

INSO
20113-10
1st. Edition
2016



استاندارد ملی ایران
۲۰۱۱۳-۱۰
چاپ اول
۱۳۹۴



دارای محتوای رنگی

فناوری اطلاعات - کدگذاری با بازده زیاد و
تحویل رسانه در محیط‌های ناهمگون
قسمت ۱۰: کدهای تصحیح خطای پیش‌سو
انتقال رسانه گروه متخصصان تصویر
(MPEG) متحرک

Information technology - High efficiency
coding and media delivery in heterogeneous
environments

Part 10: MPEG Media Transport Forward
Error Correction (FEC) codes

ICS:35.040

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

نام مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب یکصد و پنجاه و دومین جلسه شورای عالی اداری مورخ ۹۰/۶/۲۹ به سازمان ملی استاندارد ایران تغییر و طی نامه شماره ۲۰۶/۳۵۸۳۸ مورخ ۹۰/۷/۲۴ جهت اجرا ابلاغ شده است.

تدوین استاندارد در حوزه های مختلف در کمیسیون های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرفکنندگان، صادرکنندگان و وارد کنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان های دولتی و غیر دولتی حاصل می شود . پیش نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی نفع و اعضای کمیسیون های فنی مربوط ارسال می شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادها در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می شود.

پیش نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان های علاقه مند و ذی صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می کنند در کمیته ملی طرح و بررسی و در صورت تصویب ، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می شود . بدین ترتیب ، استانداردهایی ملی تلقی می شوند که بر اساس مفاد نوشته شده در استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می دهد به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین المللی استاندارد (ISO)^۱، کمیسیون بین المللی الکترونیک (IEC)^۲ و سازمان بین المللی اندازه شناسی قانونی (OIML)^۳ است و به عنوان تنها رابط^۴ کمیسیون کدکس غذایی (CAC)^۵ در کشور فعالیت می کند . در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی های خاص کشور ، از آخرین پیشرفت های علمی ، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین المللی بهره گیری می شود .

سازمان ملی استاندارد ایران می تواند با رعایت موازین پیش بینی شده در قانون ، برای حمایت از مصرف کنندگان ، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی ، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی ، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و / یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری نماید. سازمان می تواند به منظور حفظ بازارهای بین المللی برای محصولات کشور ، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه بندی آن را اجباری نماید . همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده کنندگان از خدمات سازمان ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره ، آموزش ، بازرگانی ، ممیزی و صدور گواهی سیستم های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست محیطی ، آزمایشگاه ها و مراکز کالیبراسیون (واسنجی) و سایل سنجش ، سازمان ملی استاندارد ایران این گونه سازمان ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می کند و در صورت احراز شرایط لازم ، گواهینامه تأیید صلاحیت به آن ها اعطا و بر عملکرد آن ها نظارت می کند . ترویج دستگاه بین المللی یکها ، کالیبراسیون (واسنجی) و سایل سنجش ، تعیین عیار فلزات گرانبهای و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است .

1- International Organization for Standardization

2 - International Electrotechnical Commission

3- International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legale)

4 - Contact point

5 - Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

« فناوری اطلاعات - کدگذاری با بازده زیاد و تحویل رسانه در محیط‌های ناهمگون - قسمت ۱۰: کدهای تصحیح خطای پیش‌سو (FEC) انتقال رسانه گروه متخصصان تصویر متحرک (MPEG) »

سمت و / یا نمایندگی

رئیس:

کارشناس تدوین استاندارد سازمان ملی استاندارد
ایران - کارشناس پایگاهداده شرکت برق منطقه‌ای هرمزگان
مشرف، بهنوش (کارشناسی ارشد مهندسی فناوری اطلاعات - شبکه‌های کامپیوتری)

دییر:

کارشناس تدوین استاندارد سازمان ملی استاندارد
ایران - کارشناس تجزیه و تحلیل سیستم شرکت برق منطقه‌ای هرمزگان
ترابی، مهرنوش (کارشناسی ارشد مهندسی فناوری اطلاعات - تجارت الکترونیک)

اعضاء: (اسمی به ترتیب حروف الفبا)

کارشناس تدوین استاندارد سازمان ملی استاندارد
ایران - کارشناس فیبرنوری شرکت برق منطقه‌ای هرمزگان
احمدی، محمد (کارشناسی ارشد مهندسی برق - مخابرات)

معاون سیما صدا و سیمای مرکز خلیج فارس
رئیسی، محسن (کارشناسی ارشد مدیریت اجرایی)

کارشناس مرکز رایانه دانشگاه مازندران
زمانی، کرشنا (کارشناسی ارشد مهندسی فناوری اطلاعات - تجارت الکترونیک)

کارشناس ارشد آموزش برق منطقه‌ای هرمزگان
صادقت، وجیهه (کارشناسی مترجمی زبان انگلیسی)

کارشناس تدوین استاندارد سازمان ملی استاندارد
ایران - کارشناس خدمات ارزش افزوده سازمان
فناوری اطلاعات ایران
موجی، محمود (کارشناسی ارشد مخابرات - رمز)

عضو هیات علمی دانشگاه تکابن
مومنی، حمیدرضا (کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر - هوش مصنوعی)

کارشناس صادرات و واردات اداره کل استاندارد
استان هرمزگان
میرزاده، سکینه (کارشناسی مهندسی کامپیوتر - نرم‌افزار)

فهرست مندرجات

صفحه		عنوان
ب		آشنایی با سازمان ملی استاندارد
ج		کمیسیون فنی تدوین استاندارد
و		پیش‌گفتار
۱	۱	هدف و دامنه کاربرد
۱	۲	مراجع الزامی
۲		اصطلاحات، تعاریف، نمادها و کوتنهنوشت‌ها
۲		اصطلاحات و تعاریف
۳		نمادها و کوتنهنوشت‌ها
۴		قراردادها
۴	۴	مرور
۴	۵	نقاط کد FEC
۵	۶	ویژگی برای کدهای RS
۵		مقدمه
۶		ماتریس مولد
۶	۷	ویژگی برای کدهای S-LDPC
۶		مقدمه
۷		کدهای LDPC ساختار یافته
۷		ساخت ماتریس بررسی توازن
۸		الگوریتم کدبندی
۹		الگوریتم کدگشایی
۹		ماتریس پایه
۱۶	۸	ویژگی کد ۶۳۳۰ و کد RaptorQ LA
۱۶		مقدمه
۱۶	۲-۸	کد ۶۳۳۰
۱۶	۳-۸	RaptorQ LA
۱۸	۱-۳-۸	اولین مرحله کدبندی RaptorQ LA – تولید نماد میانی

ادامه فهرست مندرجات

عنوان		صفحه
۲-۳-۸	دومین مرحله کدبندی RaptorQ لایه آگاه	۲۰
۳-۳-۸	کدگشایی RaptorQ لایه آگاه	۲۰
۹	ویژگی برای کدهای FireFort-LDGM	۲۱
۱-۹	مقدمه	۲۱
۲-۹	کدهای FF-LDGM	۲۲
۱-۲-۹	تعریف	۲۱
۲-۲-۹	عناصر ویژه FF-LDGM	۲۲
۳-۲-۹	ماتریس بررسی توازن طرح FF-LDGM	۲۳
۴-۲-۹	ساخت ماتریس تُنک	۲۳
۵-۲-۹	ساخت ماتریس تُنک رخنه شده	۲۷
۶-۲-۹	طرح تقسیم نماد منبع	۲۹
۷-۲-۹	طرح جایگذاری و عدم جایگذاری ساختاریافته	۲۸
۸-۲-۹	الگوریتم کدبندی کد FF-LDGM	۳۰
۹-۲-۹	الگوریتم کدگشایی کد FF-LDGM	۳۱
۳-۹	کدهای FF-LDGM لایه آگاه (LA FF-LDGM)	۳۲
۱-۳-۹	ویژگی طرح LA FF-LDGM	۳۲
۲-۳-۹	الگوریتم کدبندی	۳۲
۳-۳-۹	الگوریتم کدگشایی	۳۳
۱۰	ویژگی برای الگوریتم‌های کد FEC در استاندارد SMPTE 2022-1	۳۳
	کتابنامه	۳۴

پیش‌گفتار

استاندارد «فناوری اطلاعات - کدگذاری با بازده زیاد و تحویل رسانه در محیط‌های ناهمگون»- قسمت ۱۰: کدهای تصحیح خطای پیش‌سو (FEC) انتقال رسانه گروه متخصصان تصویر متحرک (MPEG)» که پیش نویس آن در کمیسیون فنی مربوط، توسط سازمان ملی استاندارد ایران تهیه و تدوین شده و در سیصد و هشتاد و سومین اجلاسیه کمیته ملی استاندارد فناوری اطلاعات مورخ ۹۴/۱۱/۴ مورد تصویب قرار گرفته است اینک به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ به عنوان استاندارد ملی منتشر می‌شود.

برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در موقع لزوم تجدید نظر خواهند شد و هر گونه پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدید نظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی استفاده کرد.

منبع و مأخذی که در تهیه این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته است به شرح زیر است:

ISO/IEC 23008-10:2015, Information technology - High efficiency coding and media delivery in heterogeneous environments - Part 10: MPEG Media Transport Forward Error Correction (FEC) codes

فناوری اطلاعات - کدگذاری با بازده زیاد و تحویل رسانه در محیط‌های ناهمگون -
قسمت ۱۰: کدهای تصحیح خطای پیش‌سو (FEC)^۱ انتقال رسانه گروه متخصصان
^۲ تصویر متحرک (MPEG)

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تعیین سطح کاربردی کدهای FEC است که این کدها می‌توانند با چارچوب لایه (سطح) کاربردی FEC (AL-FEC)^۳ از استاندارد ISO/IEC 23008-1 استفاده شوند تا تحویل مطمئن را در محیط‌های شبکه قرارداد اینترنت (IP)^۴ و شبکه غیر IP فراهم کنند که در معرض از دستدادن بسته هستند.

۲ مراجع الزامی

مدارک الزامی زیر حاوی مقرراتی است که در متن این استاندارد ملی ایران به آن‌ها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب آن مقررات جزئی از این استاندارد ملی ایران محسوب می‌شود. در صورتی که به مدرکی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدیدنظرهای بعدی آن موردنظر این استاندارد ملی ایران نیست. در مورد مدارکی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدیدنظر و اصلاحیه‌های بعدی آن‌ها مورد نظر است.

استفاده از مراجع زیر برای این استاندارد الزامی است:

2-1 ISO/IEC 23008-1, Information technology — High efficiency coding and media delivery in heterogeneous environments — Part 1: MPEG media transport (MMT)

2-2 IETF RFC 5170, Low Density Parity Check (LDPC) Staircase and Triangle Forward Error Correction (FEC) Schemes, June 2008

2-3 IETF RFC 5510, Reed-Solomon Forward Error Correction (FEC) Schemes, April 2009

2-4 IETF RFC 6330, RaptorQ Forward Error Correction Scheme for Object Delivery, August 2011

2-5 SMPTE2022-1, Forward Error Correction for Real-Time Video/Audio Transport Over IP Networks

1 - Forward Error Correction
2 - Moving Picture Expert Group
3 - Application Layer (Level) FEC
4 - Internet Protocol

۳ اصطلاحات، تعاریف، نمادها و کوتاهنوشت‌ها

۱-۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد اصطلاحات و تعاریف زیر به کار می‌رود:

۱-۱-۳

نرخ کد^۱

نسبت میان تعداد نمادهای منبع و تعداد نمادهای کدبندی است.

۲-۱-۳

نماد کدبندی^۲

یکای داده که توسط فرایند کدبندی تولید شده است.

۳-۱-۳

بلوک نماد کدبندی^۳

مجموعه نمادهای کدبندی که حاصل از فرایند کدبندی بلوک نماد منبع است.

۴-۱-۳

کد ۳FEC^۴

الگوریتمی برای کدبندی داده به‌طوری که جریان داده کدبندی شده نسبت به داده از دست رفته انعطاف‌پذیر است.

۵-۱-۳

شناسانه پایه‌بار FEC^۵

شناسانه‌ای که محتوای بسته انتقال رسانه MMT FEC (MMT) MPEG^۶ را با توجه به طرح شناسایی می‌کند.

۶-۱-۳

نماد جایگزین^۷

نماد کدبندی که یک نماد منبع نیست.

1 - Code Rate

2 - Encoding Symbol

3 - Encoding Symbol Block

4 - 3FEC Code

5 - FEC Payload ID

6 - MPEG Media Transport

7 - Repair Symbol

۷-۱-۳

بلوک نماد جایگزین^۱

مجموعه نمادهای جایگزین که می‌توان برای بازیابی نمادهای از دست رفته منبع به کار برد.

۸-۱-۳

نماد منبع^۲

یکای داده استفاده شده در طی فرایند کدبندی است.

۹-۱-۳

بلوک نماد منبع^۳

مجموعه نمادهای منبع که برای تولید بلوک نماد جایگزین توسط کد FEC استفاده می‌شوند.

۱۰-۱-۳

کد سامان‌مند^۴

هر کد تصحیح خطأ به نحوی که در آن نمادهای منبع قسمتی از نمادهای کدبندی شده خروجی باشند.

۲-۳ نمادها و کوتنهنوشت‌ها

در این استاندارد نمادها و کوتنهنوشت‌های زیر به کار می‌روند:

AL-FEC	Application Layer (Level) Forward Error Correction	لایه (سطح) کاربردی تصحیح خطای پیش‌سو
FEC	Forward Error Correction	تصحیح خطای پیش‌سو
LA	Layer Aware	لایه آگاه
LA-FEC	Layer Aware Forward Error Correction	تصحیح خطای رو به جلو لایه آگاه
LDGM	Low Density Generator Matrix	ماتریس مولد کم چگال
LDPC	Low Density Parity Check	بررسی توازن کم چگال
MMT	MPEG Media Transport	انتقال رسانه MPEG
RS	Reed-Solomon	رید-سولومون
S-LDPC	Structured Low Density Parity Check	بررسی توازن کم تراکم ساختاریافته

1 - Repair Symbol Block

2 - Source Symbol

3 - Source Symbol Block

4 - Systematic Code

۳-۳ قراردادها

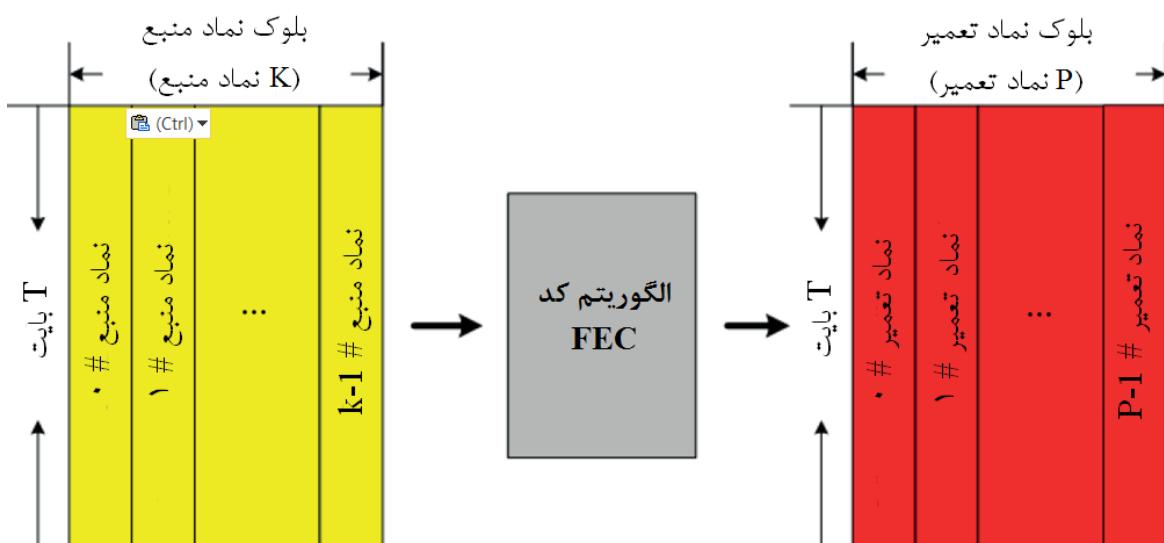
قراردادهای زیر در این مدرک به کاربرده می‌شوند:

- از طرح بازنمایی نمایش عدد به ترتیب طبیعی استفاده می‌شود.

