مثالی است که مزایای کدینگ شبکه را از لحاظ توان نشان می‌دهد. این مثال نشان می‌دهد که اگر گره‌های میانی اجازه داشته باشند جریان‌های اطلاعاتی را به‌طور جداگانه در شبکه کد کنند، توان شبکه افزایش می‌یابد.

۲-۴-۲ تعادل بار

در[۷]، بحث شده است که بار ترافیکی[4] کدینگ شبکه‌ی بکارگرفته شده می‌تواند در تمام شبکه توزیع شود. برای بهتر فهمیدن آن مثالی را در شکل ۲-۲ بیان می‌کنیم.

---

[1] Multicast
[2] Linear network coding
[3] Sensor network
[4] Load traffic



شکل 2-2 : مقایسه‌ای بین رویکرد فعلی و رویکرد کدینگ شبکه[۷]

در این شکل، ظرفیت هر لینک ۲ بیت بر ثانیه است. در هر دو این شبکه‌ها، هدف انتقال بیت‌ها است. aوb، از منبع S به سه مقصد R_1,R_2,R_3 منتقل می‌شوند. در شبکه‌ای که کدینگ شبکه استفاده نمی‌شود، ۵ لینک با ظرفیت حداکثر برای انتقال a و b استفاده می‌شوند. در حالی‌که در شبکه‌های دیگر(که در آن کدینگ شبکه بکار گرفته شده است)، ۹ لینک با نیمی از حداکثر ظرفیت استفاده می‌شود. چنین ترافیکی در شبکه برای چندین لینک توزیع می‌شود و کدینگ شبکه می‌تواند اثری بر تعادل بار داشته باشد.

این ویژگی از کدینگ شبکه، ازدحام[۱] در بعضی لینک‌های شبکه را که منجر به کاهش تعداد ارسال‌های مجدد و تاخیر شبکه می‌شود، جلوگیری می‌کند.

۲-۴-۳ صرفه‌جویی در مصرف پهنای باند[۲]

درحالی‌که پهنای باند، منابع را در شبکه‌ی فعلی محدود می‌کند. همیشه باید راهی برای صرفه‌جویی در آن پیدا کنیم که کدینگ شبکه می‌تواند راه حل بهتری برای آن باشد. می‌توانیم در هر ارسال با استفاده از کدینگ شبکه اطلاعات بیشتری را منتقل کنیم، چنان‌که لینک‌ها مقدار کمتری از زمان را اشغال می‌کنند. در حقیقت، صرفه‌جویی در پهنای باند و افزایش توان شبکه با یکدیگر مرتبط هستند.

۲-۴-۴ افزایش استحکام خطا[۳]

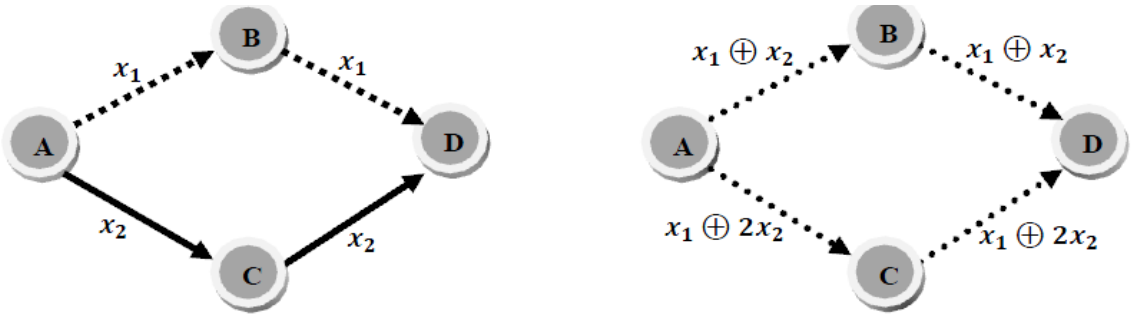
درحالی‌که کدینگ شبکه بار ترافیکی را در تمام شبکه توزیع می‌کند، متوسط بار روی هر لینک نیز کاهش خواهد یافت. از سوی دیگر، یک لینک با بار بیشتر، نقش حیاتی بیشتری در شبکه دارد، و منجر به عدم دریافت اطلاعات توسط لینک معیوب می‌شود. اما، بکارگیری کدینگ شبکه ترافیک در شبکه را بین چندین لینک توزیع خواهد کرد. چنان‌که

[1] Congestion
[2] Bandwidth
[3] Failure Robustness

هرگاه خطایی در هر یک از لینک‌ها رخ داد، اطلاعات کمتری از دست خواهد رفت و در نتیجه استحکام خطا در شبکه افزایش خواهد یافت[۸]. درواقع، افزایش استحکام و تعادل بار با یکدیگر مرتبط هستند.

