بسمه تعالی

وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات شرکت ارتباطات زیرساخت	**عنوان مقاله: ترجمه مقاله کدگذاری کانال در سیستم‌های ارتباطات نوری** تهیه کننده: ساناز کبیری مدرک و رشته تحصیلی: کارشناسی ارشد مهندسی برق مخابرات سیستم رشته شغلی: کارشناس کنترل و نظارت بر عملکرد قراردادهای نگهداری اداره کل: مدیریت ارتباطات زیرساخت استان اصفهان عنوان حوزه تحقیقاتی مورد نیاز شرکت: مکانیزم channel coding شامل معرفی، کاربرد و... شماره ردیف حوزه تحقیقاتی مورد نیاز شرکت: ردیف ۳۳

چکیده: در این مقاله خلاصه‌ای از انواع مختلف کدهای تصحیح خطا و سه نسل از روش‌های کدگذاری کانال با امکان تصحیح خطا در گیرنده (FEC[1]) که در سیستم‌های ارتباطات نوری استفاده شده‌اند، بیان می‌گردد. طرح‌های پیشنهادی کدگذاری کانال با امکان تصحیح خطا در گیرنده که قابل استفاده در شبکه‌های نوری با سرعت بالا در آینده باشند، در نسل سوم قرار می‌گیرند.

کلیدواژه‌ها: کدگذاری کانال با امکان تصحیح خطا در گیرنده (FEC)، کدگذاری کانال، کدهای LDPC، کدهای توربو

۱- معرفی:

کدگذاری کانال با امکان تصحیح خطا در گیرنده قسمت مهمی از سیستم‌های ارتباطاتی مدرن است. تاکنون انواع جدیدی از کدهای کانال و طرح‌های کدگذاری کانال با امکان تصحیح خطا با عملکرد و کارآیی بهتر معرفی شده‌اند. در بخش دوم این مقاله خلاصه‌ای از انواع مختلف کدهای کانال ارائه شده است. در بخش سوم روش‌های تصحیح خطا مورد استفاده در شبکه‌های نوری بیان شده و به سه نسل تقسیم می‌شوند. در نسل سوم به روش‌های پیشنهادی کدگذاری کانال با امکان تصحیح خطا و قابل استفاده در شبکه‌های نوری پرسرعت آینده اشاره می‌شود.

۲- مروری بر انواع روش‌های کدگذاری کانال:

در سال ۱۹۴۸ کلود شانون[2] مقاله مهم و اثرگذار خود را با عنوان "نظریه ریاضی ارتباطات[3]" منتشر کرد. این مقاله در مورد محدودیت‌های انتقال بدون خطای اطلاعات در کانال‌های نویزی است که براساس مفاهیم کدگذاری کانال، کدگذاری منبع و تئوری اطلاعات بیان شده است. شانون پایه‌های ریاضیِ انتقال اطلاعات را بنا نهاد و محدودیت‌های اساسی برای سیستم‌های ارتباطاتی دیجیتالی را به دست آورد؛ همچنین با استفاده از مدل‌های احتمالی برای منابع اطلاعاتی و کانال‌های ارتباطی، معادله اصلی انتقال بدون خطای داده را به صورت آماری محاسبه کرد.

کدهای همینگ[4] اولین کدهای تصحیح‌کننده خطا هستند. کدهای همینگ، گروهی از کدهای قالبیِ خطی هستند و توسط ریچارد همینگ در سال ۱۹۵۰ معرفی شدند. قبل از معرفی کدهای همینگ تنها از چند روش ساده برای تشخیص خطا مثل

[1] Forward Error Correction
[2] Claude Shannon
[3] A Mathematical Theory of Communication
[4] Hamming codes

بیت توازن (parity check)، کدهای ۲ از ۵ و کدهای تکراری استفاده شده است. برای هر عدد طبیعی m>1 یک کد همینگ $(2^m - 1, 2^m - 1 - m)$ وجود دارد و هر کد همینگ قادر به تصحیح یک خطا و تشخیص دو خطا در هر کلمه کد است. اولین کد همینگ معرفی شده دارای طول کلمه کد ۷ بیت و طول کلمه داده ۴ بیت بود که با (7,4) نشان داده می‌شود. امروزه کدهای همینگ هنوز در برخی از انواع حافظه‌های ECC[۵] استفاده می‌شوند.

