دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

گروه مهندسی برق – مخابرات

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق - مخابرات

عنوان

کدینگ شبکه در شبکه‌های حسگری دیداری

استاد راهنما

دکتر علی آقاگل‌زاده

استاد مشاور

دکتر میرجواد موسوی‌نیا

پژوهشگر

حمید شیری

بهمن ۱۳۹۰

بسمه تعالی

دانشگاه تبریز

دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

گروه مهندسی مخابرات

عنوان

کدینگ شبکه در شبکه‌های حسگری دیداری

استاد راهنما

دکتر علی آقاگل‌زاده

استاد مشاور

دکتر میرجواد موسوی‌نیا

پژوهشگر

حمید شیری

این رساله تحت قرارداد پژوهشی شماره ۵۰۰/۱۸۴۹۲/ت مورخ ۸۹/۱۲/۲۸ از پشتیبانی معنوی و مادی موسسه-ی تحقیقات ارتباطات و فناوری اطلاعات بهره‌مند شده است.

بسم الله الرحمن الرحيم

منت خدای را عز و جل

که طاعتش موجب قربت است

و به شکر اندرش مزید نعمت

تقدیم به مادرم

که عاشقانه و بدون توقع مرا یاری می کند

تقدیم به پدرم

که دوستم می دارد بدون هیچ چشم داشتی

تقدیم به تمامی استادانم

که به من رسم خوب بودن آموختند

و تقدیم به تمامی رادمردان روزگار

که دست می گیرند به محبت

نه به محنت

نام خانوادگی دانشجو: شیری نام: حمید
عنوان پایان‌نامه: کدینگ شبکه در شبکه‌های حسگری دیداری
استاد راهنما: دکتر علی آقاگل‌زاده
استاد مشاور: دکتر میرجواد موسوی‌نیا
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی برق گرایش: مخابرات – سیستم **دانشگاه: تبریز دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر** **تاریخ فارغ التحصیلی: بهمن ۹۰ تعداد صفحات: ۹۹**
کلید واژه ها: Network Coding, Analog Network Coding, Visual Wireless Network, Wireless Network, Error Correcting Codes
چکیده: با در نظر داشتن محدودیت‌های انتقال اطلاعات از جمله پهنای باند محدود، خطاهای کانال و تعداد زیاد کاربران، نیاز به استفاده‌ی حداکثر از ظرفیت کانال امری اجتناب ناپذیر است. در انتقال اطلاعات ظرفیت کانال مهمترین محدودیت می‌باشد و هدف دسترسی به بالاترین نرخ انتقال اطلاعات با در نظر داشتن این ظرفیت است. علاوه بر این در برخی شبکه‌ها با اطلاعات لایه‌ای، مقدار ظرفیت به همراه ویژگی‌های نوع اطلاعات مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این پایان‌نامه انتقال داده‌های تصویری در شبکه با استفاده از کدگذاری شبکه مطرح می‌شود. با توجه به خاصیت همه‌پخشی انتقال‌های بی‌سیم، می‌توان انتقال و کدگذاری شبکه را در لایه‌ی فیزیکی انجام داد. ولی با توجه به مشکلات این نوع کدگذاری و حساسیت بیشتر نسبت به نویز کانال، از یک کد تصحیح خطای مناسب استفاده می‌شود. استفاده از کد تصحیح خطا در این حالت کمی با سیستم‌های معمولی فرق خواهد داشت و شرایط ویژه‌ای دارد؛ از جمله اینکه، اندازه‌ی میدان گالوای مورد استفاده باید عدد اول باشد. بلوک دیاگرام مربوط به سیستم FEC برای استفاده از کد کانال تصحیح خطا نیز کمی متفاوت خواهد بود که در این پایان‌نامه نشان داده می‌شود. یک الگوریتم مناسب برای ایجاد نوع کدشبکه و زمان‌بندی ارسال در شبکه مطرح می‌شود. این الگوریتم از ویژگی لایه‌ای بودن اطلاعات تصویری بهره می‌گیرد تا کیفیت تصاویر انتقال داده شده، علاوه بر throughput، مد نظر قرار گیرند. در نهایت شبیه‌سازی‌ها بهبود کیفیت و همچنین کاهش تعداد ارسال داده‌ها را نشان می‌دهند.