۲-۴-۵ افزایش امنیت

ارسال اطلاعات کد شده به‌جای اطلاعات کد نشده یک روش ساده را برای استفاده از امنیت در برابر حملات استراق سمع[۱] پیشنهاد می‌کند. مثالی را در شکل 2-3 بررسی می‌کنیم[۹]. در این مثال، گره A اطلاعات را به گره D از طریق دو مسیر ABD و ACD می‌فرستد. فرض کنید که دشمن بتواند یک مسیر را استراق سمع کند، و به مسیر دیگر دسترسی نداشته باشد. اگر نمادهای x_1 و x_2 غیر کد شده ارسال شوند، دشمن می‌تواند یکی از آن‌ها دریافت کند.



شکل ۲-۳: ترکیب جریان‌های اطلاعات حفاظت طبیعی در برابر استراق سمع [۹]

اما اگر در عوض، ترکیبی از نمادها از طریق راه‌های مختلف ارسال شوند، دشمن نمی‌تواند قسمتی از اطلاعات را کدگشایی[۲] کند.

۲-۵ معایب کدینگ شبکه

در مقابل مزایایی که کدینگ شبکه می‌تواند برای شبکه‌های فعلی فراهم کند، کدینگ شبکه ممکن است معایبی هم داشته باشد. مشکل اصلی کدینگ شبکه از دست دادن یک بسته است که می‌تواند اثر زیادی روی بسته‌های دیگر داشته باشد و برخی اطلاعات را در گیرنده غیرقابل استفاده سازد. برای مثال در شکل ۲-۳، گره D به هر دو $x1 \oplus x2$ و $x1 \oplus 2x2$ برای دریافت x_1 و x_2 نیاز دارد. اگر $x1 \oplus x2$ در شبکه از دست برود، گره D نمی‌تواند x_1 و x_2 را بدست آورد حتی اگر $x1 \oplus 2x2$ را بدرستی دریافت کند.

در این وضعیت، اگر اطلاعات کد شده هم به‌طور صحیح دریافت شود نیز از دست رفته در نظر گرفته می‌شود زیرا اطلاعات کد شده به خودی خود بی‌فایده است. بعلاوه، کدینگ شبکه در برابر حملات خرابکارانه که در آن یک مسیریاب اطلاعات فاسد را با بسته‌های صحیح کد می‌کند، آسیب‌پذیر است. بعضی مقاله‌ها راه حل‌هایی را برای مقابله با آن بیان کرده‌اند.

---

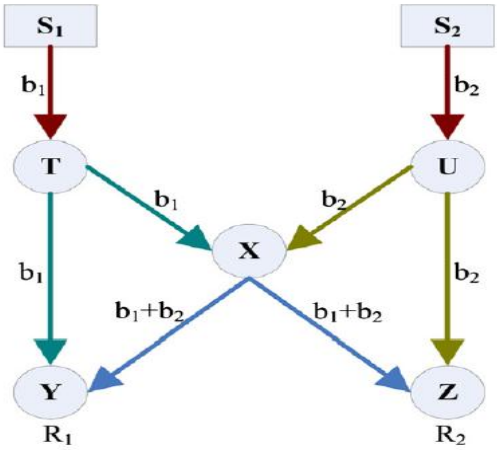
[1] Against wiretapping
[2] Decode

۲-۶ مدل سیستم مخابراتی بی‌سیم و کدینگ شبکه

حتی اگر شبکه‌های بی‌سیم دارای توان پایین باشند، پیامدهای کدینگ شبکه اساسا توان عملیاتی شبکه‌های بی‌سیم چندگامی[1] را بوسیله‌ی بهره‌برداری از طبیعت پخش کانال بی‌سیم بهبود می‌بخشد. مدل سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم کدینگ شبکه را برای بهبود توان شبکه‌های بی‌سیم با جلسه‌های چندپخشی یا چندین تک‌پخشی بهبود می‌بخشد. Wu و همکارانش در سال ۲۰۰۴، Fragouli و همکارانش در سال ۲۰۰۷، Ho و همکارانش در سال ۲۰۰۶[۱۰]، [۱۱]، [۱۲] از این مدل‌ها بهره‌برداری کردند.