در سال ۱۹۵۴ دیوید ای مولر[۶] گروهی از کدهای تصحیح‌کننده چند خطا را معرفی و ایروینگ اس. رید[۷] اولین الگوریتم برای کدگشایی این کدها (معروف به کدگشایی اکثریت[۸]) را پیشنهاد کرد. امروزه این گروه از کدهای قالبیِ خطیِ باینری، کدهای رید-مولر[۹] نامیده می‌شوند. مزیت کدهای رید-مولر توصیف آسان و الگوریتم کدگشایی ساده است.

کدهای کانولوشنال[۱۰]، گروهی از کدهای درختیِ زمان ثابتِ خطی هستند و می‌توانند به وسیله یک مدار شیفت رجیستری خطی تولید شوند که عملیات کانولوشن را روی دنباله داده انجام می‌دهد. این کدها اولین بار در سال ۱۹۵۵ توسط پیتر الیاس[۱۱] معرفی شدند. برای کدگشایی کدهای کانولوشنال در ابتدا کدگشایی دنباله‌ای مورد استفاده قرار گرفت، اما پس از توسعه الگوریتم ویتربی در سال ۱۹۶۷ توسط اندرو ویتربی[۱۲] کدهای کانولوشنال بیشتر مورد توجه قرار گرفتند. الگوریتم ویتربی بسیار ساده‌تر است اما برای کدهای کانولوشنال با پیچیدگی متوسط ترجیح داده می‌شود و برای کدهای کانولوشنالی پیچیده‌تر غیرعملی است. کدهای کانولوشنال در کاربردهای مختلفی مثل سیستم‌های بی‌سیم چندگانه، ارتباطات سیار و ارتباطات ماهواره‌ای استفاده می‌شوند.

کدهای BCH بخش وسیعی از کدهای تصحیح خطای قالبیِ خطی هستند. کدهای رید مولر و کدهای محبوب رید سالومون[۱۳] هردو زیر مجموعه کدهای BCH هستند. کدهای BCH در سال ۱۹۶۰ توسط راج بوز[۱۴] و دی.کی. ری چاودوری[۱۵] و به صورت مجزا در سال ۱۹۵۹ توسط الکسیس هوکنهم[۱۶] معرفی شدند. کدهای BCH نقش اساسی در تحقیق در مورد تکنیک-های کدگذاری جبری ایفا کردند. روش‌های ساده متنوعی برای کدگذاری و کدگشایی آن‌ها وجود دارد (به عنوان مثال کدگشایی سیندروم[۱۷]). این کدها در ارتباطات ماهواره‌ای، پخش‌کننده‌های لوح فشرده، DVDها، دیسک‌خوان‌ها، درایوهای حالت جامد (SSD) و بارکدهای دو بعدی استفاده می‌شوند.

کدهای ریدسالومون گروهی از کدهای قالبیِ خطیِ چرخشیِ غیرباینری هستند و در سال ۱۹۶۰ توسط ایروینگ اس رید و گاستا سالومون[۱۸] معرفی شدند. این کدها می‌توانند چندین خطا را تصحیح کنند و هم‌چنین در مقابل خطاهای انفجاری و متوالی[۱۹] مقاوم هستند. کدهای ریدسالومون اغلب در اتصال با کدهای کانولوشنال برای عملکرد بهتر استفاده می‌شوند. از این

[5] Error Correction Code
[6] David E. Muller
[7] Irving S. Reed
[8] Majority decoding
[9] Reed-Muller codes
[10] Convolutional codes
[11] Peter Alias
[12] Andrew Viterbi
[13] Reed-Solomon
[14] Raj Bose
[15] D. K. Ray-Chaudhuri
[16] Alexis Hocquenghem
[17] Syndrome decoding
[18] Gustave Solomon
[19] Burst Errors

کدها در لوح‌های فشرده، DVDها، دیسک‌های بُلورِی[20]، دستگاه‌های ذخیره‌سازی داده‌ها، فناوری‌های انتقال داده مانند DSL و wimax، سیستم‌های پخش مثل DVB[21]، ATSC[22] و ارتباطات ماهواره‌ای استفاده می‌شوند.