۴ مرور

این استاندارد، سطح کاربردی کدهای FEC را مشخص می‌کند. تمام کدهای مشخص شده در این استاندارد، کدهای سامان‌بند هستند.

این ویژگی شش الگوریتم کد FEC را تعریف می‌کند که هر الگوریتم کد FEC باید بلوک نماد جایگزین را از بلوک نماد منبع تولید کند همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است. بلوک نماد منبع شامل K نماد منبع با اندازه T (بایت) است و بلوک نماد جایگزین شامل P نماد جایگزین با اندازه T (بایت) است.



شکل ۱- ورودی و خروجی کد FEC

۵ نقاط کد FEC

جدول ۱ نقاط کد را برای الگوریتم‌های کد FEC مشخص می‌کند که در این استاندارد تعیین شده‌اند. الگوریتم‌های کد FEC در بندهای ۶ تا ۱۰ مشخص می‌شوند.

جدول ۱- الگوریتم‌های کد FEC و نقطه کد آنها

الگوریتم کد FEC	نقطه کد
محافظت شده برای استفاده ISO کد RS (بند ۶)	۰
کد S_LDPC (بند ۷)	۱
کد ۶۳۳۰ (زیربند ۲-۸)	۲
کد RaptorQ LA (زیربند ۳-۸)	۳
کد FireFort-LDGM (بند ۹)	۴
الگوریتم کد FEC در ۱-۱ SMPTE 2022 (بند ۱۰)	۵
محافظت شده برای استفاده ISO	۶
	۷ - ۲۵۵

یادآوری- هنگامی که یکی از الگوریتم‌های کد FEC که در این ویژگی تعیین شده، برای چارچوب MMT AL-FEC استفاده شود، فیلد fec_code_id_for_repair_flow مطابق با تعریف پیوست c.6 در استاندارد ISO/IEC 23008-1:2014 متناظر خود مطابق با جدول ۱ تنظیم می‌شود.

۶ ویژگی برای کدهای RS

۱-۶ مقدمه

در این بند، نوشتاری‌های^۱ زیر استفاده می‌شوند:

- K: تعداد نمادهای منبع در بلوک نماد منبع
- P: تعداد نمادهای جایگزین در بلوک نماد جایگزین
- A = [I;A]: ماتریس مولد سامان‌بند برای کد RS [K+P,K]-RS که I ماتریس همانی از مرتبه K است و یک ماتریس PxK است.

برای کد RS A(N,K) همینگ^۲، N-K+1 است. کد RS به این معنی بهینه است که کمینه فاصله بیشینه مقدار ممکن را برای کد خطی در اندازه (N,K) دارد؛ این با عنوان حد سینگلتون^۳ شناخته شده است. چنین کدی نیز یک کد جداشدنی با حداکثر فاصله (MDS)^۴ نیز نامیده می‌شود.

بند ۸ از استاندارد IETF RFC5510 ویژگی کامل کد RS را برای کانال حذف ارائه می‌دهد و به‌ویژه زیربند ۱-۲-۸ از استاندارد IETF RFC5510 اصل کدبندی را برای الگوریتم کدبندی RS نشان می‌دهد. ماتریس مولد G کد RS را به‌طور کامل مشخص می‌کند. در این ویژگی، فقط مورد را هنگامی مشخص می‌کند که $m=8$ است و ماتریس مولد در زیربند ۲-۶ نشان داده شده است. بنابراین بلوک نماد کدبندی باید از بلوک نماد منبع توسط ماتریس مولد داده شده در زیربند ۲-۶ تولید شود و این کد FEC باید خروجی بلوک نماد جایگزین از بلوک نماد کدبندی باشد.

1 - Notations

2 - Hamming

3 - Singleton

4 - Maximum Distance Separable

۲-۶ ماتریس مولد

ماتریس مولد G به شکل $G=[I;A]$ است که I ماتریس همانی با اندازه K است و A ماتریس $K \times P$ است، ریشه چند جمله‌ای α است که اولین چند جمله‌ای با درجه ۸ $(K+P) \leq 255$ است که در زیربند ۱-۸ از استاندارد IETF RFC5510 داده شده است. عناصر غیر صفر فیلد محدود $GF[2^8]$ توسط بایت‌ها (گروه ۸ بیتی) نشان داده می‌شوند که از نمایش پایه چند جمله‌ای استفاده می‌گردد و از $(\alpha^7, \alpha^6, \alpha^5, \alpha^4, \alpha^3, \alpha^2, \alpha, 1)$ به عنوان مبنای استفاده می‌شود. ریشه α نیز به صورت $\alpha = 00000010$ نشان داده می‌شود. برای کد RS مشخص شده در این ویژگی، ماتریس A ماتریس کوچی^۱ است که باید در اینجا داشته باشد:

$$A_{i,j} = 1 / [x_i + y_j] \text{ for } 0 \leq i < K \text{ and } 0 \leq j < P$$

که y_j, x_i عناصری در $GF(2^8)$ هستند و این طور تعریف می‌شوند:

$$y_j = \alpha^j \quad \text{و} \quad x_i = \alpha^{254-i}$$

بنابراین، ماتریس A تعیین می‌شود با:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{x_0 + y_0} & \frac{1}{x_0 + y_1} & \dots & \frac{1}{x_0 + y_{p-2}} & \frac{1}{x_0 + y_{p-1}} \\ \frac{1}{x_1 + y_0} & \frac{1}{x_1 + y_1} & \dots & \frac{1}{x_1 + y_{p-2}} & \frac{1}{x_1 + y_{p-1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{x_{k-2} + y_0} & \frac{1}{x_{k-2} + y_1} & \dots & \frac{1}{x_{k-2} + y_{p-2}} & \frac{1}{x_{k-2} + y_{p-1}} \\ \frac{1}{x_{k-1} + y_0} & \frac{1}{x_{k-1} + y_1} & \dots & \frac{1}{x_{k-1} + y_{p-2}} & \frac{1}{x_{k-1} + y_{p-1}} \end{bmatrix}$$

یادآوری - هر ماتریس فرعی ماتریس کوچی معکوس پذیر است.

۷ ویژگی برای کدهای S-LDPC

۱-۷ مقدمه

کد LDPC کد بلوك خطی است که توسط ماتریس بررسی توازن آن تعریف شده است. در این ویژگی، از مورد ویژه کدهای LDPC به نام کدهای S-LDPC استفاده می‌کنیم که الگوریتم کدبندی مؤثری دارد و به عنوان کد FEC در استانداردسازی‌ها از قبیل استاندارد IEEE 802.11n و 802.16e انتخاب می‌شود.

در این مدرک، از نوشتاری‌های زیر استفاده می‌کنیم:

K : تعداد نمادهای منبع در بلوك نماد منبع.

K' : تعداد نمادهای منبع در بلوك نماد منبع توسعه یافته.

P : تعداد نمادهای جایگزین در بلوك نماد جایگزین.

P' : تعداد نمادهای جایگزین در بلوك نماد جایگزین توسعه یافته.

— S(i): نماد i -امین منبع در بلوک نماد منبع ($K \leq i < 0$) که می‌توان به صورت بردار ستون دوتایی با طول $8T$ یا بردار ستون با طول T برروی $GF(2^8)$ نشان داد.

— R(i): نمادهای i -امین جایگزین در بلوک نماد جایگزین ($P \leq i < 0$) که می‌توان به صورت بردار ستون دوتایی با طول $8T$ یا بردار ستون با طول T برروی $GF(2^8)$ نشان داد.

— H: ماتریس بررسی توازن تُنک کد S-LDPC

۲-۷ کدهای LDPC ساختاریافته

در این بند، کدهای S-LDPC توسط ماتریس‌های بررسی توازن توصیف می‌شوند که شامل ماتریس‌های جایگشت دورانی یا ماتریس صفر است.

Q ماتریس جایگشت $L \times L$ است که نشان داده می‌شود با:

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

توجه شود که Q^i تنها ماتریس جایگشت دورانی است که ماتریس همانی I را i دفعه برای هر عدد صحیح i , $0 \leq i < L$ به سمت راست جابجا می‌کند. برای سادگی نوشتار، Q^∞ نشان‌دهنده ماتریس صفر است: H را حاصل ضرب ماتریس Q^k در Q^{p-k} قرار دهید که تعریف شده است با:

$$H = \begin{bmatrix} Q^{a_{0,0}} & Q^{a_{0,1}} & \dots & Q^{a_{0,k+p-2}} & Q^{a_{0,k+p-1}} \\ Q^{a_{1,0}} & Q^{a_{1,1}} & \dots & Q^{a_{1,k+p-2}} & Q^{a_{1,k+p-1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Q^{a_{p-1,0}} & Q^{a_{p-1,1}} & \dots & Q^{a_{p-1,k+p-2}} & Q^{a_{p-1,k+p-1}} \end{bmatrix}$$

که p و k به ترتیب توسط تعیین می‌شوند و $p = K/L$ و $k = K' / L$ است. اگر $a_{i,j} \in \{0, 1, \dots, L-1, \infty\}$ باشد، موقعیت 1 ‌ها در اولین سطر از i -امین بلوک سطر

$$H = [Q^{a_{i,0}} \dots Q^{a_{i,k+p-1}}]$$

ثابت باشند، آنگاه موقعیت 1 ‌ها در H به طور انحصاری تعیین می‌شوند.

۳-۷ ساخت ماتریس بررسی توازن

برای کدبندی مؤثر، قسمت توازن H در ماتریس به طور تقریبی پایین مثلثی را با شرایط بیشتر به شرح زیر محدود می‌کند:

$$H = [H_I \quad H_P] = \begin{bmatrix} Q & I & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & I & I & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & I & \dots & 0 & 0 \\ H_I & I & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & I & I \\ Q & 0 & 0 & \dots & 0 & I \end{bmatrix}$$

در اولین بلوک ستون H_P , I فقط در $\text{Ceil}(p/2)-1$ -امین بلوک سطر $(H\text{ceil}(p/2)-1)$ قرار می‌گیرد که $\text{ceil}(x)$ کوچکترین عدد صحیحی است که کمتر از x نیست.

BM ماتریس اصلی است که ۴۰۰ بلوک ستون و ۲۰ بلوک سطر با $L=16$ دارد، یعنی ماتریس BM دارای ۶۴۰۰ ستون و ۳۲۰ سطر است. هر بلوک ستون و بلوک سطر در BM به ترتیب به‌طور دقیق ۷ و ۱۶ ماتریس جایگشت دورانی با اندازه ۱۶ دارد. قسمت باقیمانده BM با ماتریس‌های صفر در اندازه ۱۶ پر می‌شود. i -امین بلوک سطر در BM را می‌توان به صورت دنباله‌ای از جفت‌های $(t_{i,j}, e_{i,j})$ نشان داد که $t_{i,j}$ نمایه بلوک ستون است که متناظر با j -امین ماتریس جایگشت دورانی است و $e_{i,j}$ نمای آن است. ماتریس BM مقادیر مختلف P و K را با روش‌هایی به نام مقیاس‌گذاری پایین و تفکیک سطر پشتیبانی می‌کند. ماتریس نهایی به عنوان H برای فرایند کدبندی استفاده می‌شود.

برای پشتیبانی بهتر از بلوک‌های نماد منبع کوتاه، ماتریس BM توسط ضریب مقیاس‌گذاری S_1 کوچک می‌شود. ماتریس نهایی از ماتریس‌های جایگشت دورانی و ماتریس‌های صفر در اندازه $S_1 / 16$ تشکیل می‌شود، یعنی $S_1 / S_2 = 6400$ ستون و $S_2 / S_1 = 320$ سطر دارد. ضریب مقیاس‌گذاری را می‌توان به صورت $S_1 = 2^a$ به دست آورد که a بزرگترین عدد صحیح مطابق با $2^a / 16 \leq K$ است. توجه شود که ماتریس نهایی را می‌توان به صورت دنباله‌ای از جفت‌های $(t_{i,j}, e_{i,j} \bmod 16) / S_1$ نشان داد زیرا که اندازه ماتریس‌های جایگشت دورانی و ماتریس‌های صفر از ۱۶ به S_1 کم می‌شوند.

همان‌طور که در بالا عنوان شد، ماتریس BM پس از مقیاس‌گذاری کم، $S_2 / S_1 = 320$ سطر دارد. این بدین معناست که تعداد نمادهای P حداقل $S_2 / 320$ است. برای پشتیبانی مقادیر بزرگتر P ، ماتریس BM را توسط تفکیک سطرهای آن توسعه می‌دهیم. در این فرایند، هر بلوک سطر به S_2 بلوک سطر تفکیک می‌شود. برای طول بلوک نماد جایگزین داده شده P و ضریب مقیاس‌گذاری S_1 ، ضریب تفکیک سطر S_2 را می‌توان این‌طور به دست آورد: $S_2 = \text{ceil} (p / (320 / S_1))$.

ماتریس H از ماتریس BM به دست می‌آید. $BM_i = \{(t_{i,0}, e_{i,0}), (t_{i,1}, e_{i,1}), \dots, (t_{i,139}, e_{i,139})\}$ دنباله منظمی از جفت‌های $(t_{i,j}, e_{i,j})$ است که i -امین بلوک سطر BM را نشان می‌دهد. S_1 و S_2 به ترتیب ضریب مقیاس‌گذاری و ضریب تفکیک سطر هستند. آنها به‌طور انحصاری توسط K و P تعیین می‌شوند. سپس $(S_2 \times i + j) - \text{Ceil}(p/2)$ -امین بلوک سطر H را می‌توان به شرح زیر نشان داد:

$$T_{(S_2 \times i) + j} = \{(t_{i,k}, e_{i,k} \bmod (16 / S_1)) \mid k \bmod (S_2) = (S_2 - 1 - j), 0 \leq k < 140\}$$

توجه شود که ماتریس H دارای ۴۰۰ بلوک ستون و $20 \times S_2$ بلوک سطر با $L = 16 / S_1$ است، یعنی $(S_2 \times 320 / S_1)$ سطر دارد.