(۱) ارسال‌های چندپخشی شبکه‌ی بی‌سیم و کدینگ شبکه: مدل این سیستم شامل تعدادی از گره‌ها و پیوندهایی است که متناظر با یک جفت از گره در رنج مخابراتی است. برای درک مفاهیم کدینگ شبکه در شبکه‌های بی‌سیم، فرض می‌کنیم ویژگی‌های خاصی در ارتباط با شبکه‌های بی‌سیم داریم. برای مثال شکل ۲-۴ را در نظر بگیرید. فرض می‌کنیم محور زمان به شکاف[2] زمانی تقسیم می‌شود، منابع S_1, S_2، ۲ بسته‌ی b_1, b_2 را در شکاف زمانی ۱ منتشر می‌کنند. با دریافت b_1, b_2 گره‌های T,U دوباره آنها را منتشر می‌کنند. گره‌های X,Y (در رنج مخابراتی T)بسته b_1 را در شکاف زمانی ۲ و گره‌های X,Z (در رنج ارسالی U) بسته b_2 را در شکاف زمانی ۳ دریافت می‌کنند.

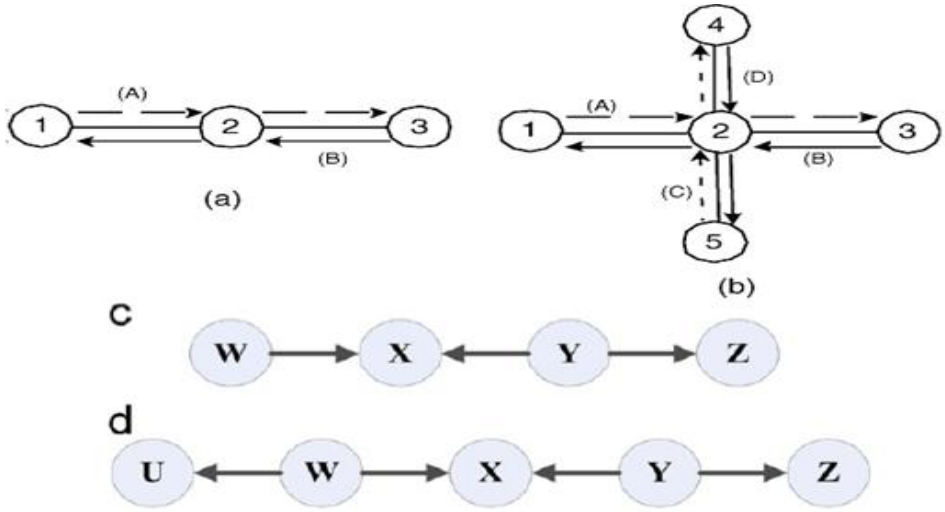
با استفاده از عمل XOR در بسته b_1, b_2، گره X بسته جدید $b_3 = b_1 XOR b_2$ را تولید و به گره‌های Y,Z منتشر می‌کند. گره‌های Y,Z از قبل بسته‌های محلی[3] (b_1 ازT و b_2 از U) را ذخیره کرده‌اند. در نتیجه بسته b_2 از گره Y و بسته b_1 از گره Z می‌تواند بدست آید.



شکل ۲-۴: شکلی از شبکه کدینگ شبکه بی‌سیم ارسال چندپخشی[۹]

[1] Multi-hop
[2] slot
[3] Native packet

(۲) ارسال‌های تکی چندگانه شبکه بی‌سیم و کدینگ شبکه: Zhang و Su در سال ۲۰۰۹، Yan و همکارانش در سال ۲۰۱۰[۱۳]، [۱۴] از این طرح بهره‌برداری کرده‌اند. در شکل ۲-۵(a) در صورتی که کدینگ شبکه وجود نداشته باشد نیاز به ۴ ارسال داریم تا بسته A از گره ۱ به گره ۳ و بسته B از گره ۳ به گره ۱ ارسال شود. زمانی که بسته‌ها از گره ۱ و ۳ به گره ۲ ارسال می‌شوند اگر فرصت کدینگ وجود داشته باشد بسته‌های A,B در گره ۲ کد می‌شوند و به صورت $A \oplus B$ به گره‌های ۱و۳ فرستاده می‌شود، در این صورت تعداد ارسال‌ها به ۳ کاهش خواهد یافت. در شکل ۲-۵(b) در غیاب کدینگ شبکه ۸ ارسال نیاز داریم که بسته‌ها به گره‌های مقصد برسند و در صورتی که کدینگ شبکه وجود داشته باشد چون همه بسته‌ها ابتدا به گره ۲ فرستاده می‌شود در آنجا XOR شده و سپس به گره‌های مقصد ارسال می‌شوند، در این صورت تعداد ارسال‌ها ۵ تا خواهد بود. ترکیبی از پیوندهای کدینگ شبکه می‌تواند به عنوان مجموعه‌ای از پیوندهایی تعریف شود که در مجموع درگیر عملیات کدینگ شبکه هستند و وجود چنین پیوندهایی وابسته به مسیریاب‌ها از جلسات متنوع است.