لیست مطالب

پیشگفتار ۱

۱ کدگذاری شبکه ۳

۱-۱ تعریف کدگذاری شبکه ٤

۱-۱-۱ کدگذاری شبکه خطی ٥

۱-۱-۲ شبکه‌های غیرحلقوی ٦

۱-۱-۳ شبکه‌های حلقوی ٨

۱-۲ الگوریتم‌های کدگذاری شبکه ۱۰

۱-۲-۱ کدگذاری شبکه‌ی تصادفی توزیع‌شده ۱۰

۱-۲-۲ کدگذاری شبکه‌ی عملی ۱۱

۱-۲-۳ الگوریتم خطی فلو اطلاعات ۱۳

۱-۲-٤ الگوریتم کوپ ۱٤

۱-۲-٥ الگوریتم HRRE ۱۷

۱-۳ کدگذاری شبکه‌ی لایه‌ی فیزیکی ۱۹

۱-٤ شبکه‌ی رله ۲۱

۱-٤-۱ کدگذاری شبکه دیجیتال ۲۲

۱-٤-۲ کدگذاری شبکه‌ی آنالوگ ۲۳

۱-٤-۳ روش‌های رله‌کردن ۲٤

۱-٥ مدولاسیون دیجیتال ۲٥

۱-٥-۱ نمودار فلکی سیگنال ۲٦

۱-٥-۲ تشخیص همسان و ناهمسان ۲۷

۱-٦ نتیجه ۲۷

۲ ناحیه تخمین، کدهای کنترل خطا، کدگذاری شبکه آنالوگ ۲۹

۲-۱ کدگذاری شبکه‌ی فیزیکی برای یک شبکه‌ی رله ۳۰

۲-۲ تحلیل ناحیه‌ی تخمین ۳٤

۲-۳ لزوم کدهای کنترل خطا در کدگذاری شبکه ٤٠
۲-٤ میدان‌های محدود ٤٥
۲-٥ کدهای بلوکی خطی ٥٠
۲-٥-۱ نمایش ماتریسی کدهای بلوکی ٥٠
۲-٥-۲ کدگشایی نشانه ٥۲
۲-٥-۳ تصحیح خطا ٥٤
۲-٦ کدهای گردشی ٥٦
۲-٦-۱ کدهای گردشی BCH باینری ٥۸
۲-٦-۲ کدهای BCH غیرباینری ٥۹
۲-٦-۳ کد رید سولومون ٦٠
۲-۷ کد کنترل خطا در لایه‌ی فیزیکی ٦۸
۲-۸ الگوریتم انتخاب کد در گره کدگذاری ۷۲
۲-۹ نتیجه ۷٥
۳ نتایج شبیه‌سازی ۷۷
۳-۱ توپولوژی رله ۷۸
۳-۱-۱ توپولوژی رله بدون کدکردن کانال ۷۹
۳-۱-۲ توپولوژی رله با کدکردن کانال ۸٤
۳-۲ توپولوژی ستاره ۸۹
٤ نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۹٤
مراجع ۹۸

لیست جداول

جدول ۲-۱) برخی از چندجمله‌ای‌های اول از درجه‌های مختلف ٤٨
جدول ۲-۲) جمع برای $GF(2^3)$ ٤٩
جدول ۲-۳) ضرب برای $GF(2^3)$ ٤٩
جدول ۳-۱) نتایج شبیه‌سازی برای شبکه نمونه ۹۲