کدهای توربو[23] کدهای قدرتمند تصحیح خطا در گیرنده هستند که می‌توانند بسیار نزدیک به حد شانون[24] عمل کنند. این کدها اولین بار در سال ۱۹۹۳ به صورت علنی توسط کلود برو[25] و همکارانش معرفی شدند. الگوریتم بهینه برای کدگشایی کدهای توربو، الگوریتم BCJR[26] (نام الگوریتم از اسامی مخترعان آن گرفته شده است) بود که در ابتدا برای کدگشایی کدهای کانولوشنال در نظر گرفته شد ولی نسبت به الگوریتم ویتربی با عملکرد یکسان تصحیح خطا بسیار پیچیده‌تر بود؛ بنابراین تا زمان معرفی کدهای توربو غالبا الگوریتم BCJR نادیده گرفته شد. جهت دست‌یابی به عملکرد درست در کدهای توربو از چندین مفهوم استفاده می‌شود مانند جای‌گشت کلمه‌کدها[27]، کدگشایی تکراری، الگوریتم MAP[28]، کدگشایی با تصمیم‌گیری نرم[29] و اتصال کدهای کانال. کدهای کانولوشنال بازگشتی نیز بخش جدایی‌ناپذیر از کدهای توربو هستند. هم‌چنین یک دسته از کدهای توربو قالبی وجود دارد که با نام TPC[30] شناخته می‌شود. کدهای توربو در ارتباطات سیار با فناوری‌های UTMS و LTE، ارتباطات ماهواره‌ای، استانداردهای IEEE 802.11 (WiFi) و IEEE 802.16 (wimax) استفاده می‌شوند.

کدهای LDPC[31] گروهی از کدهای قالبیِ خطی هستند و می‌توانند نزدیک به حد شانون عمل کنند. کدهای LDPC توسط رابرت ال. گالاگر[32] در سال ۱۹۶۰ معرفی شدند. با این حال پیاده‌سازی آن‌ها در آن زمان غیرعملی بود و تا سال ۱۹۹۶ که کار او دوباره مورد توجه قرار گرفت، فراموش شدند. ساختار این کدها کارآمد است و موازات در کدگشایی، محاسبات ساده و نرخ‌های مختلف کد را پشتیبانی می‌کند. آن‌ها هم‌چنین می‌توانند مفاهیم متعدد استفاده شده در کدهای توربو را برای دستیابی به عملکرد عالی در تصحیح خطا به کار گیرد. برای کدگشایی آن‌ها می‌توان از الگوریتم‌های متعددی استفاده نمود. کدهای LDPC برای کاربردهای مختلفی از جمله ارتباطات ماهواره‌ای، شبکه فضایی عمیق (دوردست)[33]، استاندارد DVB-S2[34] (پخش ویدئو دیجیتال) و استانداردهای 802.11 استفاده می‌شوند.

در سال ۲۰۰۹ گروه جدیدی از کدهای تصحیح خطای قالبیِ خطی معروف به کدهای قطبی[35] توسط اِردال آریکان[36] معرفی شد. اثبات شده است که کدهای قطبی می‌توانند به ظرفیت کانال‌های بدون حافظهِ متقارنِ باینری دست یابند. کدهای قطبی می‌توانند با پیچیدگی کم کدگذاری و کدگشایی شوند. امروزه این کدها و عملکرد آن‌ها در اتصال با سایر کدهای کانال هنوز هم مورد مطالعه است.

---

[20] Blue ray disk
[21] Digital Video Broadcasting
[22] Advanced Television Systems Committee
[23] Turbo codes
[24] Shannon limit
[25] Claude Berrou
[26] L.Bahl, J.Cock, F.Jelinek and J.Raviv
[27] Interleaving
[28] Maximum a posteriori
[29] Soft decision
[30] Turbo Product Codes
[31] Low Density Parity Check
[32] Robert L. Gallager
[33] Deep Space Network
[34] Digital Video Broadcasting
[35] Polar codes
[36] Erdal Arikan

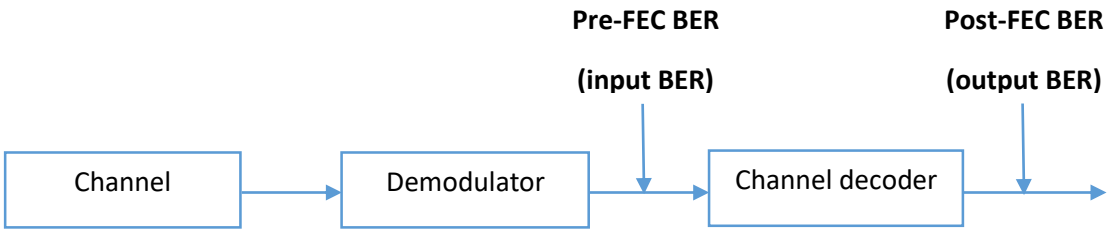
۳- کدهای کانال در ارتباطات نوری

در اولین شبکه‌های نوری از کدگذاری کانال با امکان تصحیح خطا در گیرنده استفاده نشده است. در آن زمان نرخ خطای بیت برابر 10^{-9} قابل قبول بود. کدهای کانال مورد استفاده در ارتباطات فیبر نوری اغلب به چندین نسل تقسیم می‌شوند. این موارد در پاراگراف‌های بعدی توضیح داده خواهد شد.

۳-۱- نسل اول:

اولین استفاده از کدگذاری کانال جهت تصحیح خطا در گیرنده برای سیستم‌های انتقال نوری در سیستم‌های زیردریایی توسعه یافته در اوایل دهه ۱۹۹۰ بود. اولین نسل از کدهای کانال در سیستم‌های مخابرات نوری کدهای قالبیِ خطی با کدگشایی تصمیم‌گیری سخت[۳۷] بود، به عنوان مثال کدهای BCH[۳۸]، کدهای RS[۳۹] یا کدهای همینگ. در این نسل از کدها نسبت داده اضافه شده به داده‌های اصلی، معمولا کمتر یا برابر ۷ درصد است. کدهای این نسل در سیستم‌های ارتباطاتی برای انتقال داده در اقیانوس‌های آرام و اطلس با موفقیت مورد استفاده قرار گرفتند و نرخ انتقال داده تا ۵ گیگابیت در ثانیه را فراهم کردند.

کد RS(255,239) محبوب‌ترین کد این نسل است و در رنج وسیعی از سیستم‌های ارتباطی با مسافت طولانی استفاده شده است. این کد در ITU-T استاندارد G.975 (کدگذاری کانال جهت تصحیح خطا در گیرنده برای سیستم‌های زیردریایی) توضیح داده می‌شود. کدهای رید-سالومون به دلیل ساختار غیربایتری برای کاهش خطاهای انفجاری و متوالی (burst) مناسب هستند. کد RS(255,239) نیز برای کاهش نوسانات نرخ خطای بیت (BER[۴۰]) ناشی از اثر وابستگی قطبش در فیبرهای نوری موفق عمل کرده است. بهره کدگذاری شبکه (NCG[۴۱]) به دست آمده توسط این کد نزدیک به 6db و نسبت داده اضافه شده به داده اصلی در این کد ۶/۶۹ درصد است. مقدار موردنیاز برای نرخ خطای بیت قبل از ورود به کدگشای کانال برابر 6×10^{-5} است. این کد می‌تواند خطاهای متوالی و انفجاری با طول حداکثر ۱۰۲۴ بیت را با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته جای‌گشت کلمه کدها تصحیح کند. پیش‌بینی کلی برای این نسل از کدها بهره کدگذاری نزدیک به 6db با نرخ خطای بیت نهایی (خروجی) برابر 10^{-12} است.



