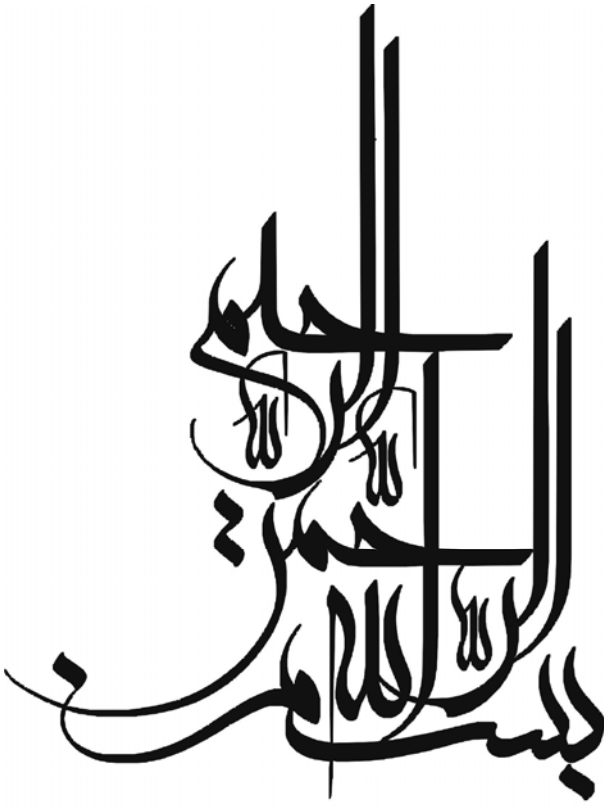

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه کارشناسی ارشد
مخابرات سیستم

بررسی عملکرد کدینگ شبکه در شبکه‌های بی‌سیم اقتضایی

دانشجو:
سید احمد سید علی خانی
۸۵۶۷۲۱۰۳۰

استاد راهنما:
دکتر احمد رضا شرافت

بهار ۸۸

چکیده

کدینگ شبکه روشی برای ارسال داده‌ها است که در آن گره‌ها به منظور افزایش برون‌دهی شبکه اطلاعات را ترکیب و سپس ارسال می‌کنند. در این پـایان‌نامه یک پروتکل انتشار چندپخشی با بـهره‌گیری از کدینگ شبکه در شبکه‌های اقتضایی ارائه می‌کنیم. این پروتکل شامل دو مرحله است. در مرحله اول، ساختار انتشار چندپخشی با تعیین گره‌های مؤثر در انتشار شکل می‌گیرد و بردارهای کدینگ نیز در گره‌های مؤثر تعیین می‌شوند. در مرحله دوم، اطلاعات با استفاده از کدینگ شبکه ارسال می‌شوند. در گره‌های مؤثر شبکه، کدینگ برای تولید بسته‌های کدشده و دیکدینگ برای بازیابی فریم‌های اطلاعات انجام می‌شود. اگر بردارهای کدینگ برای گره‌های مختلف از هم مستقل خطی باشند، گره ذیربط می‌تواند فریم‌های اطلاعات را با دیکدینگ بازیابی کند. در مرحله اول پروتکل، بردارهای کدینگ به گونه ای تعیین می‌شوند که استقلال خطی آنها در تمام گره‌های مؤثر تضمین شود. چون توپولوژی شبکه اقتضایی به واسطه حرکت گره‌ها متغیر با زمان است، لازم است ساختار انتشار چندپخشی و بردارهای کدینگ نیز با زمان تغییر کنند. در روش پیاده‌سازی شده، این تغییرات به صورت متناوب و در مقاطع زمانی کوتاه صورت می‌گیرد تا پیوستگی ساختار انتشار در شبکه حفظ شود و حرکت گره‌ها مانع ارسال اطلاعات نشود. تحرک گره‌ها در شبکه اقتضایی ممکن است ارتباط برخی از گره‌های مقصد را از ساختار انتشار چندپخشی قطع کند. این قطع ارتباط دائمی نیست و به دلیل حرکت گره‌ها در شبکه، گره‌های مقصد دورافتاده، می‌توانند از طریق برقراری ارتباط با گره‌های واسط دوباره به ساختار انتشار چندپخشی متصل شوند. ما از این ارتـباط مجدد برای دریافت بـسته‌های از دست رفته در گـــره‌های مقصد استفاده مـی‌کنیم. راهـکاری که برای جبران تلفات بـسته‌ها در گره‌های مقصد ارائه می‌شود نسبت دریافت بسته را در آنها افزایش می‌دهد. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که پروتکل پیشنهادی در این پایان‌نامه در مقایسه با پروتکل [۹] موجب کاهش میانگین انرژی مصرفی گره‌ها به میزان ۳۴ درصد، کاهش میانگین تأخیر سراسری در شبکه به میزان ۵۵ درصد و افزایش نسبت دریافت بسته به میزان ۳۸ درصد می‌گردد. ایـن بهبود با هـزینه افزایش بالاسری (یعنی تعداد بسته های کنترلی) به میزان ۲۹ درصد حـاصل می‌گردد. طول بسته‌های کنترلی به مراتب از طول بسته‌های اطلاعات کمتر است، به طوریکه افزایش تعداد آنها در پروتکل پیشنهادی نه تنها به افزایش میزان انرژی مصرفی و تأخیر نمی‌انجامد، بلکه به ارسال بسته‌های اطلاعات با طول زیاد کمک کرده و بازدهی کلی و تأخیر در شبکه را بهبود می‌بخشد.