لیست اشکال

شکل ۱-۱) ترکیب بسته‌ها در گره کدگذاری ۵

شکل ۱-۲) شبکه‌ی حلقوی نمونه ۹

شکل ۱-۳) شبکه پروانه‌ای ۱۱

شکل ۱-٤) نمونه‌ی ترکیب کوپ ۱۵

شکل ۱-۵) شبکه‌ی رله‌ی نمونه ۲۱

شکل ۱-٦) رله‌کردن در شبکه‌ی رله ۲۳

شکل ۲-۱) بردار ترکیب دو سیگنال در لایه‌ی فیزیکی ۳۵

شکل ۲-۲) نواحی تخمین ترکیب دو سیگنال در لایه‌ی فیزیکی ۳٦

شکل ۲-۳) ترکیب دو سیگنال با مدولاسیون BPSK ۳۸

شکل ۲-٤) ناحیه‌ی تخمین دو سیگنال ۳۸

شکل ۲-۵) دیاگرام فضای سیگنال ارسال همزمان با استفاده از BPSK ۳۹

شکل ۲-٦) سیستم FEC معمولی ٤٤

شکل ۲-۷) نگاشت عناصر میدان بر اساس عناصر اساسی برای GF(8) ٤۷

شکل ۲-۸) کدگشای مراجعه به جدول ۵۵

شکل ۲-۹) بلوک دیاگرام دکدکننده RS ٦۳

شکل ۲-۱۰) ترکیب بسته‌ها در کدگذاری لایه فیزیکی ٦۹

شکل ۲-۱۱) سیستم FEC با کدگذاری شبکه‌ی آنالوگ ۷۱

شکل ۲-۱۲) توپولوژی نمونه ۷۳

شکل ۳-۱) توپولوژی رله بدون کدکردن کانال و مدولاسیون BPSK ۸۱

شکل ۳-۲) توپولوژی رله بدون کدکردن کانال و مدولاسیون QPSK ۸۲

شکل ۳-۳) توپولوژی رله بدون کدکردن کانال و مدولاسیون 16-PSK ۸۳

شکل ۳-٤) توپولوژی رله با کدکردن کانال CRC-4 ..... ۸٦

شکل ۳-۵) توپولوژی رله با کدکردن کانال RS-5 ..... ۸۷

شکل ۳-٦) توپولوژی رله با کدکردن کانال RS-17 ..... ۸۸

شکل ۳-۷) مقدار PSNR متوسط تصاویر رسیده ۹۱

لیست واژگان

Achievable Bandwidth	پهنای‌باند قابل‌دست‌یابی
Ad-hoc Wireless Network	شبکه بیسیم موردی
Amplify and Forward (AF)	تقویت و ارسال
Analog Network Coding (ANC)	کدگذاری شبکه‌ی آنالوگ
Anti-Packets	ضد-بسته‌ها
Binary Phase Shift Keying (BPSK)	کلیدزنی دودویی شیفت فاز
Chien Search	جستوجوی چین
Convolutional Codes	کدهای کانوولوشنی
COPE	کوپ
Decode and Forward (DF)	دکد و ارسال
Denoise and Forward (DNF)	حذف نویز و ارسال
Digital Network Coding (DNC)	کدگذاری شبکه دیجیتال
Error Correcting Codes	کدهای کنترل خطا
Error Evaluation Polynomial	چندجمله‌ای ارزیابی خطا
Error Location Polynomial	چندجمله‌ای محل خطا
Error locator polynomial	چندجمله‌ای شاخص محل خطا
Euclidean Algorithm	الگوریتم اقلیدس
Forney Algorithm	الگوریتم فورنی
Galois Field	میدان گالوا
Global Network Coding Vector	بردار کدگذاری شبکه عام
Heterogeneous Receiver Rate Estimates (HRRE)	تخمین نرخ گیرنده ناهمگن
Learning Neighbor States	فراگیری حالت همسایگان
Linear Information Flow (LIF)	(الگوریتم) خطی فلو اطلاعات
Linear Network Coding	کدگذاری شبکه خطی
Local Network Coding Vector	بردار کدگذاری شبکه محلی
Massey-Berlekamp	مسی-برلکمپ
Maximum Likelihood Decoding	کدگشایی بیشترین شباهت

Medium Access Control (MAC)	کنترل دسترسی به کانال (مک)
Min-Cut	حداقل-برش
Minimum Shift Keying (MSK)	کلیدزنی حداقل شیفت
Modulo-2	پیمانه دو
Multihop	چندگامه
Multimedia	چندرسانه‌ای
Native Packet	بسته محلی
Network Coding	کدگذاری شبکه
Newton’s Identities	اتحادهای نیوتن
Opportunistic Coding	کدگذاری فرصت‌طلبانه
Oppotrunistic Listening	گوش‌کردن فرصت‌طلبانه
Packet Tagging	برچسب‌زدن بسته
Phase Shift Keying (PSK)	کلیدزنی شیفت فاز
Physical Network Coding	کدگذاری شبکه‌ی لایه‌ی فیزیکی
Polynomial Time	چندجمله‌ای زمانی
Practical Network Coding	کدینگ شبکه عملی
Primitive polynomials	چندجمله‌ای‌های اول
Pulse Amplitude Modulation (PAM)	مدولاسیون دامنه‌ی پالس
Random Network Coding	کدگذاری شبکه تصادفی
Reception Report	گزارش دریافت
Reed Solomon (RS)	رید-سولومون
Router	مسیریاب
Systematic Encoding	کدگذاری به روش سازمان یافته
Syndrome	نشانه
Syndrome Decoding	کدگشایی نشانه
Table - Lookup	مراجعه به جدول
Throughput	توان‌عملیاتی
Visual Wireless Network	شبکه‌ی بیسیم دیداری
Wireless Network	شبکه بیسیم

لیست اختصارات

AF	Amplify and Forward
ANC	Analog Network Coding
AP	Access Point
BCH	Bose, Chaudhuri, Hocquenghem
BPSK	Binary Phase Shift Keying
Config	Configuration
COPE	Coding Opportunistically
CRC	Cyclic Redundancy Check
DF	Decod and Forward
DNC	Digital Network Coding
DNF	Denoise and Forward
FEC	Forward Error Correction
GF	Galois Field
HRRE	Heterogeneous Receiver Rate Estimates
ICOP	Identifying the Coding OPportunity
LIF	Linear Information Flow
MAC	Medium Access Control
Min-Cut	Minimum Cut
MSK	Minimum Shift Keying
NC	Network Coding
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PhysCOPE	Physical COPE
PhysCOPEM	Manual PhysCOPE
PhysCOPER	Random PhysCOPE
PNC	Practical Network Coding
PSK	Phase Shift Keying
PSNR	Peak Signal to Noise Rate
RS	Reed Solomon

پیشگفتار

در بحث‌های مخابراتی محاسبه‌ی ظرفیت شبکه روش‌های خاص و پیچیده‌ای دارد که در برخی موارد این محاسبات تا حد ناممکن نیز سخت می‌شود. برای نیل به این ظرفیت شبکه، روش‌های مختلفی در زمینه‌ی کدگذاری شبکه پیشنهاد و به‌کار بسته شده است. در کارهای سال‌های اخیر پیشرفت‌های زیادی در این زمینه انجام گرفته و مساله‌ی مهم یافتن روشی برای انتقال حداکثر اطلاعات ممکن (با توجه به ظرفیت کانال‌ها) در کمترین زمان از منابع به مقصد است. این مقدار حداکثر (ظرفیت)، محدودیت‌هایی بر مخابره‌ی اطلاعات در شبکه تحمیل می‌کند.

از آنجا که برخلاف ظرفیت کانال، ظرفیت شبکه در بسیاری از حالت‌ها قابل دستیابی است؛ علاوه بر روش-هایی برای به‌دست آوردن ظرفیت کانال، روش‌ها و الگوریتم‌هایی نیز برای نزدیک‌شدن یا دستیابی به این ظرفیت پیشنهاد شده است. کدگذاری شبکه روشی برای دستیابی به این ظرفیت است و در لایه‌های مختلف شبکه مخصوصاً لایه‌ی پیوند داده انجام می‌گردد. با پیدایش کدگذاری شبکه کارهای بسیار زیادی مخصوصاً در مورد شبکه‌های چندپخشی[۱] انجام شده است. چندپخشی شبکه به ارسال همزمان اطلاعات به چندین گره در شبکه اطلاق می‌گردد. حقیقت مهم که حاصل قضیه‌ی کدگذاری شبکه می‌باشد این است که شرایط لازم و کافی برای تک‌پخشی[۲] اطلاعات در یک نرخ مشخص برای هر کدام از گیرنده‌ها، برای چندپخشی اطلاعات در همان نرخ لازم و کافی هستند، به شرطی که گره‌های میانی اجازه‌ی ترکیب و پردازش روی اطلاعات مختلف جاری در شبکه را داشته باشند [۱].