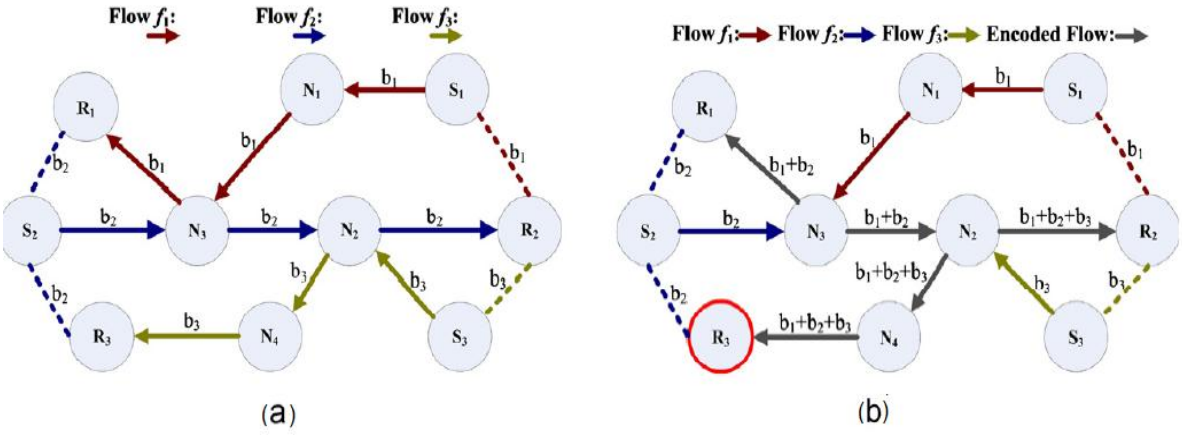
شکل ۲-۵: مثالی از کدینگ شبکه بی‌سیم در ارسال تکی و چندپخشی[۵۶]، [۵۴]

سناریوهای کدینگ شبکه می‌توانند بوسیله‌ی ترکیب پیوندهای کدینگ شبکه‌ی ورودی و خروجی نشان داده‌شوند. که در شکل ۲-۵(c) نشان داده شده‌است. از سوی دیگر شکل ۲-۵(d) شامل ترکیب دو پیوند کدینگ شبکه خروجی و ترکیب یک پیوند کدینگ شبکه ورودی است.گره w بسته‌ها را به u و x پخش می‌کند، اما گره‌های x و z ارسال‌های پخش شده را از گره y دریافت می‌کنند.گره x فقط مسئول دریافت بسته‌ها به‌طور همزمان از گره‌های wو y است و همچنین عملیات کدینگ شبکه ورودی در آن نشان داده می-شود.

(۳) مسائل و چالش‌های طرح کدینگ شبکه:از ساختار کدینگ توسعه‌یافته از شکل‌های ۲-۶(a),(b) و در شبکه‌های واقعی می‌توان متوجه‌شد که گوش‌دادن فرصت طلبانه[1] و کدگشایی می‌تواند چندین گام دورتر از یک گره ذخیره رخ دهد. علاوه‌براین، جریان بسته‌های مختلف به چندین جریان دیگر در چند گره میانی بین منبع و مقصد تقسیم می‌شود. برای رسیدگی به موضوع مربوط به شرایط کدینگ و تعداد بسته‌های کدشدهGeo وهمکارانش در سال ۲۰۱۰، Le و همکارانش در سال ۲۰۰۸[۱۵]، [۱۶] عملکرد طرح‌های کدینگ عملی را برای تخمین تعداد بسته‌هایی که می‌توانند کد شوند آنالیز کرده‌اند. همچنین آن‌ها شرایط تولید شده‌ای را بگونه‌ای تعریف می‌کنند که به‌اندازه‌ی کافی نکات کدینگ واقعی را در شبکه‌ی بی‌سیم شناسایی می‌کند و در نهایت، سازگاری و قابل دسترس بودن را در اختیار می‌گیرد.