کلید واژه: انتشار چندپخشی، بردارهای کدینگ مستقل خطی، شبکه اقتضایی، کدینگ شبکه

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فهرست مطالب ..... أ
فهرست شکل‌ها ..... ج
فهرست جدول‌ها ..... ه
اختصارات ..... و

فصل اول: مقدمه ۱
۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- ظرفیت انتشار ۳
۱-۲-۱- مقایسه کدینگ شبکه و مسیریابی در چند شبکه ساده ۵
۱-۳- ریاضیات کدینگ شبکه ۸
۱-۳-۱- عملیات کدینگ ۹
۱-۳-۲- عملیات دیکدینگ ۹
۱-۴- مثالی از پیاده‌سازی کدینگ شبکه ۱۰

فصل دوم: مدل شبکه اقتضایی ۱۳
۲-۱- شبکه‌های اقتضایی ۱۴
۲-۲- مدل شبکه اقتضایی ۱۴
۲-۳- انتشار چندپخشی در شبکه اقتضایی ۱۶
۲-۴- مدل حرکت در شبکه اقتضایی ۱۷
۲-۴-۱- مدل حرکت Random Waypoint ۱۷

فصل سوم: ابزارهای شبیه‌سازی در شبکه‌های اقتضایی ۱۹
۳-۱- شبیه‌سازهای شبکه اقتضایی ۲۰
۳-۲- مطالعه نرم‌افزار شبیه‌ساز OPNET در زمینه شبیه‌سازی شبکه‌های اقتضایی ۲۱
۳-۳- استفاده از زبان برنامه‌نویسی Delphi 7 برای شبیه‌سازی ۲۳
۳-۴- نمایش گره‌ها و نمایش موقعیت آنها هنگام حرکت در شبکه ۲۴
۳-۵- به هنگام کردن وضعیت شبکه ۲۵
۳-۶- انجام عملیات در زمان‌های خاص ۲۵
۳-۷- زیربرنامه‌ها ۲۶

فصل چهارم: روشی برای انتشار چند پخشی در شبکه اقتضایی با استفاده از کدینگ شبکه ۲۸
۴-۱- انتشار چندپخشی در شبکه اقتضایی با استفاده از کدینگ شبکه ۲۹
۴-۲- مرحله اول: تشکیل ساختار انتشار چندپخشی و تعیین بردارهای کدینگ ۳۰
۴-۲-۱- گام اول: تعیین گره‌های بالادستی، گره‌های پایین‌دستی و گره‌های مؤثر در انتشار ۳۱
۴-۲-۲- گام دوم: تعیین تعداد بسته‌های ارسالی، بردارهای کدینگ و گره‌های مؤثر نهایی ۳۴
۴-۳- مرحله دوم: ارسال اطلاعات با استفاده از کدینگ شبکه ۴۲
۴-۴- ارائه روشی برای جبران تلفات بسته‌ها در شبکه ۴۳

فصل پنجم: عملکرد پروتکل پیشنهادی ۴۸
۵-۱- شرح وضعیت شبیه‌سازی در مقایسه پروتکل پیشنهادی با پروتکل [۹] ۵۲
۵-۲- مدل‌سازی انرژی مصرفی در شبکه اقتضایی ۵۴
۵-۲-۱- مقایسه دو روش در میانگین انرژی مصرفی ۵۶
۵-۳- میانگین تأخیر سراسری ۵۷
۵-۳-۱- مقایسه دو روش در میانگین تأخیر سراسری ۵۷
۵-۴- نسبت دریافت بسته ۵۸
۵-۴-۱- مقایسه دو روش در نسبت دریافت بسته ۵۸
۵-۵- بالاسری ۵۹
۵-۵-۱- مقایسه بالاسری دو روش ۶۱
۵-۶- جمع‌بندی نتایج ۶۲
۵-۷- نتیجه‌گیری ۶۳
۵-۸- پیشنهادهایی برای ادامه کار ۶۴