سرانجام، ماتریس بررسی توازن H توسط تقویت ماتریس H_p با اندازه مناسب به ماتریس H به دست می‌آید. ماتریس H دارای $20 \times S_2 + 400$ بلوک ستون و $S_2 \times 20$ بلوک سطر با $L = 16 / S_1$ است یعنی، H شامل $(S_1 / S_2 + S_2 \cdot 320) \times (S_1 / S_2 \cdot 320)$ ستون و سطر است.

۴-۷ الگوریتم کدبندی

کدبندی کد S-LDPC بر اساس ماتریس بررسی توازن $'$ در $p' \times L'$ به شرح زیر انجام می‌شود:

$$\begin{aligned} H &= [H_I \quad H_P] \\ &= \begin{bmatrix} Q & I & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & I & I & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & I & \cdots & 0 & 0 \\ H_I & I & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & I & I \\ Q & 0 & 0 & \cdots & 0 & I \end{bmatrix} \end{aligned}$$

که $p' = S_2 \times 320 / S_1$ و $k' = 400$ است. این ماتریس، $L' = 16 / S_1$ سطر دارد.
به شکل زیر تقسیم می‌شود:

$$H = \begin{bmatrix} A & B & T \\ C & D & E \end{bmatrix}$$

که $A \in \mathbb{R}^{k' \times L}$ در $L \times L$ است، $B \in \mathbb{R}^{(p'-1) \times L}$ در $L \times L$ است، $C \in \mathbb{R}^{L \times L}$ در $L \times L$ است، $D \in \mathbb{R}^{L \times L}$ در $L \times L$ است و $E \in \mathbb{R}^{(p'-1) \times L}$ در $L \times L$ است. کلمه کدی است که توسط H مشخص می‌شود، یعنی $HC^T = 0^T$ که S قسمت سامان‌بند است، p_1 و p_2 به ترتیب قسمت‌های توازن هستند که به ترتیب به طول L و $L \times (p'-1)$ هستند. یعنی $s = [S(0), \dots, S(k'-1)]$ است. $r_2 = [R(0), \dots, R(L-1)]$ و $r_1 = [(0), \dots, R(L-1)]$ که توجه شود که $r_2 = [R(0), \dots, R(L-1)]$ نشان‌دهنده نمادهای منبع خالی $K'-K$ هستند که تمام بیت‌هایشان به صفر تنظیم و ارسال نمی‌شوند. همچنین $R(P), \dots, R(P'-1)$ نشان‌دهنده نمادهای جایگزین هستند که مقادیر آنها محاسبه می‌شود اما در بلوک نماد جایگزین متناظر قرار نمی‌گیرند.

سپس عملیات‌های جزء به جزء برای کدبندی کد S-LDPC تعریف شده توسط H به شرح زیر است:
بنابراین، هنگامی که بلوک نماد منبع s ، ورودی است، این کد FEC باید خروجی بلوک نماد جایگزین باشد که مطابق با معادله $HC^T = 0^T$ است.

۵-۷ الگوریتم کدگشایی

کدهای S-LDPC مجموعه‌ای از کدهای LDPC است. بنابراین هر الگوریتم کدگشایی برای کدهای معمولی LDPC را می‌توان بدون هیچ تغییری به کار برد. ملاحظات الگوریتم کدگشایی کدهای LDPC را می‌توان در استاندارد IETF RFC5170 پیدا کرد.

۶-۷ ماتریس پایه

کدهای S-LDPC را می‌توان توسط ماتریس پایه BM و الگوریتم‌ها به‌طور کامل توصیف کرد تا ضریب مقیاس و ضریب تقسیم سطر را محاسبه کنند. i -امین بلوک سطر از BM را می‌توان به صورت دنباله‌ای از جفت‌های $\{(t_{i,0}, e_{i,0}), (t_{i,1}, e_{i,1}), \dots, (t_{i,139}, e_{i,139})\}$ نشان داد که $t_{i,j}$ شاخص بلوک ستون است که متناظر با j -امین ماتریس جایگشت دورانی است و $e_{i,j}$ نمای آن برای $0 \leq j \leq 140$ است.

$T_0 = \{(1,8), (2,8), (3,10), (5,12), (6,8), (7,12), (9,8), (12,4), (14,12), (15,0), (19,0), (20,9), (26,4), (34,8), (35,1), (38,0), (45,13), (46,0), (48,13), (56,9), (57,3), (62,1), (63,8), (71,12), (75,8), (77,3), (78,2), (82,13), (83,13), (85,9), (88,1), (90,15), (92,4), (93,12), (97,0), (99,15)\}$

(104,5), (107,14), (110,13), (111,15), (116,9), (117,7), (120,9), (121,8), (125,15), (127,14), (128,15), (129,9), (131,5), (134,12), (150,12), (152,13), (156,1), (158,9), (159,13), (161,7), (163,5), (164,4), (165,13), (168,11), (171,9), (172,12), (175,12), (177,13), (180,5), (185,9), (193,1), (194,8), (195,9), (199,3), (200,9), (202,9), (204,3), (207,13), (212,13), (213,1), (214,13), (217,3), (223,13), (224,14), (226,10), (227,5), (228,7), (232,5), (236,14), (240,7), (241,7), (245,9), (250,12), (251,5), (255,5), (260,5), (267,4), (268,4), (272,4), (273,4), (275,9), (276,6), (278,5), (284,8), (288,1), (289,6), (291,2), (292,4), (297,12), (299,4), (302,4), (309,5), (310,4), (311,3), (312,5), (326,0), (330,10), (334,9), (335,4), (337,1), (338,6), (340,14), (342,10), (343,1), (347,4), (349,9), (350,1), (351,4), (357,14), (361,8), (364,0), (365,12), (367,6), (369,2), (373,4), (375,12), (376,12), (377,0), (379,0), (383,0), (384,1), (388,4), (389,0), (391,3)}

T1 = {(2,4), (5,0), (8,9), (10,8), (12,8), (13,4), (14,8), (17,1), (23,12), (24,13), (29,9), (30,12), (33,9), (37,4), (45,0), (46,12), (47,8), (56,4), (60,0), (65,13), (73,13), (77,13), (78,12), (81,13), (89,12), (94,5), (99,5), (100,9), (102,9), (107,4), (111,5), (112,13), (117,4), (125,0), (127,12), (128,5), (133,12), (134,1), (136,1), (137,0), (138,12), (141,12), (143,4), (155,0), (157,12), (158,9), (160,0), (161,0), (163,8), (169,9), (170,12), (174,8), (176,4), (177,4), (178,8), (180,8), (182,8), (186,12), (187,8), (188,8), (189,8), (191,8), (192,1), (196,0), (198,8), (199,8), (200,0), (202,1), (204,4), (207,8), (210,1), (214,4), (217,2), (221,9), (224,0), (226,12), (228,9), (233,1), (236,8), (239,0), (241,0), (246,1), (249,1), (251,5), (256,8), (257,9), (259,9), (263,0), (264,1), (266,0), (267,1), (270,5), (271,9), (280,8), (282,0), (285,12), (286,1), (291,0), (292,8), (295,5), (302,12), (305,12), (306,9), (308,5), (309,4), (311,1), (312,13), (315,13), (316,1), (321,12), (322,5), (323,1), (324,5), (327,13), (328,5), (338,1), (342,12), (343,5), (346,13), (347,5), (349,0), (356,13), (361,1), (363,5), (367,5), (369,5), (372,5), (373,13), (374,4), (376,1), (380,4), (382,1), (387,5), (389,13), (390,5), (392,5), (393,1), (394,8), (395,9), (397,5)}

T2 = {(1,2), (2,14), (3,3), (5,3), (6,10), (12,11), (13,3), (15,0), (19,13), (20,13), (21,6), (22,11), (33,10), (36,13), (38,6), (39,5), (40,12), (43,0), (44,3), (46,15), (47,3), (48,13), (51,7), (53,14), (57,15), (58,8), (59,6), (61,11), (70,7), (71,10), (73,10), (74,14), (79,1), (85,7), (86,14), (88,5), (89,5), (90,2), (92,10), (95,6), (99,14), (103,4), (104,6), (105,6), (111,10), (115,8), (128,3), (130,12), (133,4), (136,2), (139,6), (142,11), (145,14), (155,0), (156,14), (160,7), (168,5), (171,10), (176,12), (182,12), (183,8), (185,12), (186,9), (191,6), (193,15), (199,10), (204,0), (205,8), (207,5), (213,1), (217,4), (224,0), (226,0), (228,0), (230,4), (233,0), (234,12), (236,1), (238,8), (239,1), (240,3), (246,13), (247,12), (248,1), (249,8), (250,4), (251,1), (253,9), (254,0), (258,5), (262,3), (264,7), (268,6), (270,4), (271,1), (274,8), (277,5), (280,2), (286,11), (287,1), (293,3), (294,12), (296,7), (297,5), (299,7), (301,7), (302,11), (304,11), (306,3), (308,11), (309,15), (314,15), (315,8), (316,14), (317,10), (322,10), (325,11), (326,8), (327,15), (331,11), (333,1), (334,5), (335,9), (345,0), (348,13), (351,9), (358,9), (360,1), (362,15), (363,3), (371,3), (375,9), (376,7), (378,2), (379,1), (387,1), (389,11), (394,13), (396,15), (399,13)}

T3 = {(2,4), (3,15), (4,7), (7,13), (9,8), (14,6), (15,5), (18,3), (22,4), (29,12), (30,7), (32,4), (36,14), (40,5), (50,5), (53,1), (54,11), (55,8), (60,8), (64,15), (68,12), (70,5), (71,9), (75,14), (77,2), (81,5), (85,10), (90,8), (91,11), (95,9), (96,11), (100,8), (101,5), (103,0), (104,4), (105,15), (107,13), (108,13), (109,13), (110,5), (111,9), (113,9), (116,0), (121,12), (123,12), (124,13), (131,9), (132,11), (133,1), (136,12), (137,11), (140,9), (144,12), (145,9), (149,0), (152,6), (155,7), (159,5), (162,0), (164,12), (166,6), (167,1), (168,9), (171,12), (174,5), (176,0), (180,5), (181,6), (182,0), (183,10), (184,11), (188,1), (189,1), (190,9), (197,6),

$(199,15), (203,6), (209,11), (213,15), (215,6), (223,3), (232,0), (234,6), (235,2), (240,10), (244,2), (247,6), (248,0), (253,6), (254,2), (255,2), (256,0), (257,10), (260,7), (265,2), (266,4), (274,0), (278,0), (280,4), (281,2), (286,2), (288,10), (291,2), (292,10), (294,1), (295,4), (297,0), (299,15), (301,2), (304,2), (306,3), (314,7), (321,1), (322,11), (325,10), (327,0), (334,11), (336,6), (338,8), (346,3), (348,3), (351,9), (352,8), (353,1), (355,11), (364,10), (366,10), (369,15), (370,14), (371,15), (373,13), (374,6), (376,15), (377,14), (382,5), (386,3), (387,2), (389,7), (396,8), (399,10)\}$

$T4 = \{(0,0), (1,5), (5,9), (16,9), (17,1), (18,0), (19,0), (21,1), (26,0), (28,9), (29,8), (31,1), (34,7), (36,1), (37,5), (39,0), (40,15), (44,13), (50,9), (55,0), (56,0), (58,7), (67,15), (72,11), (73,1), (74,11), (76,5), (78,3), (80,3), (81,2), (84,0), (87,8), (89,5), (93,7), (96,2), (99,7), (107,14), (108,2), (110,0), (114,3), (117,1), (118,10), (119,10), (120,15), (123,11), (125,11), (128,10), (132,0), (138,10), (140,3), (143,2), (147,2), (152,14), (155,13), (164,13), (167,6), (171,2), (173,11), (174,8), (175,10), (180,7), (181,4), (182,14), (188,10), (191,2), (195,10), (199,9), (200,3), (204,14), (206,15), (207,0), (208,12), (211,6), (212,7), (213,7), (217,0), (218,15), (222,4), (223,2), (228,12), (230,9), (231,12), (241,6), (242,14), (249,15), (253,6), (254,1), (255,8), (256,1), (257,6), (259,11), (261,7), (262,12), (264,7), (265,15), (268,8), (269,12), (275,15), (277,11), (278,15), (280,11), (285,3), (286,13), (289,11), (293,13), (295,0), (297,3), (298,4), (300,12), (307,11), (311,1), (315,1), (316,6), (318,5), (320,4), (324,5), (326,9), (338,8), (339,13), (342,13), (346,5), (347,13), (348,7), (356,4), (357,2), (358,13), (359,2), (360,5), (361,0), (363,1), (364,8), (365,0), (368,13), (371,3), (375,8), (385,1), (388,3), (389,0), (393,5), (398,11)\}$

$T5 = \{(1,14), (6,9), (8,11), (12,3), (18,10), (19,14), (21,9), (24,15), (25,10), (31,14), (34,11), (35,10), (37,8), (38,6), (40,7), (41,9), (43,3), (44,4), (45,14), (49,7), (53,7), (59,5), (61,13), (65,0), (72,11), (76,10), (83,15), (84,5), (86,11), (88,12), (101,5), (105,14), (108,5), (109,6), (113,6), (114,14), (115,13), (117,3), (119,0), (121,8), (122,7), (124,4), (129,1), (131,14), (132,1), (135,9), (136,8), (137,10), (139,3), (141,8), (142,15), (144,0), (148,12), (151,7), (154,11), (159,12), (166,1), (169,15), (175,3), (176,0), (183,13), (184,1), (186,3), (193,13), (194,3), (195,4), (196,3), (197,4), (205,4), (209,15), (210,0), (214,5), (217,10), (218,14), (219,4), (222,3), (223,0), (225,5), (227,9), (228,9), (229,9), (232,5), (235,5), (236,3), (241,1), (243,8), (245,0), (247,4), (248,5), (250,0), (262,8), (263,8), (266,5), (267,1), (272,1), (274,10), (275,1), (278,15), (281,0), (282,8), (287,15), (288,14), (291,14), (294,10), (298,1), (300,11), (303,10), (308,2), (309,10), (313,8), (317,0), (319,0), (325,2), (327,1), (329,2), (332,4), (333,2), (335,2), (336,0), (338,11), (350,10), (351,4), (353,3), (354,5), (355,5), (356,10), (359,6), (360,1), (362,15), (363,2), (366,2), (368,14), (373,6), (376,10), (378,12), (379,6), (383,1), (385,7), (388,14), (398,15)\}$

$T6 = \{(4,8), (6,3), (7,10), (11,15), (13,11), (15,3), (16,11), (22,5), (27,3), (28,12), (31,12), (33,1), (34,13), (36,13), (38,13), (42,8), (43,12), (44,1), (54,14), (55,11), (57,12), (69,9), (70,1), (71,9), (73,14), (75,9), (76,8), (78,10), (80,8), (81,1), (84,9), (86,10), (87,13), (88,13), (93,0), (95,11), (101,0), (102,1), (103,1), (104,9), (107,1), (110,4), (111,1), (112,9), (114,9), (117,2), (119,1), (120,1), (122,8), (130,1), (131,1), (134,4), (135,10), (138,9), (139,15), (147,0), (149,3), (150,11), (153,2), (155,10), (165,13), (168,7), (170,11), (171,3), (173,8), (180,11), (185,3), (188,0), (193,10), (196,3), (198,1), (201,10), (203,11), (205,7), (207,14), (208,13), (211,4), (215,2), (216,7), (217,8), (220,3), (227,14), (229,5), (231,5), (233,14), (234,0), (237,6), (241,6), (242,6), (248,0), (258,6), (261,3), (262,14), (263,5), (264,2), (266,1), (268,12), (269,6), (273,14), (279,2), (283,14), (287,15), (288,0), (290,6), (292,2), (294,1), (295,10), (296,4), (300,4), (302,11), (308,12), (313,10), (317,6), (321,14), (325,1), (326,0), (332,10), (336,4), (341,10), (342,7), (343,7), (355,13), (356,1),\}$

$\{(358,11), (365,7), (369,9), (370,3), (371,3), (377,2), (385,2), (387,4), (388,2), (390,7), (391,8), (392,5), (395,2), (396,1), (397,5), (398,7), (399,3)\}$

$T7 = \{(0,15), (1,1), (3,6), (4,8), (10,9), (15,15), (17,10), (18,14), (20,9), (22,8), (25,14), (27,14), (31,4), (33,10), (36,3), (38,14), (41,10), (45,11), (48,0), (52,14), (55,10), (59,3), (62,12), (63,14), (64,3), (66,14), (69,0), (74,6), (77,5), (80,2), (82,4), (84,0), (87,6), (99,8), (103,2), (107,13), (108,10), (110,1), (118,12), (121,2), (122,7), (125,3), (129,6), (131,7), (132,7), (137,10), (138,6), (139,1), (142,15), (145,7), (146,3), (147,5), (148,11), (151,2), (153,9), (154,10), (157,0), (165,3), (168,0), (173,11), (175,15), (179,9), (183,8), (184,3), (185,1), (186,2), (187,2), (189,6), (194,9), (196,4), (203,11), (204,3), (205,11), (206,5), (209,1), (215,6), (219,1), (222,1), (224,0), (225,1), (226,1), (229,3), (231,7), (232,13), (234,0), (237,2), (238,2), (242,10), (243,11), (245,5), (247,1), (248,9), (250,2), (251,3), (253,0), (255,9), (256,4), (259,1), (262,9), (263,0), (267,3), (268,1), (269,0), (270,9), (271,8), (276,9), (281,9), (285,9), (286,10), (289,11), (290,8), (292,5), (293,10), (297,1), (306,0), (308,1), (309,1), (314,0), (317,3), (318,12), (320,13), (322,12), (324,12), (328,9), (336,12), (339,13), (340,7), (341,0), (346,15), (347,15), (348,11), (360,10), (367,0), (368,5), (372,11), (375,3), (378,6), (382,4), (390,6), (396,11)\}$

$T8 = \{(2,8), (3,13), (8,11), (11,9), (16,14), (24,3), (25,1), (26,4), (28,12), (31,4), (33,5), (34,2), (39,4), (44,0), (50,3), (51,8), (52,14), (54,8), (56,7), (57,2), (58,8), (60,1), (63,12), (64,2), (66,3), (67,1), (68,12), (69,5), (70,7), (72,7), (80,9), (83,12), (90,9), (95,13), (97,3), (98,4), (99,12), (100,8), (101,2), (103,8), (105,2), (108,8), (109,5), (118,4), (119,5), (126,11), (127,5), (130,2), (133,0), (138,9), (140,4), (145,0), (147,1), (149,6), (151,6), (152,14), (156,1), (158,14), (161,4), (162,2), (163,1), (166,1), (169,1), (170,10), (177,2), (178,8), (179,0), (181,2), (186,4), (190,0), (193,3), (196,14), (201,2), (202,1), (203,0), (205,0), (207,11), (209,2), (211,2), (214,3), (227,3), (231,9), (233,9), (239,10), (241,2), (242,6), (243,8), (244,14), (245,13), (247,9), (251,0), (254,8), (257,0), (268,7), (276,10), (277,8), (282,10), (284,10), (285,3), (288,7), (292,4), (295,0), (304,12), (305,14), (307,13), (308,10), (310,7), (312,6), (314,12), (317,14), (318,13), (323,11), (324,11), (328,6), (329,10), (330,11), (335,11), (340,13), (344,14), (345,5), (346,7), (347,6), (350,13), (352,7), (354,3), (355,4), (357,3), (361,14), (365,5), (367,3), (370,12), (372,9), (376,4), (377,7), (380,12), (382,6), (386,2), (389,9), (392,0), (394,7)\}$

$T9 = \{(1,2), (3,11), (4,1), (5,15), (9,7), (10,0), (20,2), (21,2), (25,8), (26,1), (32,6), (33,10), (37,4), (46,2), (53,7), (54,8), (58,3), (62,5), (68,0), (70,0), (72,0), (73,9), (74,3), (80,10), (81,2), (82,10), (84,13), (86,6), (89,0), (91,4), (92,5), (96,10), (97,5), (99,2), (102,13), (111,1), (115,5), (116,5), (118,4), (123,10), (132,6), (138,8), (139,2), (141,7), (143,7), (146,14), (149,2), (152,4), (154,4), (157,3), (158,1), (159,13), (162,0), (167,0), (170,6), (171,4), (172,4), (174,1), (175,1), (177,9), (178,14), (181,4), (184,12), (190,9), (195,8), (196,0), (198,12), (199,0), (200,0), (201,0), (202,12), (204,14), (207,3), (208,5), (216,15), (220,8), (226,0), (229,15), (230,12), (233,6), (235,8), (237,8), (246,15), (247,1), (248,7), (252,10), (255,12), (257,7), (258,3), (263,2), (264,14), (265,11), (267,2), (269,0), (270,8), (271,11), (272,8), (275,10), (279,6), (286,2), (293,0), (296,10), (298,14), (302,2), (307,7), (311,3), (313,15), (316,8), (319,14), (320,2), (330,10), (331,13), (332,8), (333,2), (335,6), (339,9), (340,2), (344,6), (345,10), (346,6), (350,10), (351,10), (362,14), (363,4), (366,14), (367,4), (368,1), (369,2), (373,0), (375,1), (377,3), (378,11), (380,0), (384,11), (387,4), (390,10), (392,3), (394,1), (395,0), (397,11)\}$

$T10 = \{(0,10), (3,2), (4,6), (6,11), (8,0), (9,10), (10,0), (11,4), (13,12), (16,14), (17,0), (18,2), (30,10), (31,6), (34,8), (38,2), (42,7), (43,0), (45,2), (49,0), (50,8), (51,12), (52,6), (53,6),$

(58,10), (60,2), (61,8), (62,6), (67,0), (69,8), (74,2), (79,2), (87,4), (88,0), (91,6), (92,8), (93,2), (97,0), (98,10), (101,14), (104,2), (108,10), (111,10), (112,2), (115,2), (116,10), (122,2), (124,14), (126,8), (129,8), (130,0), (133,10), (135,2), (143,0), (144,8), (145,8), (150,8), (151,10), (156,10), (157,0), (158,10), (159,10), (161,0), (165,8), (170,2), (171,8), (173,4), (174,2), (182,14), (184,2), (191,14), (192,14), (198,4), (204,0), (206,15), (209,2), (216,12), (219,6), (220,6), (222,2), (226,6), (228,2), (232,8), (237,2), (240,14), (244,12), (245,0), (252,14), (253,10), (255,8), (257,10), (258,14), (259,4), (262,8), (267,2), (273,14), (278,6), (279,8), (290,10), (292,2), (296,6), (299,10), (301,2), (303,14), (310,6), (315,0), (319,6), (320,6), (323,8), (324,2), (326,6), (330,4), (331,4), (332,0), (333,8), (336,8), (337,10), (339,0), (340,0), (343,4), (344,4), (349,0), (352,8), (358,8), (366,8), (367,14), (372,0), (376,4), (377,14), (378,12), (379,4), (381,10), (383,12), (388,0), (389,8), (391,8), (393,6), (394,0), (397,12), (399,4)}

T11 = {(4,2), (6,8), (10,10), (13,10), (15,10), (16,2), (18,10), (20,10), (23,6), (30,0), (32,10), (37,2), (39,14), (42,14), (45,0), (48,12), (49,2), (51,7), (52,6), (57,11), (59,11), (61,1), (66,0), (73,3), (75,14), (78,11), (82,3), (83,2), (87,13), (90,10), (92,11), (93,11), (95,1), (96,15), (97,3), (98,5), (106,7), (108,0), (109,3), (113,4), (115,7), (116,1), (119,1), (126,7), (130,14), (131,3), (135,5), (138,1), (142,7), (144,5), (146,9), (147,11), (148,0), (149,1), (150,3), (151,3), (153,3), (154,3), (159,1), (164,9), (166,11), (167,3), (168,3), (169,7), (170,9), (178,3), (180,1), (181,5), (183,1), (186,5), (192,3), (193,3), (197,3), (198,5), (202,3), (203,13), (210,9), (212,9), (213,3), (215,1), (217,1), (218,15), (219,5), (220,3), (221,1), (225,1), (226,3), (227,6), (229,12), (230,8), (231,2), (233,2), (235,10), (238,2), (239,1), (244,6), (246,5), (249,11), (250,9), (256,1), (262,7), (265,2), (275,2), (276,8), (279,14), (280,0), (283,8), (286,1), (291,0), (296,2), (300,2), (303,2), (309,0), (311,0), (312,0), (317,0), (318,12), (319,0), (323,0), (327,0), (329,0), (336,0), (345,8), (348,8), (354,8), (358,8), (359,12), (360,8), (364,0), (367,10), (371,4), (373,0), (374,0), (375,8), (388,1), (390,10), (391,10), (394,2), (397,0), (398,10)}

T12 = {(1,3), (7,3), (8,1), (11,13), (14,2), (16,1), (22,11), (23,0), (24,15), (27,8), (28,9), (30,11), (44,9), (45,7), (46,3), (48,7), (50,3), (59,1), (62,3), (63,3), (64,3), (65,7), (66,7), (70,2), (76,1), (80,3), (82,5), (83,7), (84,9), (85,11), (86,5), (94,11), (97,5), (98,9), (100,15), (101,1), (102,3), (109,0), (112,9), (113,9), (114,7), (117,5), (120,1), (121,1), (123,1), (124,3), (127,11), (128,1), (134,3), (140,9), (141,9), (142,5), (152,1), (160,5), (162,3), (163,9), (165,1), (167,11), (172,5), (176,1), (177,0), (178,1), (179,6), (180,2), (181,1), (185,0), (187,7), (189,0), (190,2), (192,15), (198,6), (202,8), (206,2), (208,10), (218,0), (219,2), (221,4), (224,3), (225,0), (227,6), (233,6), (239,3), (240,2), (241,0), (242,0), (243,6), (249,4), (250,4), (251,8), (252,8), (254,8), (256,0), (259,1), (260,1), (263,4), (265,0), (270,1), (272,0), (273,4), (277,2), (278,2), (284,4), (287,2), (290,2), (293,6), (301,10), (307,10), (311,2), (312,6), (313,12), (316,10), (321,10), (322,12), (323,12), (324,0), (325,0), (330,8), (331,2), (334,10), (335,10), (336,8), (337,10), (341,14), (344,10), (347,10), (349,6), (350,4), (353,8), (355,0), (358,2), (359,12), (360,1), (369,2), (380,4), (383,14), (384,11), (391,3), (392,2), (393,13), (397,3)}

T13 = {(5,3), (7,0), (9,1), (11,11), (12,3), (13,1), (15,1), (23,3), (24,3), (25,3), (27,1), (31,9), (33,9), (35,9), (36,9), (41,11), (42,3), (43,3), (47,1), (48,7), (49,11), (51,13), (52,1), (53,3), (58,5), (65,15), (69,13), (71,1), (81,3), (85,9), (86,9), (88,7), (94,11), (96,3), (97,2), (102,7), (104,15), (106,7), (113,10), (114,2), (115,3), (120,2), (122,1), (123,3), (125,5), (127,1), (129,1), (130,4), (140,3), (142,11), (144,1), (146,3), (147,5), (148,15), (152,3), (154,0), (156,2), (157,9), (160,10), (162,6), (165,12), (166,14), (173,8), (175,8), (176,2), (179,11), (183,6), (190,9), (192,10), (193,4), (195,7), (199,0), (205,2), (206,1), (208,6), (209,0)}

(210,10), (212,2), (213,8), (214,0), (216,10), (218,1), (221,10), (222,0), (223,8), (224,10), (229,10), (230,0), (231,2), (236,2), (243,9), (246,0), (249,13), (261,10), (266,4), (271,0), (273,6), (276,10), (281,6), (282,0), (283,0), (284,8), (289,12), (290,0), (293,2), (298,10), (300,0), (304,8), (305,8), (307,4), (312,0), (314,4), (315,0), (316,2), (318,10), (319,12), (320,8), (325,12), (329,0), (334,1), (338,3), (342,4), (347,9), (350,1), (351,2), (352,2), (353,0), (354,11), (361,9), (364,13), (365,11), (368,9), (371,3), (372,0), (380,3), (382,4), (384,0), (385,1), (386,1), (399,4)}

T14 = {(0,8), (6,0), (12,0), (19,2), (20,0), (25,8), (26,10), (29,0), (30,2), (32,0), (34,0), (40,8), (41,0), (47,0), (49,0), (51,2), (52,2), (54,8), (55,0), (58,2), (60,0), (63,0), (64,0), (66,3), (69,1), (72,8), (75,9), (77,0), (78,0), (79,5), (81,9), (82,12), (87,4), (90,1), (91,15), (92,11), (94,1), (95,0), (100,11), (105,10), (106,10), (109,11), (110,2), (112,15), (115,1), (118,9), (120,3), (124,13), (125,0), (126,15), (132,3), (133,11), (135,3), (140,11), (141,2), (143,9), (145,9), (146,11), (153,7), (155,1), (161,11), (163,7), (167,8), (172,1), (175,15), (178,1), (183,0), (184,8), (186,1), (187,11), (194,3), (197,11), (201,3), (206,3), (208,13), (211,3), (216,3), (219,1), (223,3), (225,11), (235,9), (237,9), (238,3), (240,3), (246,11), (252,9), (259,1), (264,3), (273,2), (274,9), (275,9), (276,5), (277,11), (280,9), (282,9), (287,1), (289,5), (293,9), (294,0), (298,2), (300,3), (301,1), (310,1), (313,0), (315,10), (316,12), (318,0), (319,12), (320,8), (321,10), (322,1), (327,1), (328,2), (330,0), (331,0), (334,2), (337,4), (339,0), (340,2), (359,1), (362,8), (365,5), (368,8), (370,10), (371,1), (372,2), (374,2), (379,1), (381,8), (382,8), (384,4), (386,4), (387,0), (388,4), (391,3), (393,0), (395,2), (396,2), (398,10), (399,0)}

T15 = {(2,2), (4,10), (8,8), (11,0), (13,0), (16,0), (21,8), (26,2), (27,10), (28,2), (29,0), (32,3), (36,0), (38,2), (39,11), (42,1), (51,2), (54,10), (56,0), (59,0), (61,0), (63,1), (65,3), (67,11), (68,0), (71,3), (72,3), (74,10), (79,1), (82,0), (84,8), (87,1), (88,3), (94,8), (102,1), (106,9), (112,11), (116,8), (118,0), (121,11), (124,3), (126,9), (127,1), (131,9), (132,0), (134,1), (135,1), (136,1), (139,1), (140,1), (142,1), (149,1), (150,1), (156,1), (157,1), (158,3), (159,1), (162,11), (163,1), (165,9), (166,2), (172,0), (173,1), (174,3), (179,1), (181,1), (184,1), (185,1), (189,1), (191,3), (194,9), (195,9), (197,0), (201,1), (203,3), (208,1), (209,8), (212,8), (214,3), (215,11), (218,11), (219,8), (221,1), (227,11), (230,3), (232,3), (234,3), (243,9), (244,11), (252,2), (253,1), (260,0), (261,11), (265,9), (271,11), (272,1), (273,1), (281,10), (282,2), (283,9), (285,8), (288,10), (289,8), (291,11), (294,2), (303,3), (306,10), (310,2), (317,2), (318,11), (319,9), (323,3), (329,1), (330,1), (333,2), (337,8), (338,2), (339,2), (341,10), (342,0), (343,2), (344,0), (345,0), (349,10), (350,0), (353,8), (356,0), (359,0), (362,3), (366,8), (370,0), (374,10), (377,0), (379,10), (381,8), (383,8), (384,0), (390,2), (391,8), (395,0)}

T16 = {(7,4), (11,5), (17,3), (19,6), (22,5), (27,6), (29,6), (30,7), (35,14), (42,6), (47,14), (54,4), (55,4), (56,2), (63,1), (64,6), (66,0), (67,2), (71,13), (72,0), (73,0), (75,12), (76,10), (77,4), (79,0), (80,0), (85,7), (89,6), (90,4), (93,6), (94,3), (96,5), (98,4), (100,0), (106,2), (113,14), (116,4), (118,2), (122,2), (126,12), (128,6), (133,6), (136,10), (137,14), (141,2), (144,14), (147,4), (148,2), (150,0), (151,0), (153,14), (155,2), (157,2), (162,2), (163,7), (164,2), (167,1), (169,3), (176,1), (182,12), (185,4), (187,3), (189,0), (190,1), (191,11), (197,1), (203,5), (210,12), (211,0), (212,0), (216,0), (218,3), (220,11), (224,4), (225,7), (228,10), (232,3), (235,8), (236,0), (237,1), (238,9), (244,7), (245,1), (252,0), (256,1), (258,3), (260,7), (261,1), (265,7), (266,1), (269,5), (270,1), (275,3), (276,2), (277,5), (279,0), (280,7), (284,7), (285,9), (288,1), (290,1), (295,7), (297,9), (298,1), (299,3), (300,3), (301,0), (302,1), (303,1), (304,3), (305,1), (308,1), (311,0), (313,1), (315,1), (321,5), (325,2), (326,5), (328,5), (331,10), (332,13), (334,1), (335,7), (337,5), (341,5),

$\{ (344,4), (355,4), (356,5), (357,5), (358,4), (362,6), (366,5), (373,4), (374,4), (381,1), (385,1), (386,13), (395,4), (397,5), (398,6) \}$

T17 = $\{ (0,1), (2,5), (7,2), (12,1), (14,5), (19,1), (21,5), (22,5), (23,7), (24,3), (27,2), (28,9), (32,1), (35,13), (37,1), (39,1), (40,1), (41,0), (43,1), (44,10), (46,1), (47,0), (53,5), (57,1), (62,11), (64,5), (65,5), (68,5), (77,7), (79,1), (83,2), (85,1), (86,4), (91,1), (92,3), (94,4), (95,4), (103,3), (104,0), (105,4), (106,8), (107,5), (109,7), (112,7), (113,2), (119,5), (120,7), (126,1), (135,1), (143,2), (144,4), (145,12), (146,13), (153,5), (154,5), (160,4), (164,6), (168,0), (169,2), (172,0), (177,13), (178,4), (179,7), (188,0), (190,4), (192,8), (194,8), (195,4), (196,0), (200,0), (201,5), (213,11), (215,4), (229,1), (230,4), (231,0), (235,0), (242,4), (243,0), (244,4), (246,6), (247,4), (249,4), (252,4), (253,4), (254,4), (258,0), (264,0), (266,4), (269,7), (271,0), (272,0), (274,4), (281,2), (283,0), (284,0), (287,6), (289,2), (298,7), (299,10), (304,1), (305,3), (306,4), (307,7), (309,6), (320,14), (321,1), (322,7), (327,7), (328,6), (329,2), (331,10), (333,6), (343,0), (345,3), (346,0), (351,1), (352,11), (353,5), (354,2), (357,2), (359,1), (362,0), (363,3), (364,7), (365,6), (368,5), (369,5), (374,0), (378,5), (381,2), (382,7), (383,3), (384,12), (385,6), (386,0), (390,3), (393,3), (396,1), (399,1) \}$

T18 = $\{ (0,2), (9,3), (10,6), (14,2), (17,6), (23,7), (24,7), (26,2), (28,5), (29,12), (35,5), (39,4), (41,5), (43,3), (47,7), (48,3), (49,4), (50,0), (60,2), (61,2), (62,4), (65,0), (66,5), (67,14), (68,2), (69,4), (70,4), (74,4), (75,6), (76,2), (79,2), (89,6), (91,4), (93,6), (98,7), (100,4), (103,4), (106,1), (114,0), (122,4), (123,6), (124,14), (125,14), (128,0), (129,4), (130,4), (134,6), (136,4), (137,4), (143,5), (146,5), (148,4), (150,5), (154,0), (160,4), (161,4), (164,0), (170,4), (173,0), (174,1), (177,4), (182,5), (187,1), (188,6), (191,0), (192,1), (200,7), (202,0), (210,3), (211,9), (215,1), (216,1), (220,0), (221,1), (222,5), (223,3), (225,0), (234,5), (238,0), (239,5), (254,0), (255,5), (257,1), (260,13), (261,7), (267,7), (268,1), (272,5), (274,3), (277,3), (278,5), (279,1), (281,1), (283,6), (285,3), (287,0), (290,1), (294,1), (296,1), (297,1), (303,1), (304,0), (305,5), (307,5), (310,0), (313,2), (314,1), (323,3), (326,1), (328,2), (329,0), (332,1), (337,0), (341,0), (342,3), (343,3), (344,1), (348,1), (349,1), (352,1), (353,2), (354,1), (356,9), (357,0), (360,1), (361,13), (363,1), (366,0), (370,5), (375,0), (378,5), (380,1), (381,4), (385,0), (386,5), (387,4), (392,6), (393,7), (396,5), (398,5) \}$

T19 = $\{ (0,4), (5,12), (8,4), (9,8), (10,12), (14,8), (17,0), (18,10), (20,4), (21,9), (23,13), (25,5), (32,9), (35,12), (37,0), (40,12), (41,8), (42,0), (46,1), (49,1), (50,13), (52,12), (55,9), (56,0), (57,6), (59,14), (60,4), (61,10), (67,0), (68,0), (76,4), (78,6), (83,0), (89,6), (91,8), (96,0), (98,0), (101,8), (102,6), (105,1), (110,2), (114,5), (117,15), (119,1), (121,10), (123,5), (127,15), (129,0), (134,7), (137,9), (139,10), (141,1), (148,13), (149,4), (151,9), (153,4), (156,10), (158,11), (160,1), (161,11), (166,1), (169,12), (172,2), (179,11), (187,6), (188,9), (189,2), (194,5), (197,0), (198,1), (200,7), (201,13), (205,2), (206,13), (210,9), (211,1), (212,3), (214,11), (220,1), (221,2), (222,1), (234,1), (236,7), (237,8), (238,1), (239,3), (240,1), (242,7), (245,13), (248,13), (250,5), (251,7), (258,5), (259,3), (260,7), (261,14), (263,13), (269,5), (270,9), (274,0), (279,5), (282,6), (283,4), (284,0), (291,5), (295,3), (296,11), (299,5), (301,6), (302,2), (303,5), (305,4), (306,5), (310,9), (312,4), (314,13), (324,5), (332,12), (333,6), (339,7), (340,13), (341,14), (345,13), (348,12), (349,0), (352,12), (354,0), (355,1), (357,8), (361,0), (364,13), (370,13), (372,14), (379,12), (380,4), (381,11), (383,5), (392,10), (394,10), (395,8) \}$

۸ ویژگی کد ۶۳۳۰ و کد RaptorQ LA

۱-۸ مقدمه

این بند نقطه ۳ کد FEC، کد ۶۳۳۰ و نقطه ۴ کد FEC، توسعه لایه-آگاه کد ۶۳۳۰، RaptorQ LA را مشخص می‌کند.

اگر نقطه ۴ کد FEC با ISO/IEC 23008-1 در استاندارد fec_coding_structure==0011 استفاده شود، برای جریان‌های FEC که از لایه پایه محافظت می‌کنند، نقطه ۳ کد FEC (کد ۶۳۳۰) باید علامت‌گذاری شود و برای جریان‌های FEC که از لایه‌های بیشتری محافظت می‌کنند، نقطه ۴ کد FEC (RaptorQ LA) باید علامت‌گذاری شود.

۲-۸ کد ۶۳۳۰

کد ۶۳۳۰ در استاندارد IETF RFC 6330 تعریف می‌شود.

تعاریف مرتبط که واسطه‌ها را در کد‌گذاری و کدگشایی کد ۶۳۳۰ مستند می‌کنند، در زیر فراهم می‌شوند:

- بلوک منبع: بلوکی از K نماد منبع که برای اهداف کد‌گذاری و کدگشایی با هم در نظر گرفته می‌شوند.
- نماد: یکانی از داده است. اندازه نماد، به صورت هشتایی، به عنوان نماد اندازه T شناخته می‌شود. اندازه نماد همیشه عدد صحیح مثبت است.

— نماد منبع: کوچک‌ترین یکای داده که در طی فرایند کدبندی استفاده شده است. تمام نمادهای منبع در درون بلوک منبع هم اندازه T هستند.

— نماد کدبندی: نمادی که می‌توان به عنوان بخشی از کدبندی بلوک منبع ارسال کرد. نمادهای کدبندی بلوک منبع شامل نمادهای منبع بلوک و نمادهای جایگزین هستند که از بلوک منبع تولید شده‌اند. نمادهای جایگزین تولید شده از بلوک منبع، هم اندازه T هستند که نمادهای منبع آن بلوک منبع است.

— نماد جایگزین: نمادهای کدبندی بلوک منبع که نمادهای منبع نیستند. نمادهای جایگزین بر اساس نمادهای منبع بلوک منبع تولید می‌شوند.

— شناسانه (ID)^۱ نماد کدبندی (ESI)^۲: اطلاعاتی که به طور انحصاری هر نماد کدبندی مربوط به بلوک منبع را برای اهداف ارسال و دریافت شناسایی می‌کند. برای بلوک منبع با نمادهای منبع ESI، K، K+1، K+2، ...، K-1 و ESIها برای نمادهای جایگزین ...، 2، 1، 0 منبع عبارتند از K-1، ...، 2، 1، 0 و هستند.

اگر نقطه ۳ کد FEC علامت‌گذاری شود آنگاه برای بلوک منبع با اندازه K، نماد جایگزین با هر $ESI >= K$ باید تولید شود همان‌طور که در زیربند ۳-۵ از استاندارد IETF RFC 6330 تعریف شده است.

RaptorQ LA ۳-۸

1 - Identifier

2 - Encoding Symbol ID

RaptorQ LA کد ۶۳۳۰ را برای پشتیبانی بهتر LA-FEC توسعه می‌دهد که در استاندارد ISO/IEC 23008-1 تعریف شده است.

این زیربند، زیربندهای ۳-۵ «اوین مرحله کدبندی: تولید نماد میانی» و «۴-۵ دومین مرحله کدبندی: کدبندی» از استاندارد IETF RFC 6330 را توسعه می‌دهد. اصطلاح‌شناسی و الگوریتم‌های مرتبط، در استاندارد IETF RFC 6330 با تعریف‌های اضافی زیر مشخص می‌شوند:

K_x تعداد نمادهای منبع در بلوک منبع لایه رسانه x است (مقایسه شود با K در زیربند ۱-۲-۵ از استاندارد IETF RFC 6330).

K' تعداد نمادهای منبع در بلوک منبع توسعه‌یافته لایه رسانه x است (مقایسه شود با K' در زیربند ۲-۱-۵ از استاندارد IETF RFC 6330).

P_x تعداد نمادهای توازن لایه رسانه x است.

L_x نشان‌دهنده تعداد نمادهای میانی برای تک بلوک منبع گسترش‌یافته از لایه رسانه x است (مقایسه شود با L در زیربند ۱-۲-۵ از استاندارد IETF RFC 6330).

C_x نشان‌دهنده آرایه‌ای از نمادهای میانی لایه رسانه x است ($C_x[0], \dots, C_x[L_x - 1]$) .

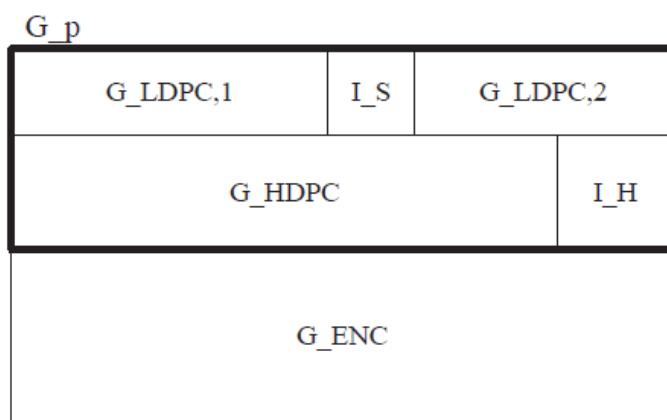
[] نشان‌دهنده مولد نماد کدبندی است (مقایسه شود با زیربند ۳-۵-۳-۵ از استاندارد IETF RFC 6330).

. ISI نماد درونی است (مقایسه شود با زیربند ۱-۳-۵ از استاندارد IETF RFC 6330).

. ESI نماد کدبندی شده ID است (مقایسه شود با زیربند ۱-۳-۵ از استاندارد IETF RFC 6330).

G_{ENC} , ماتریس توسعه LA-FEC_Z از ماتریس $G_{ENC_{m_LA_Z}}$ است.

ماتریس A محدودیت در فرایند محاسبه نمادهای میانی در اوین مرحله کدبندی فرایند کد ۶۳۳۰ است همان‌طور که برای نقطه کد در زیربند ۲-۸ استفاده شده است (مقایسه شود با زیربند ۳-۳-۵ از استاندارد IETF RFC 6330). ماتریس A در شکل ۲ شرح داده می‌شود.



شکل ۲ - ماتریس محدودیت A (مقایسه شود با شکل ۵ در زیربند ۳-۳-۵ از استاندارد IETF RFC 6330)

ماتریس A شامل شش ماتریس فرعی «I_H»، «G_HDPC»، «G_LDPC,2»، «I_S»، «G_LDPC,1» و «G_ENC» است. ایجاد آن ماتریس‌های فرعی در زیریند ۳-۳-۵ از استاندارد IETF RFC 6330 توصیف می‌شود.

ماتریس فرعی G_P را به عنوان ماتریس فرعی تعریف می‌کنیم که شامل تمام ماتریس‌های فرعی برای پیش‌کدبندی است.

$$G_p = \begin{bmatrix} G_{LDPC,1} & I_S & G_{LDPC,2} \\ & G_{HDPC} & I_H \end{bmatrix}$$

بنابراین، ماتریس A شامل G_P و G_ENC است:

$$A = \begin{bmatrix} G_p \\ G_{ENC} \end{bmatrix}$$

نمادهای میانی C را می‌توان از نمادهای منبع D این‌طور محاسبه کرد:

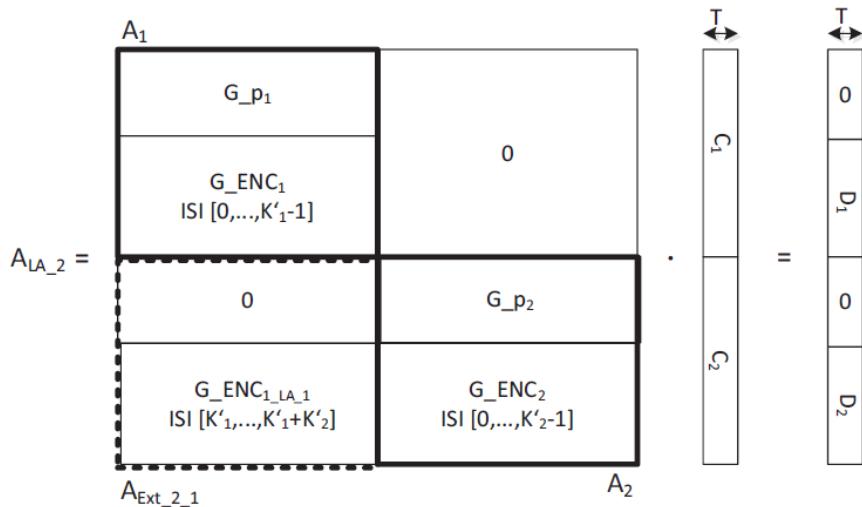
$$C = (A^{\wedge\wedge} - 1) D$$

اگر نقطه ۴ کد FEC علامت‌گذاری شود، آنگاه برای تمام بلوک‌های منبع فرایند LA-FEC از لایه رسانه اصلی K_{x_target} با اندازه $K_1, K_2, \dots, K_{x_target}$ ، نماد جایگزین باید با هر یک از $ESI = K_{x_target}$ تولید شود همان‌طور که زیریند ۲-۳-۸ و ۱-۳-۸ تعریف شده است.

۱-۳-۸ اولین مرحله کدبندی RaptorQ LA – تولید نماد میانی

این زیریند تولید نماد میانی را برای RaptorQ LA برای لایه رسانه معین ۲ مشخص می‌کند که به لایه رسانه ۱ بستگی دارد. همان‌طور که در شکل ۱۴ در چارچوب AL-FEC در استاندارد ISO/IEC 23008-1 نشان داده شده است، لایه رسانه ۱ لایه پایه را با $dependency_id = 0$ نشان می‌دهد و لایه رسانه ۲ لایه اضافی را با $dependency_id = 1$ نشان می‌دهد.

با RaptorQ LA، ماتریس A برای یکپارچه‌سازی تمام لایه‌های رسانه در ماتریس محدودیت A_{LA-L} طوری توسعه می‌یابد که وضعیت سامان‌بند کد را حفظ می‌کند همان‌طور که در مثال دو لایه‌ای در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- فرآیند کدبندی با ماتریس محدودیت LA برای لایه‌های رسانه ۲

در مثال داده شده در شکل ۳، ماتریس A_{LA_2} شامل ماتریس‌های A_1 و A_2 است، همچنین شامل ماتریس A_{LA_FEC} (که ماتریس توسعه LA-FEC است) و یک ماتریس صفر است. A_1 و A_2 مطابق با توصیف زیربند ۵-۳-۳ از استاندارد IETF RFC 6330 با محدودیتی تولید می‌شوند که اندازه نماد تمام نمادهای میانی و منبع T در تمام موارد یکسان است که ممکن است منجر به تعداد مختلف نمادهای منبع K_1 و K_2 شود. این ماتریس‌ها با «۰» نشان داده شده اند که ماتریس‌های صفر در اندازه‌های مرتبط هستند.

ماتریس B_{1_LA} (که ماتریس توسعه LA-FEC است) شامل ماتریس ادامه‌دار $G_{ENC1_LA_1}$ و ماتریس صفر است. $G_{ENC1_LA_1}$ ادامه ماتریس G_{ENC1} از لایه رسانه $L=1$ است که بخشی از ماتریس A_1 است. ماتریس ادامه‌دار $G_{ENC1_LA_1}$ طوری تولید می‌شود که هر سطر در G_{ENC1} و $G_{1_LA_1}$ انصاری است. این ماتریس، مشابه G_{ENC1} طوری تولید می‌شود که در زیربند ۵-۳-۴-۲ از استاندارد IETF RFC 6330 توصیف می‌شود. در حالی که G_{ENC1} از $[0: K'1-1]$ ISIs تولید می‌شود، $G_{ENC1_LA_1}$ از $[K'1,...,K'1+K'2-1]$ ISIs تولید می‌شود.

ماتریس ادامه‌دار LA-FEC را همانند $B_{1_LA_1}=[0; G_{ENC1_LA_1}]$ توصیف می‌کنیم، ماتریس A_{LA_2} لایه آگاه، برای لایه رسانه $L=2$ توصیف می‌شود توسط RaptorQ:

$$A_{LA_2} = \begin{bmatrix} G_{p1} & 0 \\ G_{ENC1} & 0 \\ 0 & G_{p2} \\ G_{ENC1_LA_1} & G_{ENC2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ B_{1_LA_1} & A_2 \end{bmatrix}$$

نمادهای میانی C_1 و C_2 را می‌توان از نمادهای منبع D_1 و D_2 این‌طور محاسبه کرد:

$$[C_1 C_2] = (A_{LA_2}^{\wedge\wedge -1}) \cdot [D_1 D_2]$$

این مفهوم را می‌توان برای x -امین لایه رسانه، بیشتر توسعه داد همان‌طور که با ماتریس A_{LA_x} نشان داده شده است:

$$A_{LA_x} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \cdots & 0 \\ B_{1_LA_1} & A_2 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ B_{1_LA_n-1} & B_{2_LA_n-2} & \cdots & A_n \end{bmatrix}$$

$ISIs$ [$\sum_{x=j}^{i-1} K'_x : \sum_{x=j}^i K'_x - 1$] است که از G_ENC_i تولید شده است. $A_{Ext_i_j}$ ، j -امین ماتریس ادامه‌دار این طور محاسبه کرد: D_1, D_2, \dots, D_x را می‌توان از نمادهای منبع C_1, C_2, \dots, C_x محاسبه کرد:

$$[C_1 C_2 \dots C_x] = (A_{LA_2}^{88-1}) \cdot [D_1 D_2 D_x]$$

برای حل معادله، فرایند کدگشایی مناسب را می‌توان به کار برد همان‌طور که توسط مثال کدگشای FEC در زیربند ۴-۵ از استاندارد IETF RFC 6330 توصیف شده است.

۲-۳-۸ دومین مرحله کدبندی RaptorQ لایه آگاه

دومین مرحله کدبندی، نمادهای جایگزین E_X لایه رسانه x را از نمادهای میانی C تولید می‌کند. در ادامه، موردی را با لایه‌های رسانه n با نمادهای میانی $[C_1 C_2 \dots C_n]$ در نظر می‌گیریم و فرایند کدبندی را برای تولید نمادهای جایگزین $E_{X-target}$ لایه رسانه x -target با x -target توصیف می‌کنیم که لایه هدف است و توصیه می‌شود برای آن نمادهای جایگزین کدبندی شود.

تولید نمادهای جایگزین E از نمادهای میانی C در زیربند ۳-۴-۵ از استاندارد IETF RFC 6330 توصیف می‌شود. نمادهای جایگزین $E_{X-target}$ از تمام نمادهای میانی $C(x\text{-target}) = [C_1 C_2 \dots C_{x\text{-target}}]$ تولید می‌شوند. فرایند برای تولید نمادهای کدبندی غیر-سامان‌بند در شبکه زیر توصیف می‌شود:

```

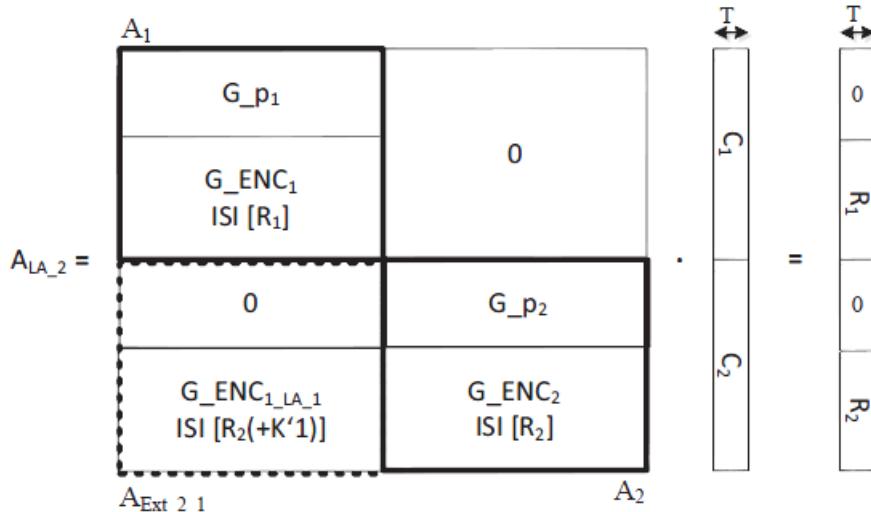
For (i=  $\sum_{x=1}^{x\_target} K'_x + \sum_{x=1}^{x\_target-1} P_x ; i < \sum_{x=1}^{x\_target} K'_x + \sum_{x=1}^{x\_target} P_x ; i++$ )
     $E_{X\_target}[i] = 0;$ 
    for layer 1:x_target
         $E_{X\_target}[i] = E_{X\_target}[i] \text{ XOR } Enc(K'_{layer}, C_{layer}(d,a,b,d1,a1,b1))$ 
    end
end

```

۳-۳-۸ کدگشایی RaptorQ لایه آگاه

فرایند کدگشایی همانند فرایند کدبندی مجموعه‌ای از نمادهای کدبندی دریافت شده انجام می‌شود که توسط سه‌تایی‌های R_x با $[R_x]$ مرتبط به جریان‌های FEC در لایه‌های میانی $x=1, \dots, n$ انجام می‌شود. فرایند کدگشایی برای کدگشایی همه لایه‌ها با هم، شبیه به فرایند کدبندی است (زیربند ۲-۸-۱). اختلاف این است که برای اولین فرایند کدبندی، ماتریس G_ENC_1 و G_ENC_2 از $[R_1]$ و $[R_2]$ ISI تولید

می‌شود و $G_{ENC1_LA_1}$ از $[R_2(+K'1)]$ تمام نمادهای کدبندی شده دریافتی R_2 تولید می‌شود که $(+K'_1)$ نشان می‌دهد که هر عنصری در R_2 توسط $(+K'_1)$ افزایش می‌یابد. توجه شود که لایه‌های به کار رفته برای پیش‌بینی (برای مثال، لایه پایه) می‌توانند جدا از لایه‌های پیش‌بینی (برای مثال، لایه افزایش) کدگشایی شوند و جریان FEC از لایه میانی $x=1$ با نقطه ۳ کد FEC تولید می‌شود.



شکل ۴- فرآیند کدگشایی با ماتریس محدودیت RaptorQ لایه آگاه ۲ ALA_2 برای لایه‌های رسانه ۲

یک نمونه کدگشا برای حل فرایند کدگشایی در زیربند ۴-۵ از استاندارد IETF RFC 6330 مشخص می‌شود.

دومین فرایند کدبندی نیز همانند فرایند توصیف شده در زیربند ۲-۳-۸ با $C = [C_1 \ C_2]$ است و همانند ورودی از اولین فرایند کدبندی است.

۹ ویژگی برای کدهای FireFort-LDGM

۱-۹ مقدمه

کد FF-LDGM (FF-LDGM) FireFort-LDGM یک مورد ویژه از کدهای تکرار - جمع‌بندی نامنظم است که با عنوان پلکان LDPC در استاندارد IETF RFC 5170 شناخته شده است. کدهای FF-LDGM مشخص شده، می‌توانند از طرح تقسیم - بسته و جایگذاری ساختاریافته پشتیبانی کنند. همچنین با اختلاف کد ویژه ماتریس‌های بررسی توازن بهینه برای پیام با پیچیدگی کم استفاده کنند که از الگوریتم‌های کدگشایی عبور می‌کنند. همچنین کدهای FF-LDGM لایه آگاه که شامل کدهای FF-LDGM می‌باشند مناسب هستند تا از ساختار کدبندی FEC لایه آگاه پشتیبانی کنند. این بند ویژگی کامل کدهای لایه آگاه را فراهم می‌کند که بر روی نقطه کد مشابه کار می‌کنند.

۲-۹ کدهای FF-LDGM

۱-۲-۹ تعریف

- $H_{P',N}$: نشان‌دهنده ماتریس بررسی توازن تُنک با P' سطر و N' ستون است.
- $G_{P',K}$: نشان‌دهنده ماتریس اصلی است.
- $G_{P',K}$: نشان‌دهنده ماتریس تُنک مشخص با P' سطر و K' ستون است.
- T_p : نشان‌دهنده ماتریس پلکانی P' در P است.
- W_N : نشان‌دهنده N' نماد چندگانه کدبندی است.
- S_K : نشان‌دهنده K' نماد منبع چندگانه است.
- C_p : نشان‌دهنده P' نماد جایگزین چندگانه است.
- K : نشان‌دهنده تعداد نمادهای منبع است.
- P : نشان‌دهنده تعداد نمادهای جایگزین است.
- D : نشان‌دهنده تعداد تقسیم یک نماد منبع است.
- K^* : نشان‌دهنده تعداد نماد منبع چندگانه D^* است.
- P^* : نشان‌دهنده تعداد نماد جایگزین چندگانه P^* است.
- M^K : تعداد ستون‌های ماتریس اصلی است.
- M^P : تعداد سطرهای ماتریس اصلی است.
- V^P : نشان‌دهنده P' نماد جایگزین چندگانه میانه است.

۲-۲-۹ عناصر ویژه FF-LDGM

عناصر زیر باید با کدهای FF-LDGM تعریف شوند:

- $N1m3$: یک عدد صحیح بین ۰ و ۲۵۵ است و خود این اعداد را نیز شامل می‌شود. طرح FF-LDGM از دو عدد مقصد «عناصر غیرصفر» در هر ستون در سمت چپ ماتریس بررسی توازن $N1$ و $N2$ پشتیبانی می‌کند. $N1m3$ به $N1$ مربوط می‌شود که برابر با $N1m3+3$ است. مقدار پیش‌فرض $N1m3$ به صفر تنظیم می‌شود.

- $N2m4$: یک عدد صحیح بین ۰ و ۲۵۵ است و خود این اعداد را نیز شامل می‌شود. $N2m4$ به مربوط می‌شود، که برابر با $N2m4+4$ است. مقدار پیش‌فرض $N2m4$ به ۳ تنظیم می‌شود.

- R : یک عدد صحیح بین ۰ و ۲۵۵ است و خود این اعداد را نیز شامل می‌شود. R نسبت بین تعداد ستون‌های $N1$ ($\#N1$) و تعداد ستون‌های $N2$ ($\#N2$) را نشان می‌دهد. R برابر با $\text{Ceil}[\#N2/(\#N1+\#N2)*255]$ است. مقدار پیش‌فرض R به ۴۸ تنظیم می‌شود.

- $Dm1$: یک عدد صحیح بین ۰ و ۲۵۵ است و خود این اعداد را نیز شامل می‌شود که تعداد تقسیم نماد منبع را نشان می‌دهد. عدد تقسیم D برابر با $Dm1+1$ است. مقدار پیش‌فرض $Dm1$ به صفر تنظیم می‌شود.

GC: یک عدد صحیح بین ۰ و ۲۵۵ است و خود این اعداد را نیز شامل می‌شود که تعداد عناصر میدان گالوا^۱ را برای هر ستون نشان می‌دهد.

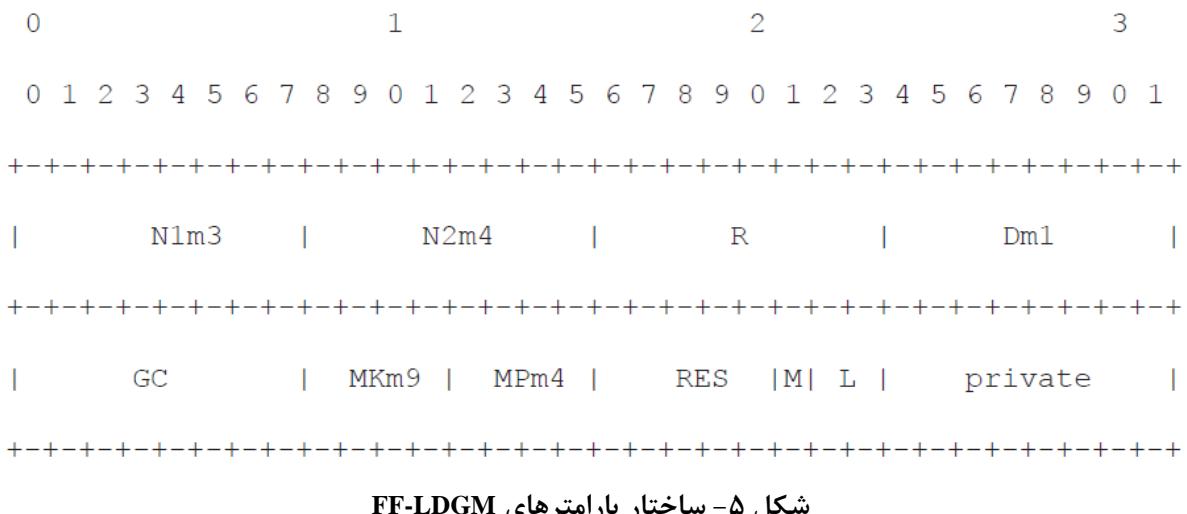
MKm9: یک عدد صحیح بین ۰ و ۱۵ است و خود این اعداد را نیز شامل می‌شود که حداقل تعداد ستون‌های ماتریس اصلی را نشان می‌دهد. MK برابر با MKm9+9 است و تنها در حالت درجه-انطباقی استفاده می‌شود.

RES: فیلد رزروشده برای استفاده آینده است.

M: پرچم نشان‌دهنده استفاده از حالت درجه-انطباقی است.

L: یک عدد صحیح بین ۰ و ۳ است و خود این اعداد را نیز شامل می‌شود. L نشان دهنده ابعاد مقصد بر روی الگوریتم لبه-رشد پیشرو (PEG)^۲ است. مقدار پیش‌فرض L به ۲ تنظیم می‌شود.

هنگامی که نقطه ۵ کد برای چارچوب MMT AL-FEC استفاده می‌شود، عناصر ویژه FF-LDGM در فیلد خصوصی پیام AL-FEC در استاندارد ISO/IEC 23008-1 توصیف می‌شوند و این قالب به شرح زیر نوشته می‌شود:



۳-۲-۹ ماتریس بررسی توازن طرح FF-LDGM
کدهای FF-LDGM یک نوع کد خطی هستند. ماتریس بررسی توازن بیشتر شامل صفر است و تنها تعداد کمی غیرصفر است. ماتریس‌های بررسی توازن کدهای FF-LDGM شامل ۲ قسمت هستند: یک قسمت ماتریس تُنک G' است و قسمت دیگر ماتریس پلکانی T است و تعیین می‌شود توسط:

$$H_{P',N'} = \left[\begin{array}{c|cc} G'_{P',K'}; T_{P'} \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ & 1 & 1 \end{array} \right] \quad (1)$$

1 - Galois

2 - Progressive Edge-Growth

که G' ماتریس تُنک' P' در P ' است و Tp' ماتریس پلکانی مربعی P' در P ' است. در مورد حالت درجه-انطباقی، ماتریس تُنک' G' از ماتریس اصلی G تولید می‌شود.

۴-۲-۹ ساخت ماتریس تُنک

ماتریس تُنک' G' و ماتریس اصلی G با استفاده از روش زیر تولید می‌شوند که در جدول ۲ نشان داده می‌شود.

جدول ۲- رویه ساخت ماتریس تُنک

رویه ایجاد ماتریس تُنک
<pre> void BigGirthMatrix(K', P', N1, N2, R, L, GC) { /* This function assumes that two empty matrixes, one is P' * (K'+P') matrix H' and the other is P' * K' matrix G'. The matrix_insert_entryH(), matrix_resetH(), connectedNodes() and connectedNodes_clear() functions can access H', and the matrix_insert_entryG(), permutation_matrixG() and nonbinary_matrixG() functions can access G'. The pmms_rand() shall be used in IETF RFC 5170 in clause 5.7 with PRNG seed=0x600DC0DE. In the case of rate-adaptive mode, mother matrix G is generated by using MK and MP parameters and then the K' is set to 2^^MK and P' is set to 2^^MP. */ reset_counter = -1; reset_flag = -1; /* make stair matrix */ FOR i = 0 to P'-1 matrix_insert_entryH(i,i); IF (i != 0) THEN matrix_insert_entryH(i,i-1); ENDIF row_weights[i]=2; ENDFOR row_weights[0]--; FOR j=0 to K'-1 tgt_gitch = L*2+2; ITER: ConnectedNodes_clear(); /* Clears all ConnectedNode values. */ IF (j < K '-floor(K '*R/255)) THEN weight_cols = N1; ELSE{ weight_cols = N2; ENDIF FOR w=1 to weight_cols min = infinity; FOR i=0 to P'-1 IF ((row_weights[i] < min)AND(ConnectedNodes(i) == 0)) min = row_weights[i]; ENDIF ENDFOR max_index_length = 0; } </pre>

جدول ۲ - ادامه

```

FOR i = 0 to P'-1
    IF ((row_weights[i] == min) AND (ConnectedNodes(i) == 0)) {
        index[max_index_len] = i;
        max_index_len += 1;
    ENDIF
ENDFOR
ret = pmms_rand(max_index_len);
/* This function returns random integer between 0 and max_index_len-1.*/
IF (w != weight_cols) THEN
    IF (reset_flag != 1) THEN
        ConnectedCheckNode(index[ret], tgt_girth, j, p);
/* This function finds a minimum non-empty subset of unreachable check
nodes from
the target node via from 3 to less than tgt_girth edges.*/
sum ← Sum of all ConnectedNodes values
    IF (sum == P') THEN
        IF (tgt_girth >= 4) THEN
            tgt_girth -= 2; goto ITER;
        ELSEIF (tgt_girth < 4) AND (reset_counter==j) THEN
            reset_flag = 1; goto ITER;
        ELSE
            reset_counter = j;
            matrix_resetH(j); goto ITER;
        ENDIF
    ENDIF
    ELSE
        Set of all ConnectedNodes are zeros.
    ENDIF
ENDIF
matrix_insert_entryH(index[ret], j+p);
matrix_insert_entryG(index[ret], j);
row_weights[index[ret]]++;
ENDFOR
permutation_matrixG(K', P', R);
/* This function permutes columns of a matrix G'. */
IF (GC!=0) THEN
    nonbinary_matrixG(K', P', GC);
/* This function enhance a binary matrix to a non-binary matrix. */
ENDIF
}

```

رویه عملیات جایگشت جدول ۲، در جدول ۳ نشان داده می‌شود و رویه ماتریس غیردودویی G جدول ۲، در جدول ۴ نشان داده می‌شود.

جدول ۳- رویه تولید ماتریس تنک

رویه تولید ماتریس تنک

```
void permutation_matrixG(K' , P' , R)
{
/* This function permutes columns of a sparse matrix G'. Before
permutation, the
sparse matrix G' is constructed with non-uniform weight distribution of
columns.*/
nN1 = floor(K' *R/255);
nN2 = K'-nN1;
n1 = nN1;
n2 = nN2;
N1_counter = N2_counter = counter = 0;
FOR i=0 to nN2
interval = floor((n1+n2+1)/(n2+1));
FOR j=0 to interval-1
IF (j!=interval-1) THEN
randperm[j+counter] = N1_counter;
N1_counter = N1_counter+1;
ELSE
IF (i!=nN2) THEN
randperm[j+counter] = nN1+N2_counter;
N2_counter = N2_counter+1;
ENDIF
ENDIF
counter = counter + interval;
n1 = n1-(interval-1);
n2 = n2-1;
ENDFOR
ENDFOR
FOR i=0 to K'-1
change_columns(i,randperm[i]);
/*This function changes two columns (i and randperm[i]) of G'. */
ENDFOR
}
```

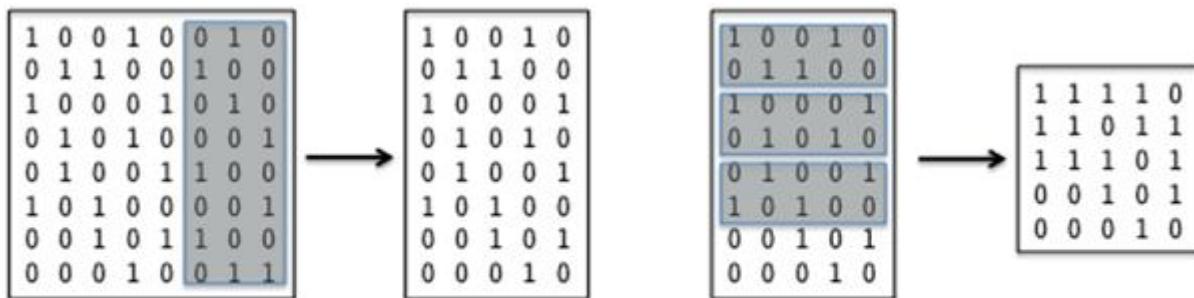
جدول ۴- رویه بهبود ماتریس دودویی به ماتریس غیردودویی

رویه بهبود ماتریس دودویی به ماتریس غیردودویی
<pre> void nonbinary_matrixG(K', P', GC) { /* This function enhances a binary matrix G' to a non-binary matrix G'. However, if GC is set to 0, this function does not applied.*/ FOR i = 0 to K'-1 GC_counter = 0; FOR j = P'-1 to 0 IF (return_matrixG_value(j,i)) AND (GC_counter<GC) THEN /* This function returns value of element in i-th row and j-th column of a matrix G'. */ ret = pmms_rand(255); matrix_insert_nonbinary(j,i,ret+1); /* This function inserts nonbinary value (ret+1) of element in j-th row and i-th column of a matrix G'. */ GC_counter++; ENDIF ENDFOR ENDFOR } </pre>

۵-۲-۹ ساخت ماتریس تُنک رخنه شده

در مورد حالت درجه- انطباقی، قسمت سامان‌بند ماتریس بررسی توازن، یک ماتریس تُنک رخنه‌دار است که توسط ماتریس اصلی ساخته می‌شود. در این حالت توصیه می‌شود MK' بزرگتر از K' باشد. ماتریس رخنه‌دار به شرح زیر ساخته می‌شود.

- مرحله ۱) ($MK' - K'$) ستون ماتریس اصلی از سمت راست را حذف کنید (شکل ۶ مرحله ۱).
- مرحله ۱') در حالتی که MP' کوچکتر از P' است، ماتریس تُنک میانی را با $MP'^{*}2^{\lceil \log_2(P'/MP') \rceil}$ سطر و K' ستون تولید کنید.
- مرحله ۲) ($MP'^{*}2^{\lceil \log_2(P'/MP') \rceil} - P'$) سطر از ماتریس تُنک میانی از بالا را رخنه کنید. این عملیات رخنه کردن، عملیات جمع‌بندی ساده دو سطر بروی $GF(2)$ است هنگامی که GC صفر می‌باشد یا $GF(256)$ هنگامی که GC که صفر نیست (شکل ۶ مرحله ۲).



مرحله ۱) بریدن سه ستون سمت راست

مرحله ۲) رخنه کردن سه سطر

شکل ۶- مثال عملیات رخنه برای تولید ماتریس رخنه شده (هنگامی که $GC=0$ و $P'=5$, $K'=5$, $MK=8$)

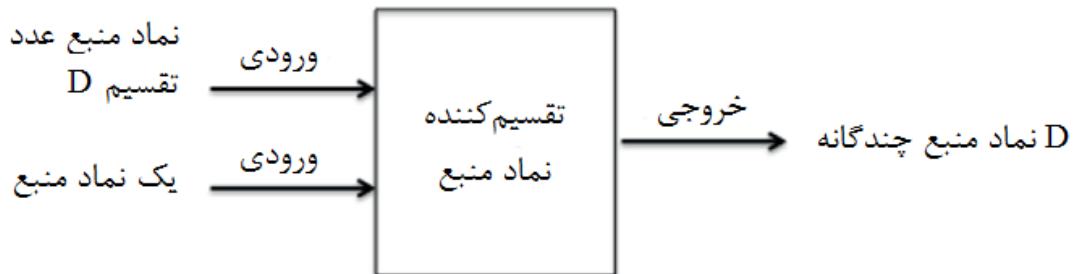
پس از فرایند رخنه کردن، ماتریس فضای رخنه شده 'G' در 'K' است، تولید می شود. جزئیات الگوریتم رخنه برای ساخت ماتریس تُنک رخنه در جدول ۵ تهیه می شود.

جدول ۵- رویه ساخت ماتریس رخنه

رویه ساخت ماتریس رخنه
<pre> void puncture_matrix(K', P', MK', MP') { delete_columns(MK'-K'); CP = MP'; while (1){ IF (CP<P') TEHN prepare_new_matrixG(CP*2, K'); /* This function prepares CP*2-by-MK' matrix G'. The initial values of odd columns are copied from CP-by-MK' matrix.*/ FOR i=0 to CP-1 count = 0; FOR j=0 to K'-1 IF matrix_has_value(2^i-1, j) IF count%2 == 1 move_value(j,2^i-1, 2^i); /* This function moves value of matrix G' (2^i-1,j) to G' (2^i,j). */ ENDIF count +=1; ENDIF ENDFOR ENDFOR CP *=2; ELSEIF break; ENDIF } count = 0; WHILE (1) { IF (P' >= ceil(CP/2)) TEHN NP = P'; ELSE NP = ceil((CP/2)); ENDIF FOR i=0 to CP-NP-1 puncture_rows(i*2^(count+1),i*2^(count+1)+2^(count)); /* This function squashes two rows. */ ENDFOR IF (P' == NP) THEN break; ENDIF count++; CP = NP; } FOR i=0 to CP-P'-1 pickout_row(i*2^(count+1)); /* This function reconstructs a punctured sparse matrix from intermediate matrix. */ ENDFOR FOR j=0 to P'-i-1 pickout_row(i*2^(count+1)+j*2^(count)); ENDFOR } </pre>

۶-۲-۹ طرح تقسیم نماد منبع

تفکیک کننده نماد منبع، نماد منبع را به D نماد منبع چندگانه تقسیم می‌کند (شکل ۷). عدد تقسیم D ، عدد پارامتری است و توصیه می‌شود مطابق با $T\%D=0$ باشد. اگر $T\%D$ برابر با صفر نباشد، آخرین نماد منبع با صفر پوشیده می‌شود. سپس K نماد منبع چندگانه تولید می‌شود.



شکل ۷- فرایند تفکیک کننده نماد منبع

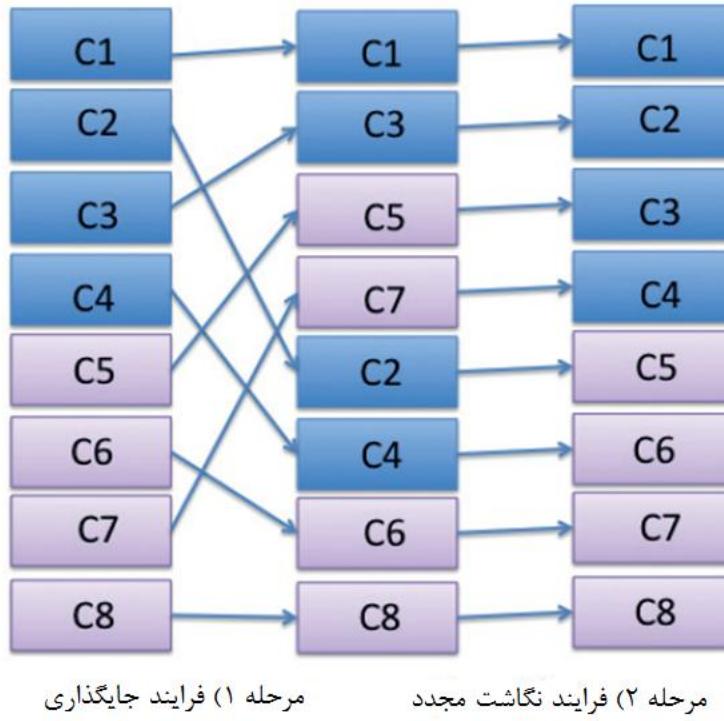
۷-۲-۹ طرح درهم‌نهی^۱ و وادرهم‌نهی^۲ ساختاریافته

قبل از پوشینه‌دار کردن، نماد جایگزین چندگانه تولید شده جایگذاری می‌شود. جایگذاری فقط شاخص نمادهای خود را تغییر می‌دهد. j_i ، i -امین نماد جایگزین چندگانه است و همیشه j برای هر بلوک با ۱ شروع می‌کند و یکی یکی اضافه می‌شود. شاخص جدید جایگذاری شده تعیین می‌شود توسط:

$$i' = \left[(i-1)\%P \right] \circ D + \left\lfloor \frac{i-1}{P} \right\rfloor + 1 \quad (2)$$

که $\left[(i-1)\%P \right]$ مقدار پیمانه محاسباتی را برمی‌گرداند و $\left\lfloor \frac{i-1}{P} \right\rfloor$ مقدار قطع محاسباتی را برمی‌گرداند. پس از فرایند جایگذاری ساختاریافته (شکل ۸ مرحله ۱)، i -امین نماد جایگزین چندگانه به i -امین نماد نگاشت می‌شود (شکل ۸ مرحله ۲). پس از این فرایند، نمادهای جایگزین تولید می‌شوند.

1 - Interleaving
2 - De-interleaving



مرحله ۱) فرایند جایگذاری

مرحله ۲) فرایند نگاشت مجدد

شکل ۸-مثال فرایند جایگذاری ساختار یافته هنگامی که $P=2$ و $D=4$

در تقابل با جایگذاری، فرایند عدم جایگذاری، عملیات را دوباره از i^{th} -امین شاخص نگاشت می‌کند.

۸-۲-۹ الگوریتم کدبنده کد FF-LDGM

به طور خلاصه، در قسمت کدگذار، کدگذار FF-LDGM هر بسته توازن را همانند عملیات ضرب ماتریس G' و K' نماد منبع چندگانه محاسبه می‌کند. در مورد حالت فیلد گالویس که GC صفر تنظیم نشده است، کدهای FF-LDGM از چندجمله‌ای اول $1 + x^2 + x^3 + x^4 + x^8$ در $GF(256)$ استفاده می‌کنند. از تعریف کدخطی، K' نماد منبع چندگانه و P' نماد جایگزین چندگانه به شرح زیر مرتبط هستند:

$$\begin{aligned} 0 &= \left[\mathbf{H}_{P',N'} \right] \mathbf{W}_{N'}^t \\ &= \left[\mathbf{G}_{P',K'}; \mathbf{T}_{P'} \right] \left[\frac{\mathbf{S}_{K'}^t}{\mathbf{C}_{P'}^t} \right] \\ &= \left[\mathbf{G}_{P',K'} \right] \mathbf{S}_{K'}^t + \left[\mathbf{T}_{P'} \right] \mathbf{C}_{P'}^t \end{aligned} \quad (3)$$

نمادهای جایگزین چندگانه، $C_{P'}$ را می‌توان این‌طور نوشت:

$$C_{P'}^t = \left[T_{P'}^{-1} \right] \left[G_{P',K'} \right] S_{K'}^t \quad (4)$$

از معادله بالا، عملیات کدبنده را می‌توان به دو مرحله تقسیم کرد:

مرحله ۱) نمادهای جایگزین چندگانه میانی را محاسبه کنید.

مرحله ۲) نمادهای جایگزین چندگانه میانی V_m را از طریق جمع کننده عبور دهید تا C^m را بسازید.
این فرایندها این طور نوشته می‌شوند:

$$\begin{aligned} C_1 &= \sum_{j=1}^{K'} G_{1,j} S_j \\ C_2 &= C_1 - \sum_{j=1}^{K'} G_{2,j} S_j \\ \vdots &= \vdots \\ C_{P'} &= C_{P'-1} - \sum_{j=1}^{K'} G_{P',j} S_j \end{aligned} \quad (5)$$

که $G_{p',j}$ عناصر ماتریس هر ستون است. از معادله بالا (P' نماد جایگزین چندگانه) $G_{p',j}$ را می‌توان در زمان خطی محاسبه کرد.

۹-۲-۹ الگوریتم کدگشایی کد FF-LDGM

در قسمت کدگشا، اگر بسته‌ها به طور مکرر گم شوند، نمادهای منبع و نمادهای جایگزین به چندین نماد منبع و جایگزین تقسیم می‌شوند که سپس در قسمت نمادهای جایگزین چندگانه، عدم جایگذاری می‌شوند. این فرایند از ایجاد خطاها نماد جایگزین چندگانه جلوگیری می‌کند و نمادهای جایگزین چندگانه گم شده به یکدیگر نزدیک نمی‌شوند. پس از فرایند بالا، کدگشایی کدهای FF-LDGM پیشنهادی، نماد چندگانه حذف شده را با استفاده از الگوریتم عبور پیام (MPA)^۱ یا الگوریتم حذف گاوی (GEA)^۲ بر می‌گرداند. به دلیل این‌که کدهای FF-LDGM کد خطی است، می‌توانیم به شکل زیر بنویسیم:

$$\begin{aligned} 0 &= [\mathbf{H}_{P',N'}] \mathbf{W}_{N'}^t \\ \mathbf{H}_L \mathbf{W}_L^t &= \mathbf{H}_C \mathbf{W}_C^t \end{aligned} \quad (6)$$

که H_L ماتریس بررسی توازن است که متناظر با حذف نمادهای چندگانه W_L است و H_C ماتریس بررسی توازن است که متناظر با نمادهای چندگانه صحیح W_C است. در معادله چپ بالا، اگر کدگشا یک نماد حذف را در یک ردیف پیدا کند، نماد چندگانه حذف توسط مجموع تمام نمادهای تصحیح شده در همان معادله ردیف برگردانده می‌شود.

سرانجام، نمادهای منبع کدگشایی شده بار دیگر بازسازی می‌شوند و فرایند کدگشایی به پایان می‌رسد.

1 - Message Passing Algorithm

2 - Gaussian Elimination Algorithm

۳-۹ کدهای LA FF-LDGM لایه آگاه

۱-۳-۹ LA FF-LDGM طرح

کدهای FF-LDGM لایه آگاه، به نمادهای منبع برای لایه‌های اضافی اجازه می‌دهند تا در لایه اصلی (یا پایین‌تر) استفاده شوند. این مورد، طول کلی بلوک را افزایش می‌دهد و احتمال بهبود لایه اصلی را افزایش می‌دهد. کدهای LA FF-LDGM توسط ترکیب چند ماتریس تُنک ساخته می‌شوند. کدهای FF-LDGM تعریف می‌شوند توسط:

$$0 = \left[\mathbf{H}_{L m,n} \right] \mathbf{W}_{L n}^t \quad (7)$$

که $\mathbf{H}_{L m,n}$ ماتریس تُنک لایه‌دار است که از کدهای LA FF-LDGM استفاده می‌کند و \mathbf{W}_L نمادهای چندگانه دریافت شده است که شامل هر داده لایه است. $\mathbf{H}_{L m,n}$ و $\mathbf{W}_{L,n}$ تعیین می‌شوند توسط:

$$\mathbf{H}_{L,P',K'} = \left[\begin{array}{c|ccc} G_{P'1,K'1} & 0 & 0 & 0 \\ \hline G_{P'2,K'1+K'2} & 0 & 0 & \\ \vdots & & | & 0 \\ \hline G_{P'L,K'1+K'2+\dots+K'L} & & & \end{array} \right] \mathbf{T}_{P'} \quad (8)$$

$$\mathbf{W}_{L n} = \left[\mathbf{S}_{L k} \mid \mathbf{C}_{L m} \right] = \left[\mathbf{S}_{kl}, \dots, \mathbf{S}_{kL} \mid \mathbf{C}_{ml}, \dots, \mathbf{C}_{mL} \right] \quad (9)$$

جدول ۶، نمادهای منبع و جایگزین چندگانه را نشان می‌دهد که در لایه اصلی و لایه‌های اضافی، تخصیص داده شده‌اند.

جدول ۶- نمادهای منبع چندگانه و نمادهای جایگزین مرتبط در هر لایه

نشانه جایگزین مرتب	نشانه منبع	
Cm1	Sk1	لایه اصلی
Cm2	Sk2	لایه اضافی ۱
...
CmL	SkL	لایه اضافی L-1

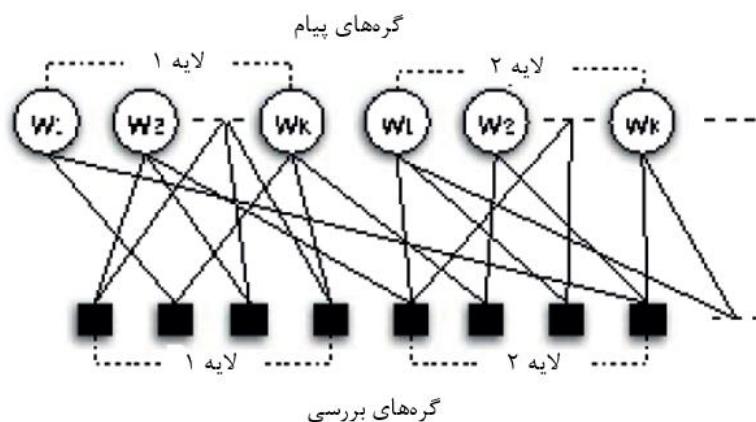
۲-۳-۹ الگوریتم کدبندی

الگوریتم کدبندی همان فرایند کدهای اصلی FF-LDGM است که در زیر بند ۸-۲-۹ توصیف شده است.

۳-۹ الگوریتم کدگشایی

کدگشایی کدهای LA FF-LDGM توسط الگوریتم MPA از کدهای اصلی FF-LDGM انجام می‌شود که در زیر بند ۳-۹ توصیف شده است و مطابق با فرمول (۹) است.

گراف تر^۱ کدهای LA FF-LDGM در شکل ۹ شرح داده می‌شود. از شکل ۹ می‌توان دید که نمادهای دریافت شده برای لایه اصلی به نمادهای لایه‌های اضافی متصل هستند. واضح است که ساختار پیشنهادی مشخصه ارزشمندی را به دست می‌آورد که لایه اصلی توسط نمادهای توازن بیشتر محافظت می‌شود و همچنین برای داده تصویری لایه‌دار مناسب است. همچنین کد LA FF-LDGM از کدگشایی جزئی پشتیبانی می‌کند.



شکل ۹ - مربوط به گراف تر کدهای LA FF-LDGM

۱۰ ویژگی برای الگوریتم‌های کد FEC در استاندارد SMPTE 2022-1

به الگوریتم‌های کد FEC مراجعه کنید که در استاندارد SMPTE 2022-1 مشخص شده‌اند.

كتاب نامه

[1] Fossorier M.P.C. Quasi-Cyclic Low-Density Parity-Check Codes,” in Proc. ISIT 2003, Yokohama, Japan, June/July 2003, p. 150.

[2] Myung S., Yang K., Kim J. Quasi-cyclic LDPC codes for fast encoding. IEEE Trans. Inf. Theory. 2005 Aug., 51 pp. 2894–2901