سازگاری، کدینگ را بدون اثر جریان‌های دیگر تضمین می‌کند و قابلیت اطمینان کدینگ بسته‌های کد شده را در گره مقصد گارانتی می‌کند.

شکل ۲-۶(a) را بررسی می‌کنیم که شامل ۳ منبع (S_3, S_2, S_1) و ۳ گیرنده (R_3, R_2, R_1) است.۳ جریان مسیریابی f_1, f_2, f_3 از $S_1 \to R_1$ ، $S_2 \to R_2$، $S_3 \to R_3$ عبور داده می‌شوند. گیرنده R_2 قادراست ارسال-هایی از S_3, S_1 را بشنود و گیرنده‌های R_1, R_3 می‌توانند ارسال‌های گره S_2 را بشنوند. گره‌های N_1, N_2, N_3, N_4 گره‌های میانی هستند که برطبق این شرایط از جریان‌ها N_3, N_2 گره‌های کدینگ هستند. N_3 می‌تواند بسته‌های اطلاعاتی (b_1, b_2) را از جریان f_1, f_2کد کند و گره N_2 قادر به کدکردن بسته‌های کد شده از گره N_3 و بسته اطلاعاتی از گره S_3 است که در شکل ۲-۶(b) نشان داده شده است. اما گره N_2 گره کدینگ واقعی نیست زیرا گیرنده R_3 قادر به جداسازی b_3 از بسته‌ی کدشده $b_2 \oplus b2 \oplus b3$ نیست.



شکل ۲-۶ : مثالی برای اثر گره کدینگ ساختگی[۵۶]

تا به امروز، پروتکل‌های مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه‌ی[2] قابل دسترس درشبکه‌های بی‌سیم چند گامی فقط مسیرها را از لحاظ فرصت‌های امکان کدینگ و غیر ممکن کدینگ مورد بررسی قرار داده‌اند. آگاهی از

[1]Opportunistic listenning
[2]Network coding aware routing

کدینگ ساختگی و جزئی بین جریان‌های مختلف، بیشتر می‌تواند توان عملیاتی شبکه را بهبود ببخشد. برای محدودیت اثرات منفی در جریان‌های دیگر شبکه، و تخمین تعداد بسته‌هایی که می‌توانند بوسیله‌ی گره کدینگ در هر ارسال کد شوند، ضروری است که پروتکل‌های مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه که حامی کدینگ بین جریان‌های مختلف است را توسعه دهیم. از لحاظ مسیریابی، تمام پتانسیل همراه با کدینگ شبکه می‌تواند همراه با آگاهی واقعی برای جریان‌های مختلف درون توپولوژی شبکه بدست آید.

۲-۷ مسیریابی و کدینگ شبکه در شبکه‌های ad hoc بی‌سیم چند گامی

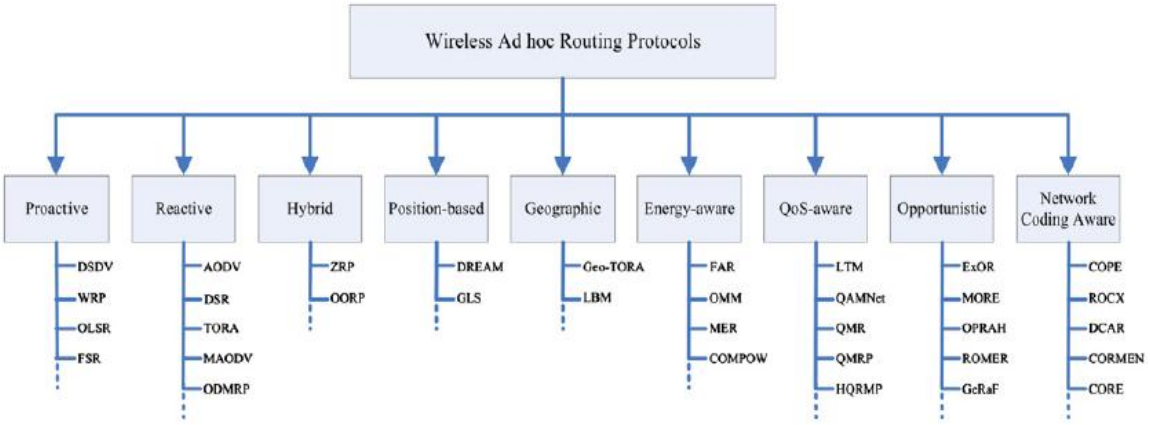
به‌طور کلی، مسیریابی به جریان بسته‌های اطلاعاتی از گره منبع به گره مقصد اشاره می‌کند،که در آن گره میانی به‌سادگی ارسال را تکرار می‌کند و بدون اینکه هیچ پردازشی روی بسته‌های دریافتی انجام دهد آن‌ها را ارسال می‌کند. سپس، هر گره قادر به ایجاد چندین کپی از بسته‌های دریافتی و ارسال آن به مسیرهای مختلف است. در مقابل،کدینگ شبکه اجازه می‌دهد که هر گره عملیات را انجام دهد. بطور مثال ترکیب خطی بسته‌های اطلاعاتی دریافتی قبل از ارسال توسط خطوط ارسال مختلف انجام می‌شود. مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه حالت خاصی از کدینگ شبکه است.