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل ۱-۱. نمایش برش و ماکزیمم جریان در یک شبکه با مقادیر ظرفیت/جریان روی کانال‌های شبکه ۴
شکل ۱-۲. نمایش ظرفیت انتشار بر اساس قضیه Max-Flow Min-Cut در شبکه ۵
شکل ۱-۳. شبکه بی‌سیم با دو گره مبدأ و دو گره مقصد، [۱۰] ۶
شکل ۱-۴. انتشار اطلاعات در شبکه بی‌سیم با استفاده از کدینگ شبکه ۷
شکل ۱-۵. انتشار اطلاعات در شبکه بی‌سیم با استفاده از مسیریابی ۷
شکل ۱-۶. انتشار اطلاعات در یک شبکه بی‌سیم متقارن با استفاده از کدینگ شبکه ۷
شکل ۱-۷. انتشار اطلاعات در یک شبکه بی‌سیم متقارن با استفاده از مسیریابی ۷
شکل ۱-۸. رویه ارسال اطلاعات در کدینگ شبکه ۸
شکل ۱-۹. رویه ارسال اطلاعات در مسیریابی ۸
شکل ۱-۱۰. انتشار چندپخشی با استفاده از کدینگ شبکه ۱۰
شکل ۲-۱. نحوه ارتباط گره‌ها در شبکه اقتضایی ۱۵
شکل ۲-۲. مدل حرکت Random Waypoint ۱۸
شکل ۳-۱. نمایش لایه‌های پروتکل مخابراتی OSI در مدل گره DSR، [۱۴] ۲۲
شکل ۳-۲. نمایش گره روش مسیریابی DSR در حوزه‌های مختلف، [۱۴] ۲۲
شکل ۴-۱. بلوک دیاگرام پروتکل انتشار چندپخشی ۳۰
شکل ۴-۲. ارسال و دریافت پیام‌های N_Hop[X] برای تعیین گره‌های بالادستی ۳۲
شکل ۴-۳. ارسال و دریافت پیام‌های N_UpN[U_1-U_2-….-U_n] برای تعیین گره‌های پایین‌دستی ۳۳
شکل ۴-۴. ارسال پیام Eff برای تعیین گره‌های مؤثر در انتشار ۳۴
شکل ۴-۵. تشکیل ساختار انتشار ۳۴
شکل ۴-۶. تعیین تعداد بسته‌های ارسالی در شبکه ۳۵
شکل ۴-۷. تعیین بردارهای کدینگ به منظور ایجاد ماتریس‌های کدینگ مستقل خطی در گره‌ها ۳۶
شکل ۴-۸. تعیین تعداد بسته‌های ارسالی ۳۷
شکل ۴-۹. ارسال پیام Eff1 برای شناسایی گره‌های مؤثر نهایی ۳۷
شکل ۴-۱۰. ساختار انتشار پس از تعیین گره‌های مؤثر نهایی ۳۸
شکل ۴-۱۱. تعیین گره‌های مؤثر در گام اول ۳۹
شکل ۴-۱۲. تعیین گره‌های مؤثر نهایی در گام دوم ۴۰
شکل ۴-۱۳. جدایی یک گره مقصد از ساختار انتشار چندپخشی ۴۵
شکل ۴-۱۴. ارسال پیام PRQ به گره مبدأ و دریافت بسته‌های از دست رفته ۴۶
شکل ۵-۱. نمایش چگونگی استفاده از گره‌ها برای انتشار اطلاعات در پروتکل پیشنهادی ۵۰
شکل ۵-۲. نمایش چگونگی استفاده از گره‌ها برای انتشار اطلاعات در پروتکل [۹] ۵۱
شکل ۵-۳. نمودار میانگین انرژی مصرفی ۵۶
شکل ۵-۴. نمودار میانگین تأخیر سراسری ۵۷

شکل ۵-۵. نمودار نسبت دریافت بسته ۵۸
شکل ۵-۶. نمودار بالاسری بسته ۶۰
شکل ۵-۷. نمودار بالاسری پیام ۶۰
شکل ۵-۸. نمودار بالاسری نرمالیزه شده کل ۶۱

فهرست جدول‌ها

عنوان صفحه

جدول ۲-۱. شماره و نماد گره‌های شبکه اقتضایی در انتشار چندپخشی ۱۷
جدول ۳-۱. درصد استفاده از شبیه‌سازهای شبکه، [۱۳] ۲۱
جدول ۴-۱. بردارهای کدینگ مربوط به ساختار انتشار چندپخشی در شکل (۴-۱۲).....۴۱
جدول ۵-۱. نوع و طول اطلاعات در پروتکل [۹] و پروتکل پیشنهادی.....۵۳
جدول ۵-۲. مقدار عددی توان مصرفی بر حسب میزان جریان مصرفی کارت بی سیم CISCO IEEE 802.11 a/b/g، [۱۹].....۵۵
جدول ۵-۳. تشریح تفاوت‌های پروتکل پیشنهادی و پروتکل [۹].....۶۲
جدول ۵-۴. نتایج شبیه‌سازی در مقایسه پروتکل پیشنهادی با پروتکل [۹].....۶۲

اختصارات

AODV	Ad hoc On-Demand Distance Vector
DSR	Dynamic Source Routing
GUI	Graphic User Interface
MAC	Medium Access Control
MANET	Mobile Ad hoc Network
ODMRP	On-Demand Multicast Routing Protocol
OSI	Open Systems Interconnection
PDR	Packet Delivery Ratio

فصل اول:

مقدمه

۱-۱- مقدمه

کدینگ شبکه روشی برای ارسال داده‌ها با هدف افزایش برون‌دهی شبکه است که بر اثر آن در گره‌های واسط، داده‌های ارسالی به صورت خطی با هم ترکیب شده و ارسال می‌شوند. مبانی نظری مربوط به ظرفیت شبکه در تئوری گراف و مباحث جریان‌های شبکه[1] مطرح شده‌اند [۱] و [۲]. برای اولین بار در [۳] مزیت استفاده از کدینگ شبکه برای انتشار چندپخشی در شبکه‌های سیمی بدون خطا مطرح شد و اثبات گردید که با آن می‌توان به حد ظرفیت انتشار دست یافت. بعد از آن در [۴] نشان داده شد که با کدینگ خطی شبکه[2] می‌توان به حد ظرفیت در شبکه‌های سیمی بدون اتلاف رسید. این نتایج در [۵] ارتقاء یافت و یک ساختار تصادفی از کدهای خطی ارائه شد. در [۶] روشی برای بهبود عملکرد شبکه‌های اقتضایی داده شده است، که در آن رویه کدینگ خطی تصادفی شبکه [3] در [۷] با روش‌های بهینه‌سازی برای انتخاب زمان و موقعیت ارسال بسته‌های کدشده در شبکه با هم در می‌آمیزند. گر چه نشان داده شده است که در برخی شبکه‌های متقارن و کوچک مثل شبکه پروانه‌ای [۳] و شبکه‌های منظم دایره‌ای و مربعی [۸] می‌توان با استفاده از کدینگ شبکه مقدار اطلاعات ارسال شده را کاهش داد و به برون‌دهی[4] بیشتری در مقایسه با مسیریابی دست یافت، اما در یک شبکه اقتضایی با ساختار انتشار تصادفی و متغیر با زمان، ارائه روش‌هایی مناسب برای افزایش ظرفیت و برون‌دهی شبکه هنوز جای کار دارند.