شکل ۱. نرخ‌های خطای بیت قبل و بعد از انجام کدگشایی

[37] Hard decision
[38] Bose-Chaudhuri-Hocquenghem
[39] Reed-Solomon
[40] Bit Error Rate
[41] Net Coding Gain

۳-۲- نسل دوم

کدهای این نسل عمدتا بر اتصال سری کدهای کانال تاکید دارد. بیت‌های اطلاعات ابتدا به وسیله کدگذار داخلی و خروجی آن به وسیله کدگذار خارجی کدگذاری می‌شوند. اتصال کدها به صورت موازی هم قابل اجرا است. این روش‌ها امکان دسترسی به بهره کدگذاری بالاتر با افزایش کمترین فاصله همینگ را فراهم می‌کند. اگر کد داخلی کمترین فاصله همینگ برابر d را داشته باشد و کد بیرونی کمترین فاصله همینگ برابر D: در نتیجه کمترین فاصله همینگِ اتصال این دو کد حداقل d*D است.

قسمت مهم دیگر از این روش‌های کدگذاری، جای‌گشت کلمه‌کدها به همراه تکنیک‌های کدگشایی تکراری و کانولوشنال است. این بهینه‌سازی‌ها امکان پشتیبانی از سیستم‌های انتقال با ظرفیت ۱۰ تا ۴۰ گیگابیت در ثانیه را فراهم می‌کند. در این نسل از کدها از کدگشایی با تصمیم‌گیری سخت استفاده می‌شود و نسبت داده اضافه شده به داده اصلی در این کد پیشنهادی هنوز کمتر یا برابر ۷ درصد است. نرخ خطای بیت مورد نیاز در ورودی این طرح‌ها معمولا نزدیک به 3.8×10^{-3} و در اکثر موارد به بهره کدگذاری شبکه بالاتر از 8db با نرخ خطای بیت خروجی برابر 10^{-15} دست می‌یابد. استاندارد ITU-T G.975.1 (تصحیح خطا در گیرنده برای سیستم‌های زیردریایی DWDM[۴۲] با نرخ بالای انتقال داده) چندین طرح کدگذاری کانال جهت تصحیح خطا برای سیستم‌های ارتباطات نوری با ظرفیت انتقال ۱۰ گیگا و ۴۰ گیگابیت در ثانیه را به صورت کدهای متصل و غیرمتصل توضیح می‌دهد. کدهای کانال استفاده شده در این طرح‌ها کدهای RS، BCH، محصول همینگ تعمیم یافته، کانولوشنال خود متعامد و LDPC هستند. خلاصه‌ای از کدهای معرفی‌شده در استاندارد ITU-T 975.1 در جدول ۱ بیان می‌گردد. هریک از روش‌های کدگذاری بیان شده، الزامات مربوط به پارامترها و ویژگی‌های مختلف مانند توانایی تصحیح، تاخیر، پیچیدگی کدگشایی و ... را تامین می‌کند. به عنوان مثال اتصال کدها معمولا تاخیر را افزایش می‌دهد، بنابراین تعداد کمی روش کدگذاری غیرمتصل در مقاله بیان می‌شود. بقیه طرح‌های کدگذاری کانال که به دومین نسل از کدهای کانال در سیستم‌های نوری مرتبط می‌شوند، RS(255,239)+RS(255,223)، RS(239,223)+RS(255,239)، RS(144,128)+RS(248,232) یا RS(247,239)+RS(255,247) هستند. از کدهای این نسل انتظار می‌رود که خطاهای متوالی و انفجاری با حداقل طول ۱۰۲۴ بیت را تصحیح کند اما این به شدت به کدهای مورد استفاده در هر طرح کدگذاری کانال جهت تصحیح خطا بستگی دارد.