در شبکه‌های ad hoc بی‌سیم، برای هر دو جلسه‌های[1] چندپخشی و تک‌پخشی، مسیریابی می‌تواند در راه‌های مختلف طبقه‌بندی شود. شکل ۲-۷ طبقه‌بندی پروتکل‌های مسیریابی ad hoc بی‌سیم مربوط به جلسات چندپخشی و تک پخشی را نشان می‌دهد. براین اساس به‌طور منظم و یا بر اساس روش‌های مورد تقاضا برای بدست آوردن اطلاعات مسیر، پروتکل‌های مسیریابی ad hoc بی‌سیم رابه صورت فعال[2]، انغعالی/مورد تقاضا[3]، و پروتکل‌های مسیریابی ترکیبی(Abolhasan و همکارانش در سال ۲۰۰۴، و Royer و Toh در سال ۱۹۹۹)[۱۷]، [۱۸] طبقه‌بندی می‌کنند. براساس موقعیت[4](Mauve و همکارانش در سال ۲۰۰۱)[۱۹] و جغرافیایی[5](Karp در سال ۲۰۰۰)[۲۰] پروتکل‌های مسیریابی نیاز به دسترس بودن اطلاعات مربوط به محل گره‌ها دارند که در آن تصمیم‌گیری برای ارسال گرفته می‌شود. مسیریابی آگاه به انرژی(Yu و همکارانش در سال ۲۰۰۳، Akkaya و Younis در سال ۲۰۰۵)[۲۱]، [۲۲] براساس مسیریابی بسته‌های اطلاعاتی در مسیر طبقه‌بندی می‌شود که مقدار حداقل انرژی را برای انتقال بسته‌ها از منبع به مقصد مصرف می‌کند. همچنین به اطلاعاتی درباره‌ی هزینه‌ی هر پیوند از لحاظ انرژی بسته‌های اطلاعاتی دریافتی و انتقالی روی پیوندها نیاز دارد. تکنیک مسیریابی آگاه به کیفیت سرویس[6](Asokan در سال ۲۰۱۰، Hashim و همکارانش در سال ۲۰۰۸)[۲۳]، [۲۴] بر اساس تعامل بین پروتکل‌های مسیریابی و مکانیزم تامین کیفیت سرویس است. مسیریابی فرصت‌طلب(Biswas و Morris در سال ۲۰۰۴، Liu و همکارانش در سال ۲۰۰۹)[۲۵]، [۲۶] اجازه می‌دهد گره‌های میانی برای انتقال بسته به سمت مقصد در همان زمان با برخورد با شرایط خاص همکاری داشته باشند، درحالی‌که رویکرد مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه دسترس‌پذیری به فرصت‌های

---

[1] Session
[2] Proactive
[3] Reactive/on-demand
[4] Position
[5] Geographical
[6] Qos-aware

کدینگ شبکه را در مدت انتخاب مسیر برای ارسال اطلاعات به حساب می‌آورد. در اینجا فقط به بررسی طراحی و ویژگی‌هایی از مسیریابی فرصت‌طلب و جزئیاتی از ضروریات پروتکل‌های مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه می‌پردازیم.



شکل ۲-۷: طبقه‌بندی پروتکل‌های مسیریابی برای شبکه‌های ad hoc بی‌سیم[۵۶]

۲-۸ مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه و فرصت‌طلب در شبکه‌های بی‌سیم

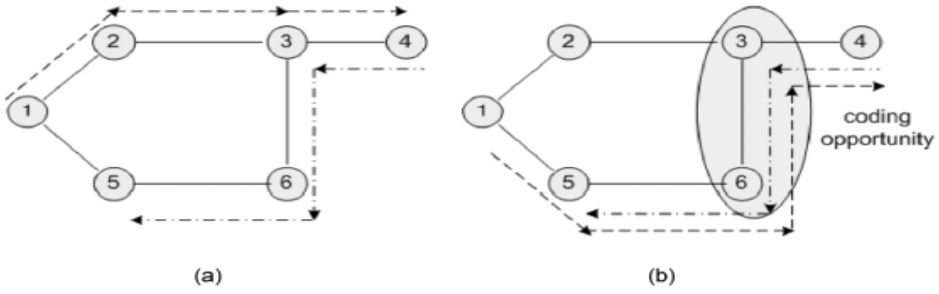
بلافاصله بعد از پیدایش کدینگ شبکه، محققان متوجه شدند که ترکیبی از کدینگ شبکه و انتخاب مسیر درون شبکه‌های بی‌سیم عملکرد شبکه‌های بی‌سیم را بیشتر بهبود می‌بخشد. با این حال، قبل از اقدام به مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه و پروتکل‌های مسیریابی مربوطه، بحث مختصری درباره‌ی مسیریابی فرصت‌طلب و پروتکل‌های مربوطه به‌عنوان انگیزه‌ی اصلی در تکنیک‌های مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه فعال و غیر فعال ضروری است.

۲-۸-۱ مسیریابی آگاه به کدینگ (و آگاه به تداخل[1])

در کارهای پیشین نشان داده شده‌است که پروتکل مسیریابی بی‌سیم برای عملکرد بهتر به آگاه بودن به تداخل (و پیوند با کیفیت) نیازدارند. یک فرصت جدید برای کدینگ شبکه در زمینه انتخاب مسیر با استفاده از مثال ساده‌ی شکل۲-۸ارائه می‌دهیم. این مثال دو مسیر را نشان می‌دهد، یکی از گره ۱ به گره۴ و دیگری ازگره ۴ به گره۵. نرخ پیوند انتقال و مقدار هر جریان واحد درنظرگرفته می‌شود. سناریویی را که در آن هیچ اتلافی در پیوند بی‌سیم وجود ندارد فرض می‌کنیم. شکل ۲-۸(a) بهترین مسیر رابرای دو جریان در غیاب کدینگ شبکه نشان می‌دهد. و دارای کوتاه‌ترین تداخل مسیری برای جریان‌ها هستند که دارای توان خروجی انتها-به-انتهای ۰/۲۵ است. حال اگر گره‌ها اجازه داشته باشند که کدینگ شبکه را انجام دهند، خروجی چنین جریان‌هایی با انتخاب مسیرهایی برای دو جریان در شکل ۲-۸(b) می‌تواند بهبود یابد. توجه کنید که چنین انتخابی اشتراک مسیر دو جریان رابرای افزایش فرصت کدینگ افزایش می‌دهد. با استفاده از تکنیک‌های توسعه یافته، نشان داده می‌شود که مسیریابی جریان‌ها در شکل

[1] Interference-Aware

۲-۸(b) دارای بازده خروجی ۰/۳۳۲۵ است که دارای افزایش ۳۳٪ بازده درمقایسه با حالت قبل شده است. به وضوح یک مصالحه‌ای بین انتخاب مسیریابی که تسهیل بیشتری برای کدینگ از یک جهت و از جهت دیگر تداخل کمتر است انجام می‌شود. در نتیجه، یک روش سیستماتیک برای انتخاب مسیریابی برای بهینه کردن مصالحه بین کشمکش اثرات افزایش فرصت کدینگ و افزایش تداخل بی‌سیمی ارائه شده‌است.



شکل ۲-۸:(a) مسیریابی بدون توجه به کدینگ، (b) مسیریابی آگاه به کدینگ[۵۴]

۲-۹ مسیریابی در شبکه‌های بی‌سیم مبتنی بر کدینگ شبکه و آگاه به کدینگ شبکه

کلاس خاصی از مسیریابی، مسیریابی بر اساس کدینگ شبکه است که به طور اساسی با مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه تفاوت دارد. مسیریابی آگاه به کدینگ شبکه تکنیک‌هایی را برای دسترسی به فرصت‌های کدینگ شبکه در انتخاب مسیر درطول شبکه برای ارسال بسته بدست می‌آورد.