کدینگ شبکه، زمینه‌های تحقیقاتی گسترده و جدیدی را در شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم نیز ایجاد کرده است. در این راستا پروتکل‌هایی برای انتشار اطلاعات در شبکه‌های اقتضایی، بر مبنای استفاده از کدینگ شبکه، طراحی شده‌اند [۹]. در این پایان‌نامه یک پروتکل جدید انتشار چندپخشی در شبکه اقتضایی ارائه می‌کنیم که در آن از کدینگ شبکه برای ارسال اطلاعات استفاده می‌شود.

---

[1] Network flows
[2] Linear network coding
[3] Random linear network coding
[4] Throughput

۱-۲- ظرفیت انتشار

ظرفیت انتشار در شبکه‌های با مدل گراف با قضیه Max-Flow Min-Cut تعریف می‌شود. در [۳] کدینگ شبکه با هدف دستیابی به این ظرفیت در شبکه‌های سیمی بدون خطا مطرح شد. این شبکه‌ها با یک گراف غیرچرخشی[5] و جهت‌دار[6] $G(V,E)$ نشان داده می‌شوند که V مجموعه رأس‌های گراف شامل گره منبع، گره‌های مقصد و گره‌های میانی است و E مجموعه یال‌های گراف است. اگر u و v دو گره دلخواه در شبکه سیمی مذکور باشند، $e(u,v)$ یال و یا کانال بین این دو گره است. مقدار $c(u,v)$ ظرفیت کانال مخابراتی و $f(u,v)$ جریان کانال است. در یک شبکه سیمی با گره مبدأ s و گره مقصد t شرایط زیر را داریم [۱] و [۲]:

۱- $G=(V,E)$ یک گراف غیرچرخشی و جهت‌دار است که در آن ظرفیت یال $e(u,v)\in E$ برابر $c(u,v)>0$ است.

۲- گره مبدأ s هیچ یال وارد شونده‌ای ندارد و گره مقصد t هیچ یال خارج شونده‌ای ندارد.

۳- شرایط جریان f در شبکه عبارتند از:

الف) قید ظرفیت[7]: $f(u,v)\le c(u,v),\ \forall u,v\in V$ ،

ب) تقارن وارونی[8]: $f(u,v)=-f(v,u),\ \forall u,v\in V$ ،

پ) بقای جریان[9]: $\sum_{v\in V} f(u,v)=0,\ \forall u\in V-\{s,t\}$

مقدار جریان کانال، کمتر یا مساوی ظرفیت کانال است. برای تمام گره‌های شبکه به غیر از گره‌های منبع و مقصد، مقدار جریان‌های وارد شده به یک گره برابر مقدار جریان‌های خارج شده از آن گره است. مقدار ماکزیمم جریان، برابر با جمع جریان تمام یال‌های خارج شونده از گره مبدأ s است که برابر با جمع جریان تمام یال‌های وارد شونده به گره مقصد t است.

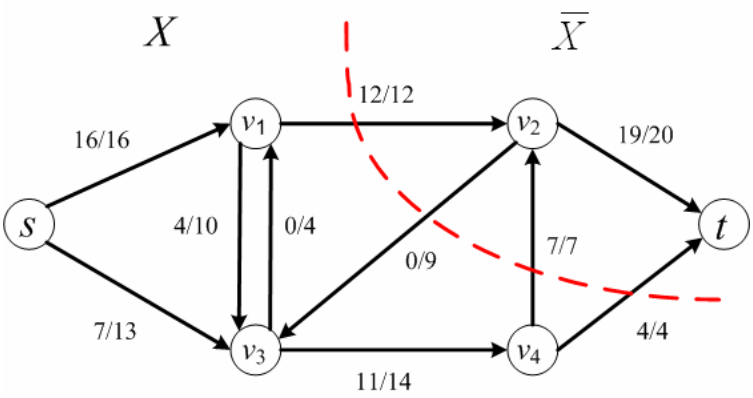
مقدار ماکزیمم جریان که با $|f|$ Max flow نشان داده می‌شود برابر است با:

---

[5] Acyclic
[6] Directed
[7] Capacity constraint
[8] Skew symmetry
[9] Flow conservation

$$\text{Max flow}\,|f| = \sum_{v\in V} f(s,v) = \sum_{v\in V} f(v,t) \qquad (۱)$$

در شکل (۱-۱) روی کانال‌های شبکه، مقدار "ظرفیت/جریان" نشان داده شده است. ماکزیمم جریان در این شبکه طبق رابطه (۱) برابر با ۲۳ است.



$$\text{Max flow}\,|f| = 16+7 = 19+4 = 23$$

شکل ۱-۱. نمایش برش و ماکزیمم جریان در یک شبکه با مقادیر ظرفیت/جریان روی کانال‌های شبکه

تعریف برش[10]: یک برش در شبکه G=(V,E)، مجموعه رئوس V را به دو مجموعه متمایز و بدون اشتراک X و $\overline{X} = V - X$ تقسیم می‌کند. در شکل (۱-۱) خط‌چین، برش $(X,\overline{X})$ را مشخص می‌کند که آن را با $cut(X,\overline{X})$ نشان می‌دهیم، و $s \in X$ و $t \in \overline{X}$ است. مجموعه X، مجموعه‌ای شامل گره مبدأ s و گره‌های v_1، v_3 و v_4 است. مجموعه $\overline{X}$، مجموعه‌ای شامل گره مقصد t و گره v_2 است.