ساختار پایان‌نامه به‌صورت زیر است:

---

[۱] Multicast

[۲] Unicast

در فصل اول در مورد کدگذاری شبکه توضیح مختصری داده می‌شود و مفاهیم مهم کدگذاری شبکه از جمله کدهای محلی و عام تعریف می‌گردند. در همین فصل چند الگوریتم مهم و اساسی برای کدگذاری شبکه ارائه می‌شود. در ادامه، کدگذاری شبکه‌ی لایه‌ی فیزیکی و سپس شبکه‌ی رله معرفی شده و در آخر روش‌های مدولاسیون به‌طور مختصر یادآوری می‌شود. در فصل دوم سیگنال‌ها و ترکیب آنها در لایه‌ی فیزیکی و نواحی تخمین بیان و سپس کدهای کنترل خطای مورد نیاز در این فصل بررسی می‌شود؛ یعنی میدان‌های محدود معرفی و کدهای تصحیح خطا بیان می‌شود. در ادامه‌ی همین فصل نحوه‌ی دکدکردن کدتصحیح خطای RS جهت استفاده در شبیه‌سازی‌ها بیان می‌گردد. نحوه‌ی استفاده از کد تصحیح خطا در کدگذاری شبکه‌ی آنالوگ و همچنین الگوریتم پیشنهادی برای کدگذاری شبکه آنالوگ برای اطلاعات لایه-ای در انتهای همین فصل ارائه شده است. در نهایت نتایج شبیه‌سازی‌ها در فصل سه و نتایج در فصل آخر ارائه می‌گردند.

فصل اول

کدگذاری شبکه

با گسترش شبکه و پیشرفت استفاده‌ی آنها مخصوصاً در شبکه‌های حسگری، تلاش برای یافتن حد نهایی ارسال و انتقال اطلاعات یا همان ظرفیت شبکه بیشتر شده است. این موضوع به خصوص از این لحاظ بیشتر مورد توجه است که علاقه به بررسی ظرفیت کانال‌ها کمتر شده و تحقیقات بیشتر روی بهبود عمل‌کرد بلوک‌ها و یافتن نحوه‌ی انجام عملیات روی بلوک‌های اطلاعات در شبکه‌ها متمرکز شده است تا بیشترین استفاده از ظرفیت مجموعه‌ی کانال‌ها، در شبکه‌ها بشود. کار اولیه و پیشرو در این زمینه مقاله‌ی Ahlswede و همکارانش [۲] است که باعث توجه دوباره به نظریه اطلاعات و شبکه شد. در اینجا تعاریفی از کدگذاری شبکه در حدی که در این پایان‌نامه نیاز است، بیان می‌شود. سپس چند الگوریتم نمونه و مهم در این زمینه ارائه می‌گردد. در دنباله، کدگذاری شبکه آنالوگ و سپس شبکه رله معرفی می‌شوند. مدولاسیون دیجیتال هم به‌صورت خلاصه در انتهای فصل گنجانده شده است.

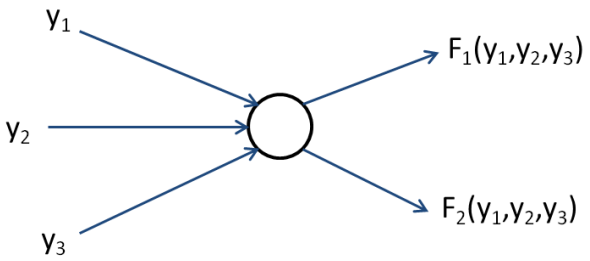
۱-۱ تعریف کدگذاری شبکه

برای تعریف مختصری از کدگذاری شبکه، یک مسیریاب[۱] در یک شبکه فرض می‌شود. در شبکه‌های معمولی این مسیریاب تنها عمل مسیریابی و پیش‌فرستادن[۲] اطلاعات دریافتی را انجام می‌دهد، ولی هیچ‌گونه پردازش و تغییری روی اطلاعات انجام نمی‌گیرد. کدگذاری شبکه به هر گره اجازه انجام محاسبات روی پیام‌ها را می‌دهد و پیام‌ها به‌صورت درون شبکه‌ای پردازش می‌شوند. بنابر این در کدگذاری شبکه هر پیام خروجی از یک گره، ترکیب یا تابعی از پیام‌های ورودی به گره می‌باشد. (شکل ۱-۱)

---

[۱] Router

[۲] Forwarding



شکل ۱-۱) ترکیب بسته‌ها در گره کدگذاری

کدگذاری شبکه باعث افزایش استفاده از ظرفیت می‌شود و مهمترین مزیت آن بهبود توان عملیاتی است. همچنین مزایای دیگری از جمله کاهش انرژی، افزایش پهنای باند و رمزنگاری نیز خواهد داشت. مناسبترین تنظیمات برای استفاده از کدگذاری شبکه در ارتباطات کل به کل[۱] است که در آن عده‌ای از گره‌ها می‌خواهند اطلاعاتی را با عده‌ای دیگر از گره‌ها ارسال و دریافت کنند.

۱-۱-۱ کدگذاری شبکه خطی[۲]

کدگذاری شبکه خطی برای رسیدن به ظرفیت چندپخشی[۳] (مولتی‌کست) شبکه کافی است [۳ و ٤]. قضیه زیر این مطلب را بهتر بیان می‌کند:

قضیه: یک شبکه جهت‌دار $G=(V,E)$ با ظرفیت یال‌های واحد و h منبع واحد که در یک گره قرار گرفته شده‌اند درنظر گرفته و فرض می‌شود که مقدار حداقل-برش[٤] به هر گره برابر h باشد. در این صورت یک طرح انتقال چندپخشی بر روی یک میدان محدود به اندازه کافی بزرگ F_q وجود دارد که در آن گره‌های میانی سمبل‌های اطلاعات ورودی را در میدان F_q ترکیب می‌کنند و اطلاعات منابع را همزمان به همه‌ی

---

[۱] All to All

[۲] Linear Network Coding

[۳] Multicast

[٤] Min-Cut

گیرنده‌ها با نرخ h تحویل می‌دهند. این قضیه‌ی وجود کدهای شبکه خطی است ولی در مورد اندازه میدان بحثی نمی‌شود.

کدگذاری شبکه خطی به این معنی است که پیام‌ها به‌صورت بردارهایی ازعضوهای میدان محدودی در نظر گرفته شوند و تابع اعمالی روی آنها در گره‌های شبکه، تنها ترکیب‌های خطی ساده‌ای در فضای این میدان-های محدود باشند. مانند:

$$F_1(y_1, y_2, y_3) = \alpha_1 y_1 + \alpha_2 y_2 + \alpha_3 y_3 \quad (۱-۱)$$
$$F_2(y_1, y_2, y_3) = \beta_1 y_1 + \beta_2 y_2 + \beta_3 y_3$$

به‌دست آوردن اطلاعات در گیرنده‌ها[۱] نیز با استفاده از عملیات خطی انجام می‌گردد. مساله‌ی مهم کدگذاری شبکه در واقع پیدا کردن این ضرایب است و الگوریتم‌های مختلفی نیز برای این کار پیشنهاد شده است.

با توجه به تقسیم‌بندی شبکه به دو نوع حلقوی و غیرحلقوی چند تعریف مهم ارائه می‌شود که بیشتر بر مبنای مرجع [۵] می‌باشد.

۱-۱-۲ شبکه‌های غیرحلقوی[۲]

در شبکه‌های غیرحلقوی هر پیام مستقل از رشته پیام‌های قبلی است و بنابراین مساله‌ی کدگذاری شبکه، مستقل از تاخیر (تاخیر کانال و تاخیر عملیات پردازش) می‌باشد. در شبکه‌ی به‌صورت G=(V,E) (که V مجموعه‌ی گره‌ها و E مجموعه‌ی یال‌ها است) و با فرض اینکه هر یال بتواند در هر واحد زمانی تنها یک سمبل از میدان F_q را منتقل کند، S یک فرستنده و $\mathcal{R}$ مجموعه‌ای از گیرنده‌ها باشد؛ همچنین ظرفیت چندپخشی شبکه $h = \mathrm{MinCut}(S, \mathcal{R})$ باشد؛ در این صورت چند تعریف به‌صورت زیر می‌توان انجام داد:

---

[۱] decoding

[۲] Acyclic

۱-۱-۲-۱ بردار کدگذاری شبکه محلی[۱]

اگر برای هر یال e خارج‌شونده از v، $y(e)$ سمبلی را نشان دهد که از یال e عبور می‌کند ($y(e) \in F_q$)، در این صورت با توجه به کدگذاری خطی محلی برای هر گره v، نگاشت کدکننده‌ی محلی به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$y(e) = \sum_{e'} c^{l}_{e'}(e)y(e') \qquad (۲-۱)$$

$$e' \in In(v) \quad , \quad e \in Out(v)$$

$In(v)$ مجموعه کانال‌های ورودی به گره v و $Out(v)$ مجموعه کانال‌های خروجی از گره v خواهند بود.

مجموعه‌ی ضرایب ترکیب خطی، بردار کدگذاری شبکه محلی را به‌صورت زیر می‌سازند:

$$c^{l}(e) = \left[c^{l}_{e'}(e)\right] \qquad (۳-۱)$$

بعد این بردار $|In(v)| \times 1$ خواهد بود. برای هر گره، ماتریس هسته‌ی محلی C_v^l به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_v^l = \left[c_{e'}^l(e) = k_{e'e}\right] \qquad (٤-۱)$$

۱-۱-۲-۲ بردار کدگذاری شبکه عام[۲]

با تعریف یال‌های مجازی $e'_1, \dots, e'_h$ ورودی به گره S، اگر سمبل‌های $y(e'_1), \dots, y(e'_h)$ روی این یال‌ها $x_1, \dots, x_h$ باشند، در این صورت می‌توان نشان داد که سمبل روی یال $e \in E$ در شبکه به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

---

[۱] Local Network Coding Vector

[۲] Global Network Coding Vector

$$y(e) = \sum_{i=1}^{h} c_i(e) x_i \qquad (۵-۱)$$

و مجموعه ضرایب این ترکیب خطی، بردار کدگذاری عام روی کانال e را به‌صورت زیر می‌سازند:

$$c(e) = \begin{bmatrix} c_1(e) \\ \vdots \\ c_h(e) \end{bmatrix} \qquad (۶-۱)$$

بعد این بردار نیز $h \times 1$ می‌باشد. در این حالت به‌صورت بازگشتی خواهیم داشت:

$$c(e) = \sum_{e} c^{l}_{e'}(e)\, c(e') \qquad (۷-۱)$$

و برای هر گیرنده‌ی $R_j \in \mathcal{R}$ به‌دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} y(e_1) \\ \vdots \\ y(e_h) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1(e_1) & \dots & c_h(e_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_1(e_h) & \dots & c_h(e_h) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_h \end{bmatrix} = A_j \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_h \end{bmatrix} \qquad (۸-۱)$$

۱-۱-۳ شبکه‌های حلقوی[۱]

یک شبکه حلقوی نامیده می‌شود هرگاه حداقل یک حلقه‌ی جهت‌دار را شامل شود. در یک شبکه‌ی غیرحلقوی عملیات در هر کدام از گره‌ها، به‌طور سنکرون انجام می‌شود. بنابراین پیام‌ها جدا از پیام‌های قبلی کد شده و در شبکه جریان می‌یابند و پردازش پیام‌ها مستقل از رشته پیام‌های موجود در شبکه خواهد بود. در این صورت مساله‌ی کدگذاری شبکه مستقل از تاخیر (تاخیر انتقال و پردازش در گره‌ها) است. ولی در شبکه‌های حلقوی اثر تاخیر را نمی‌توان نادیده گرفت. مساله دیگر این است که تعاریف عام کد شبکه و تعاریف محلی کد شبکه، در یک شبکه‌ی غیرحلقوی معادل هم هستند زیرا که هسته‌های کدگذاری محلی و عام به‌صورت بازگشتی و خطی از یکدیگر به‌دست می‌آیند. ولی در شبکه‌های حلقوی این دو تعریف معادل

[۱] Cyclic