ترکیب بسته‌های اطلاعاتی از جریان‌های متفاوت در طول مسیر با فرصت کدینگ، توان عملیاتی شبکه را بهبود می‌بخشد. پروتکل‌های MORE(Chachulski و همکارانش، ۲۰۰۷)[۲۷]، NC-RMR(Yang و همکارانش، ۲۰۱۰)[۲۸]، CCACK(Koutsonikolas و همکارانش، ۲۰۱۰)[۲۹]، PipelineOR(Lin وهمکارانش، ۲۰۱۰)[۳۰]، و OMNC(Zhang و Li، ۲۰۰۹)[۳۱] مربوط‌به مسیریابی بر اساس کدینگ شبکه هستند و با استفاده از کدینگ شبکه انتقال اطلاعات اضافی که منجر به کاهش مصرف انرژی در شبکه‌های ad hoc بی‌سیم می‌شود را کاهش می‌دهند.

۲-۱۰ مسیریابی فرصت‌طلب

۲-۱۰-۱ مفهوم

مسیریابی فرصت‌طلب به‌طور قابل توجهی با مسیریابی معمولی متفاوت است. در مسیریابی معمولی،گام بعدی[1]که بطور ثابت انتخاب می‌شود مسئول ارسال بسته‌های اطلاعاتی است. مسیریابی معمولی برای طبیعت فعال محیط‌های شبکه‌ی ad hoc بی‌سیم که در آن شکست‌های انتقال بسیار بالاست مناسب نیست. در مسیریابی فرصت‌طلب، چندین همسایه می‌توانند گره ارسال را بشنوند. بعد از دریافت بسته‌ی اطلاعاتی، هرمجموعه‌ی انتخاب شده‌ای از همسایه‌های فرستنده می‌تواند ارسال بسته‌های بیشتر را به سمت مقصد خود با فرض شرایط خاص ادامه دهد.

[1]Nexthaop

بوسیله‌ی بهره‌برداری ازطبیعت پخش واسط بی‌سیم، مسیریابی فرصت‌طلب قابلیت اطمینان ارسال را افزایش می‌دهد و درنهایت توان عملیاتی شبکه روی مسیریابی معمولی بهبود می‌یابد.

۲-۱۰-۲ ویژگی‌های جزئی

مسیریابی فرصت‌طلب به‌طور اساسی شامل دو جز اصلی است(انتخاب مجموعه‌ی ارسالی از گره‌های همسایه‌ی فرستنده و تنظیم الویت درمیان گره‌ها در یک مجموعه‌ی فرستنده‌ی انتخاب شده)که در نهایت از تکرار شدن بسته-ها جلوگیری می‌کند. انتخاب مجموعه‌ی فرستنده می‌تواند بصورت مجموعه‌ی فرستنده‌ی انتها به انتها(که در آن مجموعه‌ی فرستنده یکبار برای همه تعیین می‌شود)یا انتخاب مجموعه‌ی فرستنده گام به گام(که در آن هر یک از بسته‌های گره‌های موجود مسئول تعیین مجموعه‌ی فرستنده خود به سمت مقصد مورد نظر است)باشد. الویت‌بندی مبتنی بر معیار مسافت–جغرافیایی، مقدار گام، ارسال هر مسیر مورد انتظار[۱] و مقدار ارسال مورد انتظار[۲] است.

۲-۱۰-۳ طبقه‌بندی و پروتکل‌های وابسته

بر اساس طبقه‌بندی تعریف شده از مسیریابی فرصت‌طلب[۳](براساس انتخاب مجموعه‌ی فرستنده، الویت‌بندی معیارها، هماهنگی توزیع برای الویت، و یکپارچگی روش کدینگ)تعدادی از پروتکل‌های مسیریابی فرصت‌طلب توسعه داده شده‌است(Liu و همکارانش، ۲۰۰۹)[۲۶]. معیارهای فرصت‌طلب متنوع هستند، پروتکل‌های مسیریابی فرصت‌طلب مربوطه در شکل ۲-۹ لیست شده‌اند.

پروتکل مسیریابی فرصت‌طلب (Biswas و Morris در سال ۲۰۰۵)[۳۲] پروتکلی مبتنی بر مقدار ارسال مورد انتظار است که شامل مفهوم فرصت‌طلب است. معیار مقدار ارسال مورد انتظار به صورت زیر اندازه‌گیری می‌شود.

$$ETX=\frac{1}{P_{rdr}\times P_{fdr}} \qquad (۱-۲)$$

که در آن P_{fdr} نسبت تحویل ارسال بسته است و P_{rdr} نسبت پذیرش بسته است. شکل ۲-۹ پروتکل‌های مسیریابی فرصت‌طلب را به ترتیب زمانی و ارتباط با مقوله‌های خاص به‌خوبی نشان می‌دهد.

[1]Expected any-path transmission (EAX)
[2] Expected transmission count (ETX)
[3]Opportunistic routing