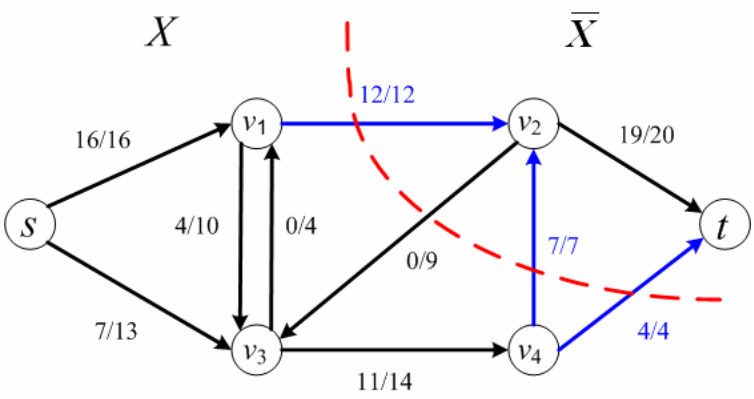
ظرفیت برش $(X,\overline{X})$ با $cap(X,\overline{X})$ نشان داده می‌شود و برابر است با:

$$cap(X,\overline{X}) = \sum_{u\in X, v\in\overline{X}} c(u,v) \qquad (۲)$$

قضیه Max-Flow Min-Cut: کمترین ظرفیت برش بین گره منبع s و گره مقصد t برابر $\text{Max flow}\,|f|$ است [۳].

در شکل (۱-۲) مقدار ظرفیت انتشار بر اساس تعریفی که در قضیه مذکور بیان گردیده، نشان داده شده است.

[10] Cut



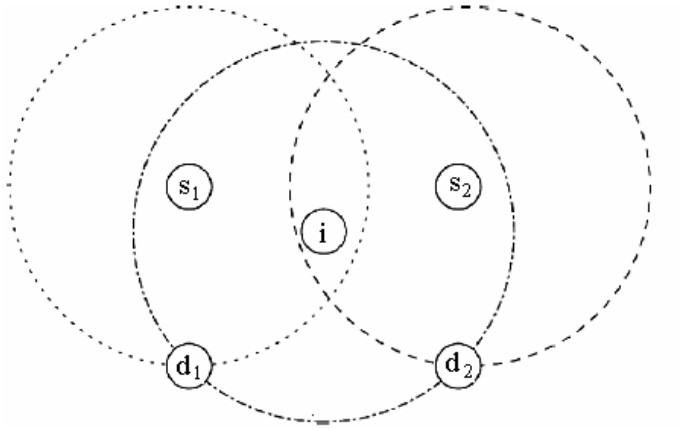
$$cap(X,\overline{X}) = 12 + 7 + 4 = 23$$
$$cap(X,\overline{X}) = \text{Max flow } |f|$$

شکل ۱-۲. نمایش ظرفیت انتشار بر اساس قضیه Max-Flow Min-Cut در شبکه

۱-۲-۱- مقایسه کدینگ شبکه و مسیریابی در چند شبکه ساده

استفاده از پخش داده‌ها در شبکه‌های بی‌سیم می‌تواند در کاهش تعداد ارسال‌ها با استفاده از کدینگ شبکه مؤثر باشد. عامل دیگر، تنوع مسیر[11] و ورود اطلاعات از جهات مختلف به گره‌های مقصد است. این عامل نیز می‌تواند در کاهش تعداد ارسال‌های مورد نیاز و افزایش برون‌دهی شبکه، هنگام استفاده از کدینگ شبکه تأثیر گذار باشد. برای مقایسه کدینگ شبکه با مسیریابی دو مثال ساده زیر را در نظر بگیرید. مثال اول، شبکه بی‌سیمی متشکل از ۵ گره را نشان می‌دهد. این شبکه که در شکل (۱-۳) نشان داده شده است، شامل دو گره مبدأ s_1 و s_2، یک گره واسط i و دو گره مقصد d_1 و d_2 است. دو بیت اطلاعات b_1 و b_2 در گره های s_1 و s_2 تولید می‌شوند و هر یک از این دو بیت می بایست به گره‌های مقصد d_1 و d_2 برسند. شعاع ارسال گره‌های s_1، s_2 و i در شکل با خطچین نشان داده شده است. ظرفیت کانال بی‌سیم شبکه شکل (۱-۳) انتقال یک بیت در واحد زمان است و گره‌ها نمی‌توانند به طور همزمان از یک کانال بی‌سیم برای ارسال اطلاعات به یک گره استفاده کنند.