[42] Dense Wavelength Division Multiplexing

FEC scheme	
Conctenated or non-concatenated	**Used FEC code**
Concatenated FEC	Outer code: RS(255,239) Inner code: CSOC (n_0/k_0 = 7/6, J = 8)
Concatenated FEC	Outer code: BCH(3860,3824) Inner code: BCH(2040,1930)
Concatenated FEC	Outer code: RS(1023,1007) Inner code: BCH(2047,1952)
Concatenated FEC (Soft Decision capable)	Outer code: RS(1901,1855) Inner code: Extended Hamming Product Code (512,502) × (510,500)
Non-concatenated FEC	LDPC code
Concatenated FEC	Two orthogonally concatenated BCH codes
Non-concatenated FEC	RS(2720,2550)
Concatenated FEC	Two interleaved extended BCH(1020,988) codes

جدول ۱- مروری بر طرح‌های برتر کدگذاری کانال با امکان تصحیح خطا در گیرنده از استاندارد ITU-T G.975.1

۳-۳- نسل سوم

کدهای کانال با قابلیت تصحیح خطا در گیرنده که برای سیستم‌های انتقال نوری آینده با ظرفیت ۱۰۰ گیگابیت در ثانیه آینده طراحی شده‌اند، متعلق به این نسل از کدهای کانال در ارتباطات نوری هستند. این کدها برای سیستم‌های انتقال با مسافت طولانی و ظرفیت انتقال ۴۰ گیگابیت و حتی ۴۰۰ گیگابیت در ثانیه هم مناسب هستند. اکثر کدهای این نسل کدهای تصحیح خطا با کدگشایی تصمیم گیری نرم هستند. ریاضیات و مزایای کدگشایی با تصمیم‌گیری نرم سال‌هاست که شناخته شده است اما استفاده از آنها در سیستم‌های ارتباطات نوری اکنون به لطف آشکارساز همدوس[۴۳] و پیشرفت‌هایی در فناوری‌های مدارهای مجتمع امکان‌پذیر است. عامل محدودکننده شبکه‌های نوری، نرخ انتقال بسیار بالای آنها بود. کدهای با کدگشایی تصمیم‌گیری نرم از نظر محاسباتی فشرده هستند و بنابراین محدودیت‌ها در ASIC[۴۴] (مدارهای مجتمع با کاربرد خاص) و در سایر فناوری‌ها مانع از اجرای سخت‌افزاری آن‌ها شده بود.

نسبت داده اضافه شده به داده‌های اصلی در کد معرفی شده از ۷ درصد در نسل‌های قبلی به بیشتر از ۲۰ درصد افزایش یافته است (توسط انجمن توسعه و استقرار شبکه‌های نوری). با درنظر گرفتن ۲۰ درصد نسبت داده اضافه شده و کدگشایی با تصمیم‌گیری نرم انتظار می‌رود بهره کدگذاری شبکه حداقل 10-11 dB و نرخ خطای بیت در خروجی برابر 10^{-15} باشد. کدهای کانال عمدتا براساس بهره کدگذاری شبکه آن‌ها مقایسه می‌شوند و برخی از کدهای تصحیح خطا با کدگشایی تصمیم-گیری سخت برای نسل بعدی شبکه‌های نوری نیز مناسب هستند. با این حال در حالت بالا بودن بهره کدگذاری شبکه عملکرد نرخ خطای بیت آنها نسبت به کدهای با کدگشایی تصمیم‌گیری نرم پائین‌تر است. استفاده از آن‌ها در مواردی که پیاده سازی سخت افزار ارزان‌تر (اجزای با پیچیدگی کمتر) مهم‌تر از عملکرد بهتر نرخ خطای بیت است، می‌تواند مناسب باشد. این کدهای کانال با کدگشایی تصمیم‌گیری سخت و بهره کدگذاری بالا می‌تواند به عنوان نسل ۲/۵ کدها برای ارتباطات نوری باشد.

[43] Coherent detection
[44] Application-Specific Integrated Circuit

سیستم‌های انتقال نوری دور برد نیازمند کدهای کانال با امکان تصحیح خطا با بهره کدگذاری شبکه بالا است تا نرخ خطای بیت موردنیاز با OSNR[۴۵] (نسبت سیگنال به نویز) کمتر را تضمین کند. مقدار لازم برای نرخ خطای بیت قبل از انجام کدگشایی (نرخ خطای بیت ورودی) در کدهای نسل سوم نزدیک به 2×10^{-2} است. لازم به ذکر است اکثر کدهای تصحیح خطا عملکرد خود را در کانال‌های ناهمبسته[۴۶] مثل AWGN[۴۷] تضمین می‌کنند. توانایی تصحیح خطای آن‌ها در یک کانال غیرخطی مثل فیبر نوری و همچنین در حضور خطاهای متوالی و انفجاری کمتر می‌شود.

اکثر روش‌های تصحیح خطا در نسل سوم از کدگشایی تکراری استفاده می‌کنند و براساس کدهای LDPC وکدهای محصول توربو (TPC) هستند که به آنها کدهای توربو قالبی (BTC[۴۸]) نیز می‌گویند. هردوی این کدها می‌توانند نزدیک به حد شانون عمل کنند. بخش مهمی از این روش‌های کدگذاری کانال با امکان تصحیح خطا، تکنیک‌هایی برای بهبود عملکرد تصحیح خطا مانند جای‌گشت کلمه‌کدها، کدگشایی تکراری و کدگشایی با تصمیم‌گیری نرم است. کدهای LDPC با کدگشایی تکراری معمولا از نظر عملکرد نرخ خطای بیت بهتر از کدهای TPC هستند اما پیاده‌سازی سخت‌افزاری کدگذار و کدگشا در کدهای LDPC معمولا پیچیده‌تر از TPC است و پیچیدگی آن‌ها هنوز قابل مقایسه است.

کدهای کانولوشنال متصلِ موازی (PCCC[۴۹]) که اولین بار در سال ۱۹۹۳ معرفی شدند و کدهای کانولوشنال متصلِ سری (SCCC[۵۰]) گروه‌هایی از کدهای توربو هستند. این کدها براساس کدهای کانولوشنال هستند و در بسیاری از سیستم‌های بی‌سیم استفاده می‌شوند اما معمولا به دلایل زیر برای سیستم‌های ارتباطات نوری مناسب نیستند: پیچیدگی سخت افزاری کدگشاهای آن‌ها در مقایسه با کدهای LDPC و TPC زیاد است که باعث می‌شود اجرای سخت‌افزاری آن‌ها در شبکه‌های با ظرفیت انتقال بسیار بالا سخت باشد. یک نقطه ضعف قابل توجه در کدهای توربو کانولوشنال این است که در طراحی این کدها، نرخ‌های کدگذاری پائین است این موضوع باعث می‌شود برای شبکه‌های نوری با سرعت بالا غیرعملی شود، چون در ارتباطات نوری با ظرفیت بیش از ۱۰ گیگابیت در ثانیه، کدهایی که نسبت داده اضافه شده به داده اصلی کمتر از ۲۵ درصد باشد، به شدت نامناسب است.

برخی از روش‌های کدگذاری کانال در این نسل، مانند طرح‌های متنوع کدگذاری جای‌گشت کلمه کدها-اتصال کدها[۵۱]، از کدهای BCH، RS و کانولوشنال به عنوان بخشی از طراحی آن‌ها استفاده می‌کنند.

در سال ۲۰۱۰ یک آزمایش میدانی کانال DWDM با ظرفیت انتقال ۱۰۰ گیگابیت در ثانیه در یک لینک ۹۰۰ کیلومتری انجام شد. برای دستیابی به بازدهی طیفی بیشتر، فرمت مدولاسیون پیشرفته‌تری موردنیاز بود. در این آزمایش از مدولاسیون PM-QPSK[۵۲] (که DP-QPSK یا PDM-QPSK هم نامیده می‌شوند) استفاده گردید. در این مدولاسیون ۸ حالته در هر صفحه پلاریزاسیون متعامد داده متفاوتی ارسال می‌شود و می‌تواند به ظرفیت انتقال ۱۰۰ گیگابیت در ثانیه در یک کانال WDM دست یابد. اگرچه مدولاتور و دمدولاتور آن خیلی پیچیده و گران است. فرمت‌های مدولاسیون با نقاط بیشتر برای استفاده در آینده در نظر گرفته می‌شود (مثل M-QAM) اما با افزایش بازدهی طیف، نسبت سیگنال به نویز (SNR) مورد

[45] Optical Signal-to-Noise Ratio
[46] uncorrelated channel
[47] Additive White Gaussian Noise
[48] Block Turbo Codes
[49] Parallel Concatenated Convolutional Codes
[50] Serial Concatenated Convolutional Codes
[51] Interleaved-concatenated coding
[52] Polarization Multiplexed QPSK

نیاز هم افزایش می‌یابد. این الزامات را می‌توان با استفاده از تصحیح خطا در گیرنده تامین کرد. آزمایش میدانی ثابت کرد که ارتقای کانال ۱۰۰ گیگابیت در ثانیه برای سیستم‌های DWDM موجود با ظرفیت انتقال ۱۰ و ۴۰ گیگابیت در ثانیه امکان‌پذیر است در صورتی‌که از کدگذاری کانال برای تصحیح خطا در گیرنده برای رسیدن به نرخ‌های خطای بیت مورد نظر استفاده گردد. روش‌های طراحی شده کدگذاری کانال جهت تصحیح خطا در گیرنده برای سیستم‌های DWDM با ظرفیت انتقال ۱۰۰ گیگابیت در ثانیه در جدول ۲ لیست شده است.

Name	HD	SD	NCG (dB)
Swizzle	•		9.45
Staircase	•		9.41
MTPC	•		9.3
GLDPC	•		9.6
SP-BCH	•		9.4
Two-iter. conc. BCH	•		8.91
UEP-BCH	•		9.35
TPC with shortened BCH comp.	•		> 10
CI-BCH 3	•		9.35/9.90/10.30
CI-BCH 4	•		9.55/10/10.50
TPC	•		9.30/9.80
TPC		•	10.30/11.10/11.40
Conc. QC-LDPC and SPC		4 bits	10.4/11.3
Single QC-LDPC		4 bits	11.3
LDPC-CC.		4 bits	11.5
Non-Conc. FEC		5 bits	11.3
Conc. LDPC and RS		2 bits	9
Spatially-coupled LDPC		4 bits	12
Conc. NB-LDPC and RS		5 bits	10.8
Large-Girth LDPC		4 bits	10.95
NB-QC-LDPC		•	10.8
Triple Conc. FEC		3 bits	10.8

جدول۲- کدهای مدرن و پیشرفته کانال با امکان تصحیح خطا در گیرنده و مقایسه آن‌ها

۴- نتیجه‌گیری

یک بررسی کلی از کدهای تصحیح خطا در این مقاله ارائه گردید. کدهای کانال جهت تصحیح خطا از اولین نسخه مثل کدهای همینگ و معروف‌ترین آن‌ها مثل کدهای رید-سالومون تا مدرن‌ترین کدها مثل توربو و LDPC معرفی و توضیح داده شد. روش‌های مختلف کدگذاری کانال با امکان تصحیح خطا در گیرنده که در شبکه‌های نوری با سرعت بالا استفاده شده‌اند و کارآیی و نیازمندی‌هایشان برای تصحیح خطا در هر نسل از شبکه‌های نوری لیست شده است. چندین طرح کدگذاری کانال با امکان تصحیح خطا در گیرنده با تصمیم گیری نرم و تصمیم گیری سخت که قرار است در شبکه‌های نوری آینده استفاده شوند نیز ارائه شد که طرح‌های مبتنی بر LDPC و TPC محتمل‌ترین گزینه برای این شبکه‌ها هستند.