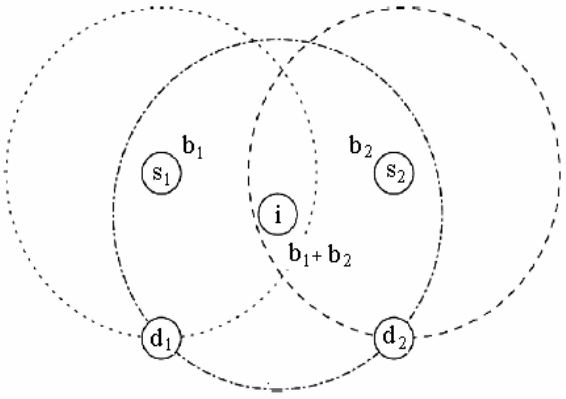
[11] Path diversity



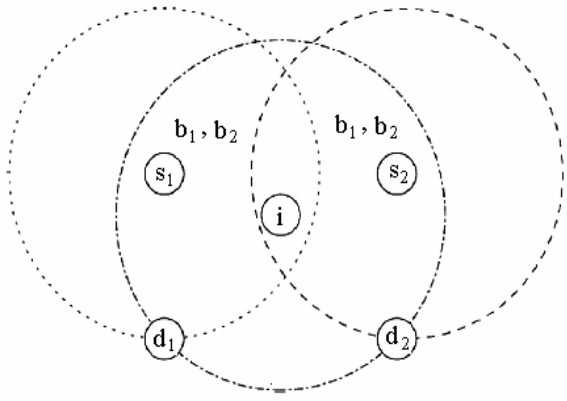
شکل ۱-۳. شبکه بی‌سیم با دو گره مبدأ و دو گره مقصد، [۱۰]

راه‌حلی که کدینگ شبکه برای افزایش میزان برون‌دهی در این شبکه معرفی می‌کند در شکل (۱-۴) نشان داده شده است. در این شکل بیت b_1 در ثانیه اول توسط گره s_1 ارسال شده و به گره‌های i و d_1 می‌رسد. بیت b_2 هم توسط گره s_2 در ثانیه دوم ارسال شده و به گره های i و d_2 می‌رسد. گره i به عنوان گره کدکننده، حاصل‌جمع بیت‌های b_1 و b_2، یعنی b_1+b_2 را در ثانیه سوم ارسال می‌کند. گره مقصد d_1 با دریافت بیت‌های b_1 و b_1+b_2، بیت b_2 را بازیابی می‌کند و گره مقصد d_2 با دریافت بیت‌های b_2 و b_1+b_2، بیت b_1 را بازیابی می‌کند. در ایـن شکل بیت‌های اطلاعات b_1 و b_2 با سه ارسال به گـره‌های مقصد می‌رسند. در شکل (۱-۵) می‌بینیم که برای ارسال اطلاعات با استفاده از مسیریابی به چهار ارسال نیاز است تا بیت‌های اطلاعات b_1 و b_2 به گره‌های مقصد برسند.

در کدینگ شبکه دو بیت، پس از سه ثانیه از دو گره مبدأ به گره مقصد می‌رسند و در مسیریابی این دو بیت، پس از چهار ثانیه از دو گره مبدأ به گره مقصد می‌رسند. بنابراین در شکل (۱-۴) با استفاده از کدینگ شبکه، برون‌دهی برابر 1/3 bit/source/sec است. در همان شبکه با استفاده از مسیریابی در شکل (۱-۵) مقدار برون‌دهی برابر 1/4 bit/source/sec است.

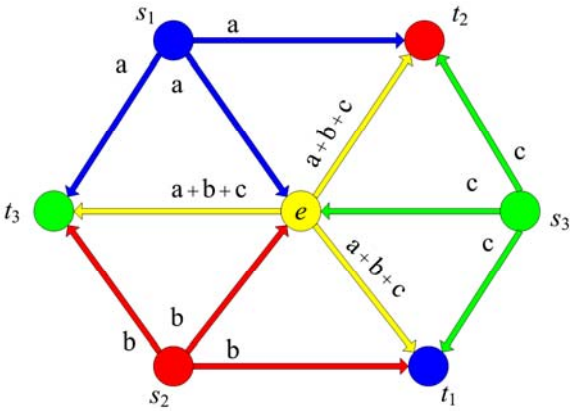


شکل ۱-۴. انتشار اطلاعات در شبکه بی‌سیم با استفاده از کدینگ شبکه

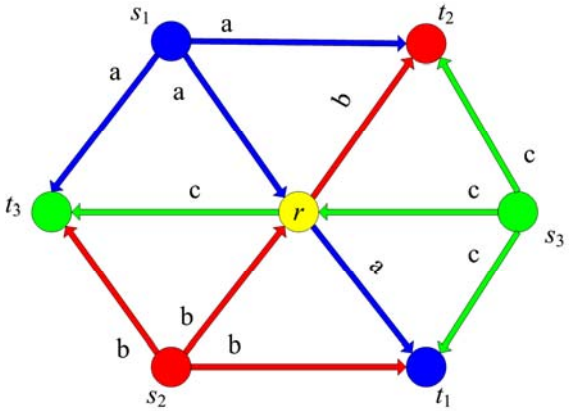


شکل ۱-۵. انتشار اطلاعات در شبکه بی‌سیم با استفاده از مسیریابی

دومین مثال، یک شبکه بی‌سیم متقارن است. بیت a در گره s_1، بیت b در گره s_2 و بیت c در گره s_3 تولید می‌شود و این سه بیت می‌بایست به هر سه گره مقصد t_1، t_2 و t_3 برسند. راهکار کدینگ شبکه در شکل (۱-۶) نشان داده شده است. در این شکل گره مرکزی، گره کدکننده است و با e نشان داده می‌شود. حرف e مخفف encoder است. در شکل (۱-۷) گرهی که در مرکز شبکه واقع شده یک گره واسط است که تنها به جابجایی اطلاعات می‌پردازد و با r نشان داده می‌شود. حرف r مخفف relay است.

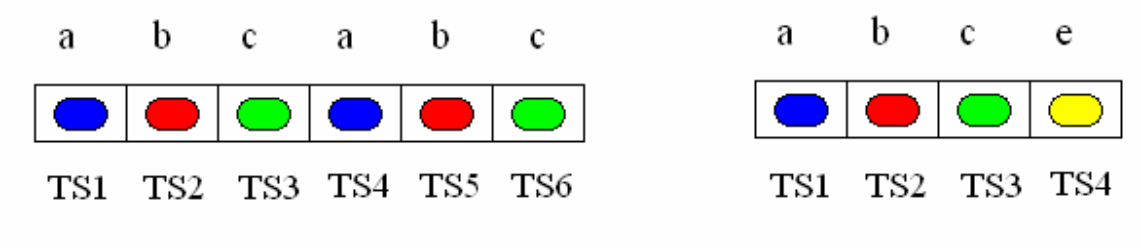


شکل ۱-۶. انتشار اطلاعات در یک شبکه بی‌سیم متقارن با استفاده از کدینگ شبکه



شکل ۱-۷. انتشار اطلاعات در یک شبکه بی‌سیم متقارن با استفاده از مسیریابی

با فرض ارسال هر بیت در یک بخش زمانی[12]، با استفاده از کدینگ شبکه، بیت‌های اطلاعات a، b و c با چهار ارسال و پس از گذشت چهار بخش زمانی از گره‌های مبدأ به گره‌های مقصد می‌رسند. در همین شبکه در صورتی که از مسیریابی استفاده شود به شش ارسال نیاز است تا این سه بیت پس از گذشت شش بخش زمانی به گره‌های مقصد برسند. شکل‌های (۱-۸) و (۱-۹) رویه ارسال اطلاعات در کدینگ شبکه و مسیریابی را نشان می‌دهند.



شکل ۱-۸. رویه ارسال اطلاعات در کدینگ شبکه

شکل ۱-۹. رویه ارسال اطلاعات در مسیریابی

در شکل (۱-۶) با استفاده از کدینگ شبکه، برون‌دهی برابر 1/4 bit/source/time slot است. در همان شبکه با استفاده از مسیریابی در شکل (۱-۷) مقدار برون‌دهی برابر 1/6 bit/source/time slot است.

۱-۳- ریاضیات کدینگ شبکه

عملیات کدینگ که در کدینگ شبکه انجام می‌شود یک کدینگ خطی ساده است که به صورت ماتریسی قابل نمایش است. کدینگ در میدان باینری انجام می‌شود. عناصر سازنده این میدان 0 و 1 هستند.

بردار کدینگ با e نمایش داده می‌شود و طول آن برابر L بیت است. ماتریس کدینگ با $\mathbf{E}$ نشان داده می‌شود و از کنار هم قرار گرفتن بردارهای کدینگ ساخته می‌شود. ابعاد ماتریس کدینگ $J \times L$ است، به طوری‌که $J \leq L$. متغیر J تعداد بسته‌های ارسالی در گره‌ها را مشخص می‌کند. برای مثال اگر گرهی بخواهد دو بسته کد شده را ارسال کند، مقدار J برابر با ۲ است. ماتریس کدینگ مستقل خطی، ماتریسی است که از L بردار کدینگ مستقل خطی ساخته شده و ابعاد آن برابر $L \times L$ و مقدار دترمینان آن یک است.

[12] Time slot

بردار فریم داده با f نشان داده می‌شود. این بردارها توسط گره مبدأ تولید می‌شوند. طول فریم داده برابر K بیت است. ماتریس فریم داده که با $\mathbf{F}$ نشان داده می‌شود از کنار هم قرار گرفتن L فریم داده ساخته می‌شود و ابعاد آن برابر $L \times K$ است.

بردار بسته کد شده که با p نشان داده می‌شود بر اثر عملیات کدینگ در گره مبدأ و سایر گره‌های مؤثر شبکه تولید می‌شود. ماتریس بسته‌های کد شده که با $\mathbf{P}$ نشان داده می‌شود از کنار هم قرار گرفتن J بسته کدشده تولید می‌شود و ابعاد آن برابر $J \times K$ است.

۱-۳-۱- عملیات کدینگ

عملیات کدینگ در تمام گره‌های شبکه یکسان است. این عملیات با ضرب ماتریس کدینگ، یعنی $\mathbf{E}$ در ماتریس فریم‌های داده، یعنی $\mathbf{F}$ انجام می‌شود. عملیات کدینگ در گره‌هایی که به عنوان گره مؤثر شناخته شده‌اند و می بایست اطلاعات ارسال کنند، انجام می‌شود.

$$\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{F} \qquad (۳)$$

۱-۳-۲- عملیات دیکدینگ

عملیات دیکدینگ با ضرب معکوس ماتریس $\mathbf{E}$، یعنی $\mathbf{E}^{-1}$ در ماتریس بسته‌های کد شده، یعنی $\mathbf{P}$ انجام می‌شود. عملیات دیکدینگ در تمام گره‌های مؤثر شبکه، به غیر از گره مبدأ انجام می‌شود. گره‌های مقصد نیز جزء گره‌های مؤثر هستند.

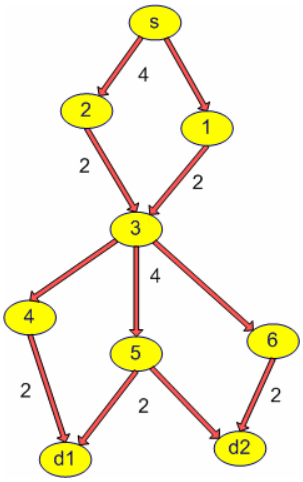
$$\mathbf{F} = \mathbf{E}^{-1} \times \mathbf{P} \qquad (۴)$$

شرط دیکد شدن فریم‌های دریافتی در گره‌های شبکه این است که ماتریس $\mathbf{E}$، مستقل خطی، یعنی دترمینان آن صفر نباشد. بردارهای کدینگ باید به گونه‌ای تعیین شوند که از هم مستقل خطی باشند.

۱-۴- مثالی از پیاده‌سازی کدینگ شبکه

مثال زیر چگونگی انجام عملیات‌های کدینگ و دیکدینگ در شبکه را نشان می‌دهد. در این مثال مقدار L برابر با ۴ است. کدینگ روی فریم‌های داده f_1 ، f_2 ، f_3 و f_4 انجام می‌شود. شبکه شامل یک گره مبدأ s و دو گره مقصد d_1 و d_2 است. تعداد بسته‌های ارسالی در شکل (۱-۱۰) نشان داده شده‌اند.

شکل (۱-۱۰)، انتشار چندپخشی را در یک شبکه کوچک بی‌سیم نشان می‌دهد که در آن ساختار انتشار از گره مبدأ تا گره‌های مقصد شکل گرفته است و تعداد بسته‌هایی که هر گره می‌بایست ارسال کند، مشخص شده‌اند.



شکل ۱-۱۰. انتشار چندپخشی با استفاده از کدینگ شبکه

با توجه به آنچه در تعیین بردارهای کدینگ و ایجاد ماتریس‌های کدینگ مستقل خطی در گره‌ها گفته شد، در مثال شکل (۱-۱۰) ماتریس‌های کدینگ گره‌ها به صورت زیر بدست می‌آیند.

$$\mathbf{E}_s=\begin{bmatrix}1000\\0100\\0010\\0001\end{bmatrix},\ \mathbf{E}_1=\begin{bmatrix}0111\\1110\end{bmatrix},\ \mathbf{E}_2=\begin{bmatrix}1011\\1010\end{bmatrix},\ \mathbf{E}_3=\begin{bmatrix}1001\\0100\\0010\\0001\end{bmatrix},\ \mathbf{E}_4=\begin{bmatrix}1001\\1000\end{bmatrix},\ \mathbf{E}_5=\begin{bmatrix}1011\\1110\end{bmatrix},\ \mathbf{E}_6=\begin{bmatrix}0010\\1111\end{bmatrix}$$

پس از تعیین ماتریس‌های کدینگ، کدینگ شبکه به آسانی قابل انجام است و فریم‌های داده در تمام گره‌ها و از جمله گره‌های مقصد قابل بازیابی هستند.

عملیات‌های کدینگ و دیکدینگ در گره‌ها با توجه به روابط ۳ و ۴ انجام می‌شوند.

کدینگ در گره مبدأ s:

$$\mathbf{P}_{s_\{1,2\}} = \mathbf{E}_s \times \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0100 \\ 0010 \\ 0001 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix}$$

دیکدینگ در گره های ۱ و ۲:

$$\mathbf{F} = \mathbf{E}_s^{-1} \times \mathbf{P}_{s_\{1,2\}} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0100 \\ 0010 \\ 0001 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix}$$

کدینگ در گره ۱:

$$\mathbf{P}_{1_3} = \mathbf{E}_1 \times \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0111 \\ 1110 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_2 + f_3 + f_4 \\ f_1 + f_2 + f_3 \end{bmatrix}$$

کدینگ در گره ۲:

$$\mathbf{P}_{2_3} = \mathbf{E}_2 \times \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1011 \\ 1010 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 + f_3 + f_4 \\ f_1 + f_3 \end{bmatrix}$$

دیکدینگ در گره ۳:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{E}_2 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{1_3} \\ \mathbf{P}_{2_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0111 \\ 1110 \\ 1011 \\ 1010 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} f_2 + f_3 + f_4 \\ f_1 + f_2 + f_3 \\ f_1 + f_3 + f_4 \\ f_1 + f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1111 \\ 0101 \\ 1110 \\ 0011 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_2 + f_3 + f_4 \\ f_1 + f_2 + f_3 \\ f_1 + f_3 + f_4 \\ f_1 + f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix}$$

کدینگ در گره ۳:

$$\mathbf{P}_{3_\{4,5,6\}} = \mathbf{E}_3 \times \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1001 \\ 0100 \\ 0010 \\ 0001 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 + f_4 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix}$$

دیکدینگ در گره های ۴، ۵ و ۶: