



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110114978 B

(45) 授权公告日 2021.06.01

(21) 申请号 201780080549.8

(22) 申请日 2017.03.21

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110114978 A

(43) 申请公布日 2019.08.09

(30) 优先权数据
PCT/RU2017/000002 2017.01.09 RU

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2019.06.26

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/RU2017/000161 2017.03.21

(87) PCT国际申请的公布数据
W02018/128560 EN 2018.07.12

(73) 专利权人 华为技术有限公司
地址 518129 广东省深圳市龙岗区坂田华为总部办公楼

(72) 发明人 帕维尔·阿纳托利耶维奇·潘特雷夫
格列布·维亚科斯拉沃维奇·卡拉谢尔夫
伊万·列昂尼多维奇·马祖连科

埃寥尔·埃尔达洛维奇·加萨诺夫
尤里亚·谢尔盖维奇·舒尔金

(74) 专利代理机构 深圳市深佳知识产权代理事务所(普通合伙) 44285
代理人 王仲凯

(51) Int.Cl.
H03M 13/11 (2006.01)

(56) 对比文件
CN 102394660 A, 2012.03.28
CN 104579576 A, 2015.04.29
CN 101662290 A, 2010.03.03
Tsung-Yi Chen 等. Protograph-Based Raptor-Like LDPC Codes.《IEEE Transactions on Communications》.2015,第63卷(第5期),第1522-1532页.

Y.-M. Chang 等. Lower-Complexity Layered Belief-Propagation Decoding of LDPC Codes.《2008 IEEE International Conference on Communications》.2008,第1155-1160页.

审查员 吴一帆

权利要求书2页 说明书11页 附图8页

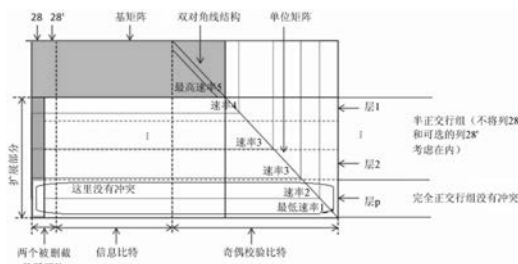
(54) 发明名称

高效可解码QC-LDPC码

(57) 摘要

提供了速率自适应不规则QC-LDPC码的基矩阵,该基矩阵由具有表示循环子矩阵的条目的列和行形成。基矩阵的列被划分为至少一个或多个较高权重的第一列和较低权重的第二列,并且基矩阵的行被划分为与高速率母码相对应的第一高权重行和与较低速率码有关的扩展部分相对应的第二低权重行。由第二列的条目与第一行和第二行的条目的交集形成的第一子矩阵被划分为第一二次子矩阵,其中,每个第一子矩阵的每列中的最多一个条目和/或每个第一子矩阵的每行中的最多一个条目被标记,从而将第一子矩

阵划分为正交标记行组的层,其中,正交标记行的数量与第一二次子矩阵的大小相对应。考虑到一个或多个较高权重的第一列,一个或多个校验节点单元处理器执行泛洪解码操作或泛洪解码操作与分层(因此混合)解码操作的组合,以及考虑到第二列,一个或多个CNU处理器执行分层解码操作。



CN 110114978 B

1. 一种提供不规则QC-LDPC码的方法,包括:
提供不规则QC-LDPC码的基矩阵;
使用所提供的基矩阵来提供用于编码或解码信息比特序列的不规则QC-LDPC码,其中,提供所述基矩阵包括:
将所述基矩阵的一个或多个第一列确定为比所述基矩阵的第二列具有更高的权重;
将所述基矩阵的一个或多个第一行确定为比所述基矩阵的第二行具有更高的权重;
将由所述第二列的条目与所述第二行的条目的交集形成的第一子矩阵划分为第一二次子矩阵;
标记每个第一二次子矩阵的每列中的最多一个条目和/或标记每个第一二次子矩阵的每行中的最多一个条目;
标记所述一个或多个第一列的条目和所述一个或多个第一行的条目;
基于所提供的基矩阵的标记条目来确定与所述信息比特序列相对应的码字;以及
除了被指示为被删截的信息比特之外,发送所述码字;
其中,所标记的条目表示不规则QC-LDPC矩阵的与循环矩阵相对应的块,并且未标记的条目表示所述不规则QC-LDPC矩阵的与零矩阵相对应的块;所述不规则QC-LDPC矩阵包括形成外码的高密度部分中的核心基矩阵和形成内码的速率自适应扩展部分;
其中,存在涉及所述第一子矩阵的所有行的至少一个行顺序,其中,根据所述至少一个行顺序排序的所述第一二次子矩阵中的每一个的行没有垂直相邻的条目,或者其中,根据所述至少一个行顺序排序的所述第一子矩阵的行没有垂直相邻的条目。
2. 根据权利要求1所述的方法,其中,存在涉及所述第一子矩阵的所有行的至少一个行顺序,其中,由根据所述至少一个行顺序排序的所述第一子矩阵的行形成的矩阵的每列的所有标记条目由至少两个未标记条目垂直分隔。
3. 根据权利要求1或2所述的方法,其中,所述一个或多个第一行是第一行,并且标记所述第一行的条目还包括:
将所述基矩阵的由所述第二列的条目与所述第一行的条目的交集形成的第二子矩阵划分为第二二次子矩阵;以及
标记每个第二二次子矩阵的每列中的最多一个条目和/或标记每个第二二次子矩阵的每行中的最多一个条目。
4. 根据权利要求3所述的方法,其中,根据所述至少一个行顺序排序的所述第二二次子矩阵中的每一个的行没有垂直相邻的条目,或者其中,根据所述至少一个行顺序排序的所述第二子矩阵的行没有垂直相邻的条目。
5. 根据权利要求3所述的方法,其中,由根据所述至少一个行顺序排序的所述第二子矩阵的行形成的矩阵的每列的所有标记条目由至少两个未标记条目垂直分隔。
6. 根据权利要求1、2、4、5中任一项所述的方法,其中,所述不规则QC-LDPC矩阵的第四子矩阵具有双对角线结构或三角结构,所述第四子矩阵由与所述第二列的第一子集的条目和所述第一行的条目的交集相对应的块形成。
7. 根据权利要求1、2、4、5中任一项所述的方法,其中,所述不规则QC-LDPC矩阵的第五子矩阵具有三角结构或单位矩阵结构,所述第五子矩阵由与所述第二列的第二子集的条目和所述第二行的条目的交集相对应的块形成。

8. 根据权利要求1、2、4、5中任一项所述的方法,其中,通过被划分为具有循环子矩阵和零子矩阵的块的基矩阵结构的条目来标识所述第二列的待标记条目。

9. 根据权利要求1、2、4、5中任一项所述的方法,其中,存在涉及所述基矩阵的所有行的至少一个行顺序,其中,根据所述至少一个行顺序排序的所述基矩阵的从给定行开始的行是正交行。

10. 根据权利要求1、2、4、5中任一项所述的方法,其中,存在涉及所述基矩阵的所有行的至少一个行顺序,其中,由根据所述至少一个顺序排序的所述基矩阵的给定行集合形成的子矩阵由正交行组组成。

11. 根据权利要求10所述的方法,其中,在所述正交行组之间不存在垂直相邻的标记条目对。

12. 一种非暂态计算机可读介质,其存储指令,所述指令在由计算机执行时使所述计算机:

提供不规则QC-LDPC矩阵的基矩阵,所述基矩阵由具有表示所述不规则QC-LDPC矩阵的块的条目的列和行形成;

使用所提供的基矩阵来提供用于编码或解码信息比特序列的不规则QC-LDPC码,其中,提供所述基矩阵包括:

将所述基矩阵的一个或多个第一列确定为比所述基矩阵的第二列具有更高的权重;

将所述基矩阵的一个或多个第一行确定为比所述基矩阵的第二行具有更高的权重;

将由所述第二列的条目与所述第二行的条目的交集形成的第一子矩阵划分为第一二次子矩阵;

标记每个第一二次子矩阵的每列中的最多一个条目和/或标记每个第一二次子矩阵的每行中的最多一个条目;以及

标记所述一个或多个第一列的条目和所述一个或多个第一行的条目;

基于所提供的基矩阵的标记条目来确定与所述信息比特序列相对应的码字;

除了被指示为被删截的信息比特之外,发送所述码字;

其中,所标记的条目表示不规则QC-LDPC矩阵的与循环矩阵相对应的块,并且未标记的条目表示所述不规则QC-LDPC矩阵的与零矩阵相对应的块;所述不规则QC-LDPC矩阵包括形成外码的高密度部分中的核心基矩阵和形成内码的速率自适应扩展部分;

其中,存在涉及所述第一子矩阵的所有行的至少一个行顺序,其中,根据所述至少一个行顺序排序的所述第一二次子矩阵中的每一个的行没有垂直相邻的条目,或者其中,根据所述至少一个行顺序排序的所述第一子矩阵的行没有垂直相邻的条目。

高效可解码QC-LDPC码

技术领域

[0001] 本公开内容涉及高效可解码准循环低密度奇偶校验 (Quasi-Cyclic Low-Density Parity-Check, QC-LDPC) 码。特别地,本公开内容涉及基于不规则QC-LDPC矩阵的基矩阵的高效可解码速率自适应QC-LDPC码。

背景技术

[0002] 图1示出了说明其中本公开内容的过程可以被实现的数字通信系统10的框图。数字通信系统10包括具有编码器12的发送侧和具有解码器14的接收侧。发送侧的编码器12的输入例如是具有k个比特的信息序列 IS_1 ,在由编码器12执行的编码操作中将具有r个比特的冗余序列添加至具有k个比特的信息序列 IS_1 ,从而产生可以被转发到调制器16的具有 $k+r=n$ 个比特的编码信息序列 IS_2 。

[0003] 调制器16可以将编码序列 IS_2 变换为调制信号矢量 CH_IN ,该调制信号矢量 CH_IN 继而通过有线或无线信道18——例如导线、光纤、无线电信道、微波信道或红外信道——传输。由于信道18通常经受噪声干扰,因此信道输出 CH_OUT 可能与信道输入 CH_IN 不同。

[0004] 在接收侧,信道输出矢量 CH_OUT 可以由产生某个似然比的解调器20处理。解码器14可以在由解码器14执行的解码操作中使用接收信息序列 IS_3 中的冗余来校正接收信息序列 IS_3 中的错误并产生解码信息序列 IS_4 (参见M.P.C.Fossorier等人,“Reduced Complexity Iterative Decoding of Low-Density Parity Check Codes Based on Belief Propagation”,IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS,1999年5月,第47卷,第5期,第673-680页以及J.Chen等人,“Improved min-sum decoding algorithms for irregular LDPC codes”,PROCEEDINGS OF THE 2005 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INFORMATION THEORY,第449-453页,2005年9月)。解码信息序列 IS_4 是编码信息序列 IS_2 的估计,可以根据解码信息序列 IS_4 提取信息序列 IS_1 (的估计)。

[0005] 编码操作和解码操作可以通过LDPC码管理。在信道编码的一般形式中,针对由编码器12执行的编码操作,LDPC码可以采用生成矩阵 G ,并且针对由解码器14执行的解码操作,LDPC码可以采用奇偶校验矩阵 H 。对于LDPC码,在信息序列 IS_1 具有大小 $1 \times k$ 、码字 IS_2 具有大小 $1 \times n$ 并且冗余(奇偶校验)序列具有 $r = (n-k)$ 个比特的情况下,生成矩阵 G 具有大小 $k \times n$,并且奇偶校验矩阵 H 具有大小 $r \times n = (n-k) \times n$ 。

[0006] 奇偶校验矩阵 $H_{r \times n}$ 和生成矩阵 $G_{k \times n}$ 拥有正交特性,这表明,对于具有k个线性独立行的任何生成矩阵 $G_{k \times n}$,存在具有 $r = (n-k)$ 个线性独立行的奇偶校验矩阵 $H_{r \times n}$ 。因此,生成矩阵 $G_{k \times n}$ 的任何行与奇偶校验矩阵 $H_{r \times n}$ 的行正交,使得以下等式被满足:

$$[0007] \quad G_{k \times n} \cdot H_{n \times r}^T = 0 \quad (1)$$

[0008] 可以借助于信息序列 IS_1 与生成矩阵 $G_{k \times n}$ 之间的乘法运算来执行编码操作,其中乘法运算的结果是编码信息序列 IS_2 :

$$[0009] \quad IS_2 = IS_1 \cdot G_{k \times n} \quad (2)$$

[0010] 在接收侧,由于生成矩阵 $G_{k \times n}$ 与奇偶校验矩阵 $H_{r \times n}$ 之间的正交特性,因此以下等式

应该被满足：

$$[0011] \quad H_{r \times n} \cdot IS_4^T = 0 \quad (3)$$

[0012] 其中, IS_4 是大小为 $1 \times n$ 的解码后的接收信息序列。如果验证了以上等式, 则可以假设信息序列估计 IS_4 是正确的。

[0013] 一旦生成奇偶校验矩阵 $H_{r \times n}$, 就可以获得生成矩阵 $G_{k \times n}$, 并且反之亦然。因此, 确定奇偶校验矩阵 $H_{r \times n}$ 的任何过程可以被映射到获得生成矩阵 $G_{k \times n}$ 的等效过程, 并且反之亦然, 使得在整个说明书和权利要求中公开的与确定奇偶校验矩阵 $H_{r \times n}$ 有关的任何过程应被理解为包含获得生成矩阵 $G_{k \times n}$ 的等效过程, 并且反之亦然。

[0014] 此外, 应当注意的是, 具有特定结构的奇偶校验矩阵 $H_{r \times n}$ ——例如具有双对角线结构的奇偶校验部分的奇偶校验矩阵 $H_{r \times n}$ ——的 LDPC 码使得能够使用 (仅) 奇偶校验矩阵 $H_{r \times n}$ 来进行对信息序列 IS_1 的编码, 从而可以不需要获得生成矩阵 $G_{k \times n}$ (参见 T.J. Richardson 和 R.L. Urbanke, “Efficient encoding of low-density parity-check codes”, IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY, 第 47 卷, 第 2 期, 第 638-656 页, 2002 年 8 月)。

[0015] 奇偶校验矩阵 $H_{r \times n}$ 的特定形式是规则 QC-LDPC 矩阵 ${}^{reg}H_{r \times n}^{QC}$, 规则 QC-LDPC 矩阵 ${}^{reg}H_{r \times n}^{QC}$ 可以被划分为二次 (quadratic) 子矩阵 $I(p_{j,1})$, 即循环矩阵 (或简称为“循环”), 规则 QC-LDPC 矩阵 ${}^{reg}H_{r \times n}^{QC}$ 可以例如根据将 $N \times N$ 的单位 (identity) 矩阵 $I(0)$ 循环右移 $p_{j,1}$ 个位置而获得:

$$[0016] \quad {}^{reg}H_{r \times n}^{QC} = \begin{bmatrix} I(p_{0,0}) & I(p_{0,1}) & \dots & I(p_{0,L-1}) \\ I(p_{1,0}) & I(p_{1,1}) & & I(p_{1,L-1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I(p_{J-1,0}) & I(p_{J-1,1}) & \dots & I(p_{J-1,L-1}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0017] 其中, $N = n/L$ (参见 M.P.C. Fossorier, “Quasi-Cyclic Low-Density Parity-Check Codes from Circulant Permutation Matrices”, IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY, 第 50 卷, 第 8 期, 第 1788-1793 页, 2004 年 8 月)。因此, 规则 QC-LDPC 矩阵 ${}^{reg}H_{r \times n}^{QC}$ 可以由满足以下矩阵的基矩阵 B 定义:

$$[0018] \quad B = \begin{bmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & \dots & P_{0,L-1} \\ P_{1,0} & P_{1,1} & & P_{1,L-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{J-1,0} & P_{J-1,1} & \dots & P_{J-1,L-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0019] 此外, 不规则 QC-LDPC 矩阵 ${}^{irreg}H_{r \times n}^{QC}$ 的基矩阵 B 可以通过 ${}^{irreg}H_{r \times n}^{QC} = B \circ M_{mask}$ 获得, 其中, “ \circ ” 表示 Hadamard 乘积, 并且

$$[0020] \quad M_{mask} = \begin{bmatrix} m_{0,0} & m_{0,1} & \dots & m_{0,L-1} \\ m_{1,0} & m_{1,1} & & m_{1,L-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{J-1,0} & m_{J-1,1} & \dots & m_{J-1,L-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

[0021] 表示掩蔽矩阵 (mask matrix), 其中, $m_{j,1} \in \{0, 1\}$ 。替选地, 不规则 QC-LDPC 矩阵 ${}^{irreg}H_{r \times n}^{QC}$ 的基矩阵 B 可以通过 (仅) 用移位值 $p_{j,1} \in \{0 \dots N\}$ 部分地标记基矩阵 B 来获得, 其中

未标记条目(有时通过值“-1”或星号“*”表示)表示大小为 $N \times N$ 的零矩阵。

[0022] 因此,为了在编码器12和解码器14中采用QC-LDPC码,编码器12和解码器14可以被提供循环移位值,即,与基矩阵B的标记条目和(可选)掩蔽矩阵 M_{mask} 相对应的值。例如,被配置成选择移位值以确定QC-LDPC矩阵 $H_{r \times n}^{QC}$ 的装置可以向编码器12和/或解码器14提供移位值。此外,编码器12和解码器14还可以被提供掩蔽矩阵 M_{mask} 以生成一个或更多个不规则QC-LDPC矩阵 $^{irreg}H_{r \times n}^{QC}$ 。

[0023] 另外,要注意的是,QC-LDPC矩阵 H^{QC} (更一般地,任何LDPC码)还可以通过其等效的二分图(“Tanner图”)来描述,其中,Tanner图的每个边线将多个变量节点中的一个变量节点连接到多个校验节点中的一个校验节点。例如,具有r行和n列的QC-LDPC矩阵 $H_{r \times n}^{QC}$ 可以用其等效的具有r个校验节点和n个变量节点的二分图表示,如果QC-LDPC矩阵 $H_{r \times n}^{QC}$ 中存在相应的“1”,则校验节点与变量节点之间具有边线。(参见R.Tanner,“A Recursive Approach to Low Complexity Codes”,IEEE TRANSACTIONS IN INFORMATION THEORY,第27卷,第5期,第533-547页,1981年9月)。在这方面,要注意的是,变量节点表示码字比特并且校验节点表示奇偶校验方程。

[0024] 尽管已知的信道编码方法已经被证明在各种场景中表现良好,但仍然在进行研究以提供利用适当的编码/解码资源实现高数据吞吐量的改进解决方案。

发明内容

[0025] 根据本发明的第一方面,提供了一种方法,该方法包括:提供用于编码或解码信息比特序列的不规则QC-LDPC码的基矩阵,其中,提供基矩阵包括:将基矩阵的一个或更多个第一列确定为比基矩阵的第二列具有更高的权重,将基矩阵的一个或更多个第一行确定为比基矩阵的第二行具有更高的权重,将由第二列的条目与第二行的条目的交集形成的第一子矩阵划分为第一二次子矩阵,标记每个第一二次子矩阵的每列中的最多一个条目和/或标记每个第一二次子矩阵的每行中的最多一个条目,以及标记一个或更多个第一列的条目和一个或更多个第一行的条目,其中,标记条目表示不规则QC-LDPC矩阵的与循环矩阵相对应的块,并且未标记条目表示不规则QC-LDPC矩阵的与零矩阵相对应的块。

[0026] 在这方面,要注意的是,在整个说明书和权利要求中使用的术语“循环矩阵”特别指代大小为 $N \times N$ 的二次矩阵,例如,大小为N的单位矩阵,其中,每个行向量相对于前一行向量被向右移位一个元素。此外,术语“循环大小”指代循环的大小N,并且可以被调整以适合码字 IS_2 的期望长度。另外,在整个说明书和权利要求中使用的术语“基矩阵”特别指代用移位值标记的阵列,其中,基矩阵的每个移位值给出循环例如单位矩阵的行将被循环(右)移位以生成与基矩阵相对应的QC-LDPC矩阵的子矩阵(或块)的次数。

[0027] 另外,要注意的是,形成“矩阵”的值不一定必须以矩阵(或阵列)形式呈现或物理存储,或者在涉及矩阵的整个过程中用于矩阵代数。确切地说,在整个说明书和权利要求中使用的术语“矩阵”同样可以指代具有指定的行索引和列索引的(整数)值集合,或者指代存储在(逻辑)存储器阵列中的(整数)值集合。此外,如果不涉及矩阵代数或者如果适当地重新定义相应的矩阵代数例程,则可以反转行和列的概念,使得行对应于变量节点,并且列对应于校验节点。因此,尽管在整个说明书和权利要求书中遵循了本领域中经常使用的符号

和数学概念,其中例如QC-LDPC矩阵的列被映射到变量节点并且QC-LDPC矩阵的行被映射到校验节点,但是它们应被理解为包含等同的符号和数学概念。

[0028] 另外,在整个说明书和权利要求中使用的术语“权重”特别指代基矩阵的行或列中的用移位值标记的条目数,即基矩阵的行或列中的不表示零矩阵的条目数,在使用单位矩阵作为循环的情况下,条目数等于不规则QC-LDPC矩阵的相应行和列中“1”的数量。在这方面,要注意的是,在整个说明书和权利要求中使用的术语“权重”可以与具有相同或相似含义的术语“节点度”或“密度”互换。另外,要注意的是,在整个说明书和权利要求中使用的“A和/或B”类型的表达旨在表示“A”、“B”或“A和B”。

[0029] 提供具有基矩阵的不规则QC-LDPC码通过促进“类似速龙(raptor)”的码结构而提高了解码效率,该基矩阵具有“非常低权重”的第一子矩阵和相对较少数量的“较高权重”的“包围”非常低权重的第一子矩阵的第一列和第一行,该码结构涉及较高权重的“外码”(与一个或更多个第一行相对应)和较低权重的“内码”(与第二行相对应)(参见Tsung-Yi Chen等人,“Protograph-based raptor-like LDPC codes”,IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS,第63卷,第5期,第1522-1532页,2015)。

[0030] 此外,内码的结构可能特别容易受到分层解码操作(即,遵循分层解码调度的解码操作)和泛洪(flooding)解码操作(即,遵循泛洪解码调度的解码操作)的影响,该分层解码操作涉及非常低权重的第一子矩阵(形成内码的一部分)的第一二次子矩阵的层,泛洪解码操作涉及较高权重的一个或更多个第一列。(关于分层解码调度和泛洪解码调度的原理及其性能,参见,例如,Y.-M.Chang等人,“Lower-complexity layered belief-propagation decoding of LDPC codes”,2008 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS,第1155-1160页,2008)。

[0031] 在根据第一方面的方法的第一可能实现形式中,存在涉及第一子矩阵的所有行的至少一个行顺序,其中,根据至少一个行顺序排序的第一二次子矩阵中的每一个的行没有垂直相邻的条目,或者其中,根据至少一个行顺序排序的第一子矩阵的行没有垂直相邻的条目。

[0032] 因此,正交标记的第一二次子矩阵可以被视为具有较大大小(例如,2N、3N、4N等)的循环,从而在解码期间实现高的并行度并且在保持高质量码的同时实现了紧凑的解码器结构。此外,第一子矩阵的结构可以使得能够进行涉及解码顺序(即,“至少一个顺序”)的分层解码操作,其中,在分层解码操作期间由涉及相同节点的相继处理的标记的行条目引起的停顿的数量或长度被减少。

[0033] 在根据第一方面本身或者根据第一方面的第一实现形式的方法的第二可能实现形式中,存在涉及第一子矩阵的所有行的至少一个行顺序,其中,由根据至少一个行顺序排序的第一子矩阵的行形成的矩阵的每列的所有标记条目由至少两个未标记条目垂直分隔。

[0034] 因此,可以选择第一子矩阵的结构以使得能够进行分层解码操作,其中,即使在解码器处的相对长的解码流水线的情况下,也进一步减少了停顿的数量或长度。

[0035] 在根据第一方面的第一或第二实现形式的方法的第三可能实现形式中,一个或更多个第一行是第一行并且标记第一行的条目还包括:将基矩阵的由第二列的条目与第一行的条目的交集形成的第二子矩阵划分为第二二次子矩阵,以及标记每个第二二次子矩阵的每列中的最多一个条目和/或标记每个第二二次子矩阵的每行中的最多一个条目。

[0036] 因此,增加了码结构对关于第二列的分层解码的敏感性,这允许进一步提高解码效率。

[0037] 在根据第一方面的第三实现形式的方法的第四可能实现形式中,根据至少一个行顺序排序的第二子矩阵中的每一个的行或者根据至少一个行顺序排序的第二子矩阵的行没有垂直相邻的条目。

[0038] 因此,可以选择第二子矩阵的结构以使得能够进行涉及解码顺序的分层解码操作,其中,可以减少在分层解码操作期间由涉及相同节点的相继处理的标记的行条目引起的停顿的数量或长度。

[0039] 在根据第一方面的第三实现形式的方法的第五可能实现形式中,由根据至少一个行顺序排序的第二子矩阵的行形成的矩阵的每列的所有标记条目由至少两个未标记条目垂直分隔。

[0040] 因此,可以选择第二子矩阵的结构以使得能够进行分层解码操作,其中,可以进一步减少停顿的数量或长度。

[0041] 在根据第一方面的第一至第五实现形式中的任一个的方法的第六可能实现形式中,存在基矩阵的一个或多个第三子矩阵,第三子矩阵通过移除基矩阵的第二行和/或第二列中的一个或多个获得,其中,基矩阵和一个或多个第三子矩阵的垂直相邻的或在第四矩阵的列中的垂直距离内的标记条目的数量分别低于阈值,第四矩阵由根据至少一个行顺序重新排序的第一子矩阵的行和一个或多个第一行的相应的一个或多个行向量形成,其中,最高阈值被分配给基矩阵,并且最低阈值被分配给与对应于一个或多个第三子矩阵的QC-LDPC码中的具有最高速率的QC-LDPC码相对应的第三子矩阵。

[0042] 因此,一个或多个第一行的标记条目提供与基矩阵相对应的“母”QC-LDPC码的“子”QC-LDPC码的核心基矩阵,其中,核心基矩阵的第二列在解码层之间包含比基矩阵更少的垂直相邻的标记条目,以允许在高速率码的解码期间实现最高吞吐量。

[0043] 在根据第一方面的第六实现形式的方法的第七可能实现形式中,最低阈值是1。

[0044] 因此,对于最高速率码,通过在易受分层解码操作影响的方案中有效地禁止垂直相邻的标记条目,可以避免由解码层之间的垂直相邻的标记条目引起的停顿。

[0045] 在根据第一方面的第六实现形式的方法的第八可能实现形式中,垂直距离是2。

[0046] 因此,可以选择第二列的结构以使得能够进行分层解码操作,其中,可以进一步减少停顿的数量或长度。

[0047] 在根据第一方面本身或者根据第一方面的第一至第八实现形式中的任一个的方法的第九可能实现形式中,不规则QC-LDPC矩阵的由与第二列的第一子集的条目和第一行的条目的交集相对应的块形成的第四子矩阵具有双对角线结构或三角结构。

[0048] 因此,促进了涉及外码的编码操作,因为对于编码不需要生成矩阵。

[0049] 在根据第一方面本身或者根据第一方面的第一至第九实现形式中的任一个的方法的第十可能实现形式中,不规则QC-LDPC矩阵的由与第二列的第二子集的条目和第二行的条目的交集相对应的块形成的第五子矩阵具有三角结构或单位矩阵结构。

[0050] 因此,促进了涉及内码的编码操作。

[0051] 在根据第一方面本身或者根据第一方面的第一至第十实现形式中的任一个的方法的第十一可能实现形式中,通过被划分为具有循环子矩阵和零子矩阵的块的基矩阵结构

的条目来标识第二列的待标记条目。

[0052] 因此,由于基矩阵结构的条目给出了基矩阵的结构,因此可以降低用于存储不规则QC-LDPC矩阵的基矩阵的存储要求。此外,基矩阵结构可以用于强制正交标记第一二次子矩阵和/或第二二次子矩阵,这向不规则QC-LDPC矩阵的与第一子矩阵和/或第二子矩阵相对应的一部分赋予双重正交性。

[0053] 在根据第一方面的第十一实现形式的方法的第十二可能实现形式中,通过基矩阵结构的条目来标识第一列的待标记条目,基矩阵结构包括具有多对角线循环子矩阵的块。

[0054] 在这方面,要注意的是,在整个说明书和权利要求中使用的术语“多对角线循环矩阵”特别指代每列和每行包括相同数量的非零条目的循环矩阵,其中,该数量是大于1的整数,与每列或每行中的非零条目的数量为1的“单对角线循环矩阵”相对。因此,由于基矩阵的非正交标记部分可以通过多对角线循环子矩阵的块来说明,因此可以进一步降低用于存储不规则QC-LDPC矩阵的基矩阵的存储要求。

[0055] 在根据第一方面本身或者根据第一方面的第一至第十二实现形式中的任一个的方法的第十三可能实现形式中,该方法还包括基于所提供的基矩阵的标记条目来确定与信息比特序列相对应的码字。

[0056] 因此,所提供的基矩阵可操作地用于编码操作,该编码操作例如可以包括外码编码操作(涉及外码)以及在使用外码编码操作确定码字的一部分之后执行的内码编码操作(涉及内码)。

[0057] 在根据第一方面或者根据第一方面的实现形式之一的的方法的第十四可能实现形式中,存在涉及基矩阵的所有行的至少一个行顺序,其中,根据至少一个行顺序排序的基矩阵的从给定行开始的行是正交行。正交行是没有垂直相邻条目的行。

[0058] 在根据第一方面或者根据第一方面的实现形式之一的的方法的第十五可能实现形式中,存在涉及基矩阵的所有行的至少一个行顺序,其中,由根据至少一个顺序排序的基矩阵的给定行集合形成的子矩阵由正交行组组成。正交行组是没有垂直相邻条目的行组。

[0059] 在第一方面的又一实现形式中,正交行组之间不存在垂直相邻的标记条目对。

[0060] 在第一方面的又一实现形式中,正交行组之间的冲突的数量通过某个阈值来限制。

[0061] 在根据第一方面的方法的又一实现形式中,该方法还包括:除了被指示为被删截(punctured)的信息比特之外,发送码字。

[0062] 因此,可以增加码的传输速率。

[0063] 在根据第一方面的方法的又一实现形式中,该方法还包括:将与一个或更多个第一列相对应的信息比特指示为被删截。

[0064] 在这方面,要注意的是,在整个说明书和权利要求中使用的与信息比特(或相应的变量节点或相应列)有关的术语“被删截”特别指代:信息比特仅由编码器使用,但是不传输至解码器,或者实际上视为不被解码器接收。更进一步地,在整个说明书和权利要求中使用的与列、节点和信息比特有关的术语“相对应”特别指代:按照不规则QC-LDPC矩阵的Tanner图表示的列与变量节点/信息比特之间的映射。

[0065] 因此,可能存在相对少量的被删截列,例如,与一个或更多个第一列相对应的列,然而,一个或更多个第一列具有相对高的权重(例如,超过第二列的平均权重的两倍或三

倍),从而提供了形成用于分层解码操作的层的第一子矩阵的相互正交的行组的良好“连接性(connectivity)”。

[0066] 在根据第一方面的方法的又一实现形式中,该方法还包括基于基矩阵的条目对接收到的信息比特序列进行解码,其中,解码包括泛洪解码操作和分层解码操作,其中,分层解码操作基于第一子矩阵。

[0067] 根据本发明的第二方面,提供了一种解码器,包括:存储不规则QC-LDPC码的基矩阵的条目的非暂态存储器,其中,基矩阵的列包括一个或更多个第一列和第二列,第二列形成包括正交行组的矩阵,其中,解码器被配置成基于涉及与一个或更多个第一列相对应的变量节点的泛洪解码操作或者泛洪解码操作和分层解码操作以及涉及与第二列相对应的节点的分层解码操作来解码接收到的信息比特序列。

[0068] 因此,如上所述,可以在保持码质量和解码处理的高并行性的同时提高解码收敛性,从而以低错误率实现高吞吐量。

[0069] 在根据第二方面的解码器的第一可能实现形式中,解码器还被配置成按照不同组的相继处理的行没有垂直相邻的条目的顺序来处理与第六子矩阵的行相对应的分层解码操作。

[0070] 因此,可以避免由垂直相邻的标记条目对分层解码引起的停顿。

[0071] 在根据第二方面的解码器的第二可能实现形式中,解码器还被配置成在解码过程中忽略基矩阵的与正交行组中的一个或更多个相对应的行和基矩阵的相应列,以调整基矩阵以适应不同的编码速率,其中,解码器还被配置成按照不同组的相继处理的行的垂直相邻条目被最小化的顺序来分别处理与调整后的基矩阵和基矩阵的第六子矩阵的行相对应的分层解码操作。

[0072] 因此,对于不同的码速率,可以减少由垂直相邻的标记条目对分层解码引起的停顿。

[0073] 根据本发明的第三方面,提供了一种非暂态计算机可读介质,其存储指令,该指令在由计算机执行时使计算机提供:不规则QC-LDPC矩阵的基矩阵,基矩阵由具有表示不规则QC-LDPC矩阵的块的条目的列和行形成,其中,基矩阵的一个或更多个第一列比基矩阵的第二列具有更高的权重,并且基矩阵的一个或更多个第一行比基矩阵的第二行具有更高的权重,并且其中,由第二列的条目与第一行和第二行的条目的交集形成的第一子矩阵被划分为第一子矩阵,第一子矩阵的行被正交地标记。

[0074] 因此,如上所述,通过促进涉及较高权重外码(与一个或更多个第一行相对应)和较低权重内码(与第二行相对应)的“类似速龙”的码结构,可以提高解码效率,该内码特别容易受到分层解码操作和泛洪解码操作的影响,该分层解码操作涉及正交标记的“非常低权重”的第一子矩阵(形成内码的一部分),泛洪解码操作与一个或更多个较高权重的第一列有关。此外,如果第一子矩阵是二次的并且还具正交标记的列,则第一子矩阵可以被视为具有更大大小(例如,2N、3N、4N等)的单个循环,从而在解码期间实现高的并行度并且在保持高质量码的同时实现紧凑的解码器结构。

附图说明

[0075] 图1示出了数字通信系统的示意图;

[0076] 图2示出了提供用于编码或解码信息比特序列的不规则QC-LDPC码的基矩阵的过程的流程图；

[0077] 图3进一步示出了图2的过程；

[0078] 图4示出了基于根据图2和图3的过程提供的不规则QC-LDPC码的基矩阵的速率自适应；

[0079] 图5示出了采用根据图2和图3的过程提供的不规则QC-LDPC码的解码过程的流程图；

[0080] 图6示出了不规则QC-LDPC码的示例性基矩阵的层之间的冲突；

[0081] 图7示出了不规则QC-LDPC码的具有准正交行组 (group of row) 和完全正交行组的基矩阵的示例；

[0082] 图8示出了不规则QC-LDPC码的具有准正交和完全正交的非冲突扩展的基矩阵的示例；以及

[0083] 图9示出了不规则QC-LDPC码的具有与速率的子范围相对应的完全正交行集合 (set of row) 的基矩阵的示例。

具体实施方式

[0084] 图2和图3涉及提供不规则QC-LDPC码的过程22, 该不规则QC-LDPC码分别用于编码或解码信息比特序列, 例如信息序列 IS_1 和 IS_3 。过程22可以例如是计算机实现的。例如, 过程22可以通过持久存储的计算机可读指令来实现, 该计算机可读指令如果被计算机执行则使计算机执行过程22。所提供的不规则QC-LDPC码的基矩阵B的条目可以例如被提供给数字通信系统10的编码器12和解码器14, 并分别用于由编码器12和解码器14执行的编码操作或解码操作, 即分别用于编码或解码信息比特序列 IS_1 和 IS_3 。

[0085] 提供用于编码或解码信息比特序列的不规则QC-LDPC码的过程22可以开始于步骤24和步骤26, 在步骤24和步骤26中, 将不规则QC-LDPC码的基矩阵B的一个或多个第一列28确定为比基矩阵B的第二列30a-30c具有更高的权重, 并且将基矩阵B的一个或多个第一行32确定为比基矩阵B的第二行34a、34b具有更高的权重。例如, 如图3所示, 确定基矩阵B的一个或多个第一列28可以涉及生成基矩阵结构38的步骤36。基矩阵结构38可以被划分为具有(多对角线)循环子矩阵(在图3所示的特定示例中由范围从1到3的循环移位指示, 尽管其他范围是可能的)和零子矩阵(在图3所示的特定示例中由未标记的空白条目指示)的块, 在步骤40处, 其可以用于标识基矩阵B的待标记条目。

[0086] 如图3所示, 第二列30a-30b与第二行34a、34b的交集形成第一子矩阵, 如图2所示的流程图的步骤42所指示的, 第一子矩阵可以被划分为具有第一大小(例如, 如图3示例性示出的大小3, 尽管大小还可以是2、4、5等)的第一二次子矩阵, 如流程图的步骤44所指示的, 第一二次子矩阵将被正交地标记, 从而将第一子矩阵划分为正交标记的行组的层, 其中, 正交标记的行的数量与第一大小相对应。在图3的特定示例中, 同样的操作适用于形成第二子矩阵的第二列30a-30b与第一行32的交集。

[0087] 然而, 要注意的是, 第二子矩阵还可以被划分为具有等于或小于第一大小的第二大小的将被正交标记的第二二次子矩阵, 以及/或者被划分为具有第二大小的将不被正交标记的第二二次子矩阵。此外, 在图2所示的流程图的步骤44、46指示的标记过程之前, 一个

或更多个二次子矩阵可以用一个或更多个不同正交标记的二次子矩阵替换,如在图3中描绘的步骤48处示例性地示出的。特别地,如下面将进一步详细讨论的,所述替换可用于增加码性能或者减少不同解码层的垂直相邻条目的数量。

[0088] 在图3所示的步骤50处,可以通过将移位值与每个待标记条目相关联来完成标记基矩阵B的条目。在这方面,可以注意到,可以为移位值选择不同的范围以支持不同的码字长度,并且在不偏离本发明构思的情况下,考虑到如现有技术中已知的整体码性能,在所选范围内对移位值的选择可以涉及一种或更多种优化技术,例如渐进边缘增长。此外,要注意的是,尽管不规则QC-LDPC矩阵的由与第二列30a-30c的第一子集30b的条目和第一行32的条目的交集相对应的块形成的第四子矩阵具有(下)三角结构,但是为了便于编码,第四子矩阵还可以具有例如如图4所示的双对角线结构或者任何其他结构。

[0089] 此外,如图4所示,使用图2和图3中描绘的过程生成的不规则QC-LDPC矩阵可以被划分为外码和内码,外码包括由一个或更多个第一行32的条目表示的块,内码由第二行34a、34b的条目表示。此外,如上所述,在忽略由第一列28表示的块——块例如可以被删截——的情况下,第二行34a、34b可以进一步被划分为正交行的层。换句话说,不规则QC-LDPC矩阵可以包括形成外码的高密度部分(在图4的左上方用灰色表示)中的“核心”基矩阵和形成内码的速率自适应扩展部分。

[0090] 另外,要注意的是,尽管图3的示例示出了不规则QC-LDPC码的基矩阵B,其中,基矩阵B被划分为第一列28和比第一列28具有更低的权重的第二列30a-30c,但是基矩阵B还可以包括一个或更多个第一列28以及比一个或更多个第一列28权重更低的一个或更多个第三列28'。此外,一个或更多个第三列28'还可以如图4所示地被删截。此外,要注意的是,行和列可以自由地置换而不影响码性能,因此,考虑到码性能,任何描绘的基矩阵B或基矩阵结构38实际上等同于由相同的行和列组成的任何其他基矩阵B或基矩阵结构38。这同样适用于与其相关地论述的原理。

[0091] 继续图4,如果需要最高速率,则可以仅使用核心基矩阵的移位值来编码信息序列 IS_1 。如果较低的速率是可接受的,则可以将额外的第二行和第二列附加到核心基矩阵。如上所述,额外的第二行比核心基矩阵的第一行具有更低的权重,并且提供(与所添加的“相应的”第二列相结合地)待发送的码字中的额外的奇偶校验位。因此,要注意的是,除了使编码器12和解码器14能够基于所提供的基矩阵B执行编码操作和解码操作之外,编码器12和解码器14还可以使用所提供的基矩阵B根据不同的传输场景——例如,在信道质量和/或吞吐量要求方面彼此不同的传输场景——通过例如移除(或忽略)内码的第二行和/或第二列来得到不同速率的不规则QC-LDPC子码。

[0092] 如图4所示,额外的第二行与第二列之间的交叠(交集)(可以被称为第五子矩阵)可以形成单位矩阵以促进对内码的编码,尽管还可以替代地使用双对角线形式或(下)三角形式。此外,基矩阵B的表示外码的一部分可以包括一个、两个、三个或更多个较高权重的列,较高权重的列可以比外码的所有其他列具有高得多的权重。例如,一个、两个或所有较高权重的第一列可以没有空单元,即没有表示零矩阵的条目。另外,如上所述,与一个或更多个较高权重的第一列28相对应的变量节点和/或与一个或更多个第三列28'相对应的变量节点可以被指示为删截,并且“剩余”子行可以被分组为正交子行(或行向量)的(非交叠)层,以允许将被并行执行的分层解码操作。另外,在解码期间,基矩阵B的第一(和第二)二次

的特性。这在图7中示出。

[0100] 这种情况的特殊类型是在该完全正交扩展中的任何两个相邻行之间没有冲突,或者冲突的数量受某个阈值限制。这在图8中示出。

[0101] 在另一实施方式中,这样的行组(对应于嵌套码的速率范围和它们的相应处理顺序)可以与矩阵的行的子集相对应,行的子集不一定等于基矩阵(PCM矩阵)的最低行。这种情况的特殊类型是该行的子集中的任何两个相邻行之间现在存在冲突。这在图9中示出。

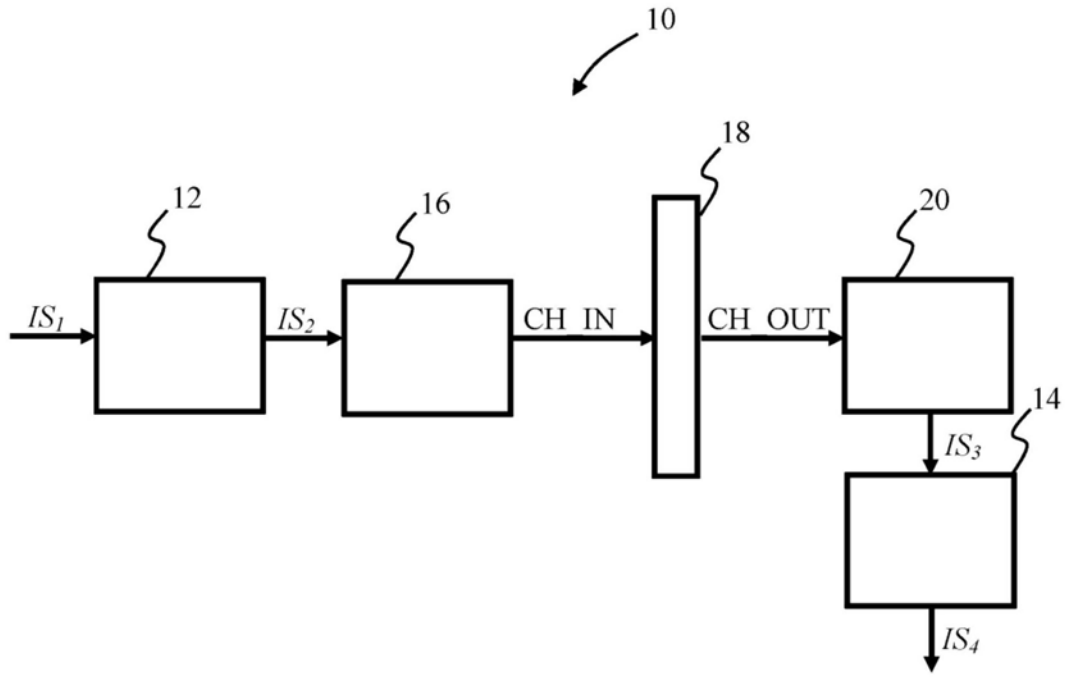


图1

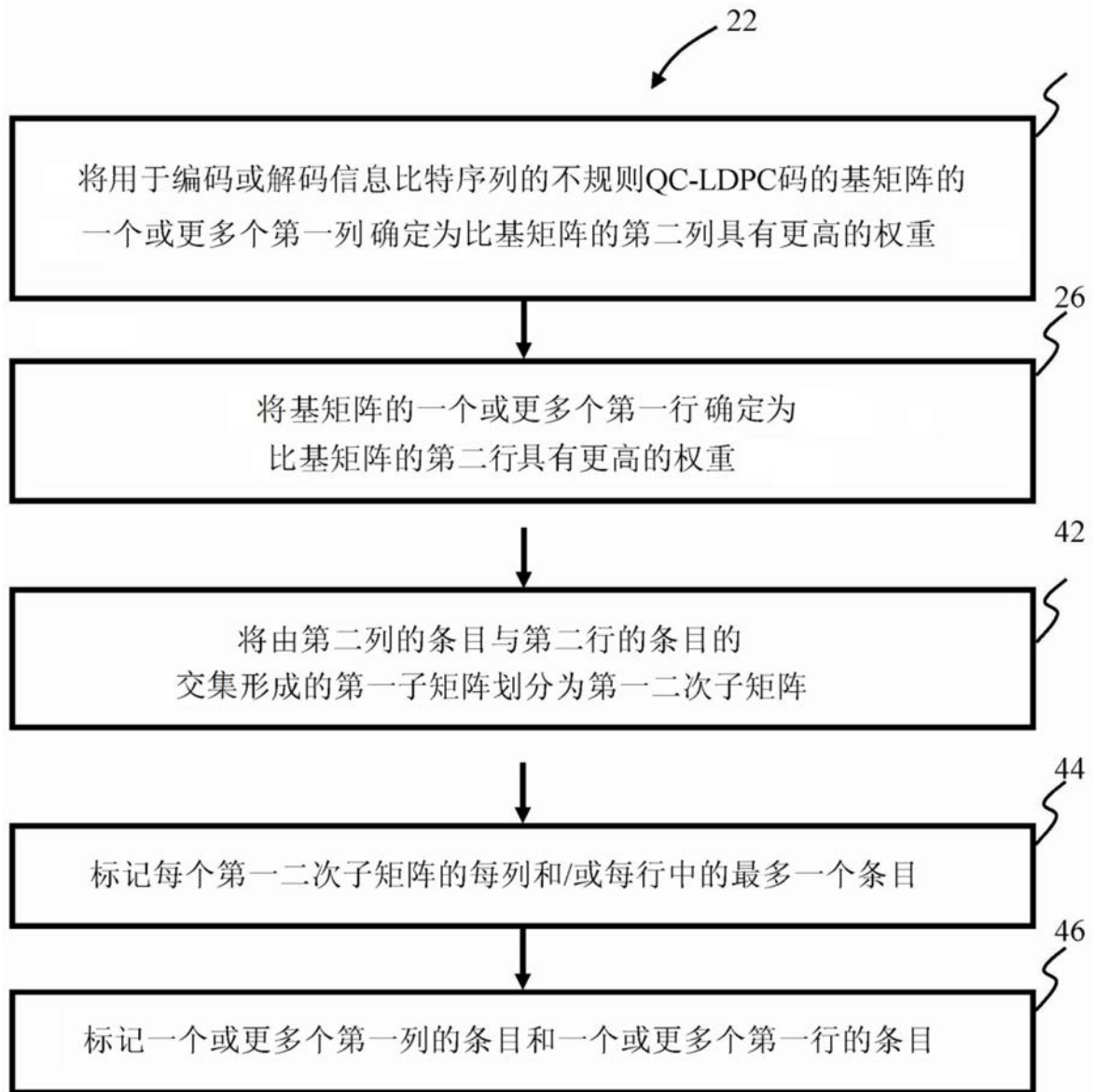


图2

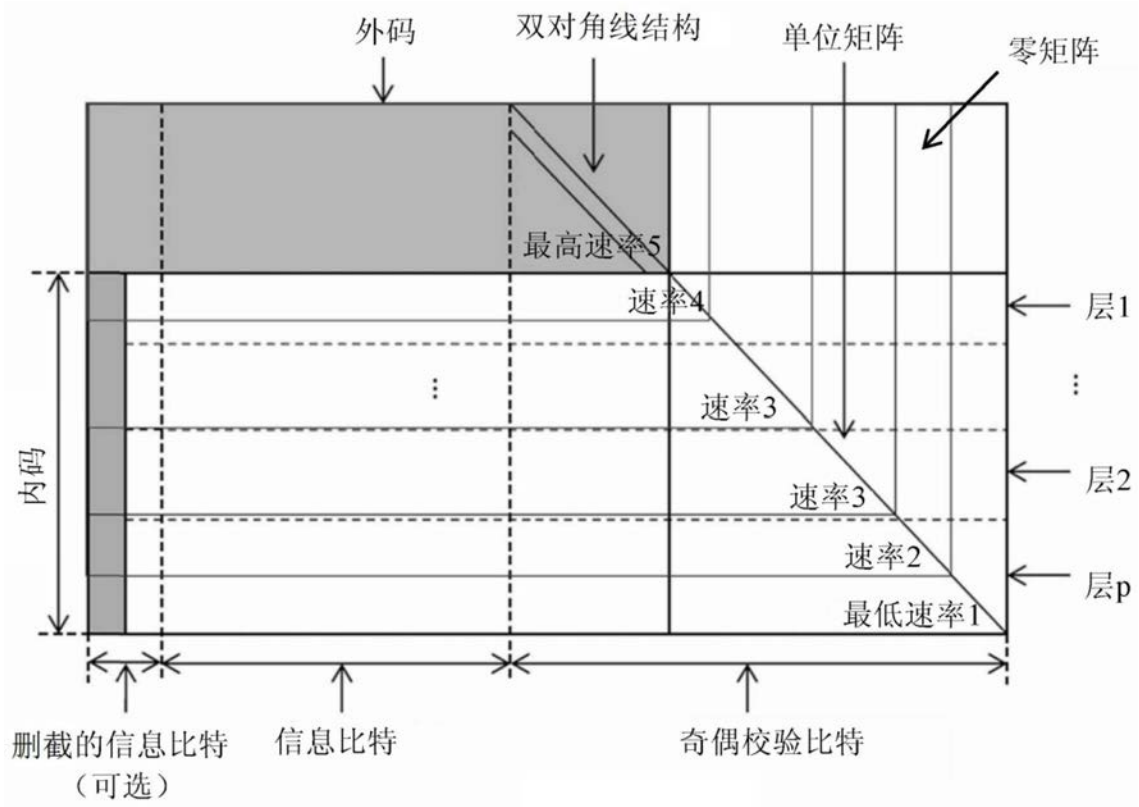


图4

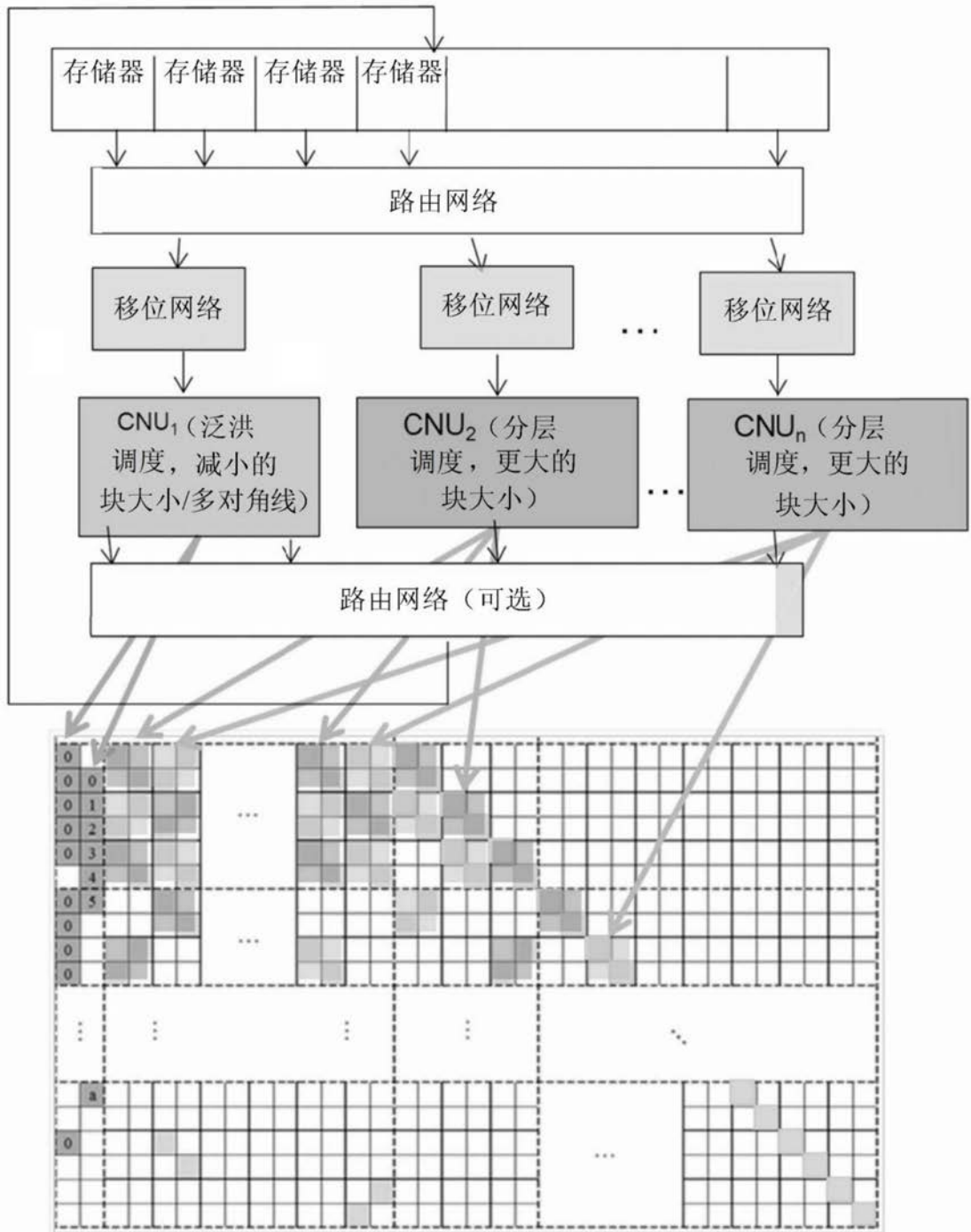


图5

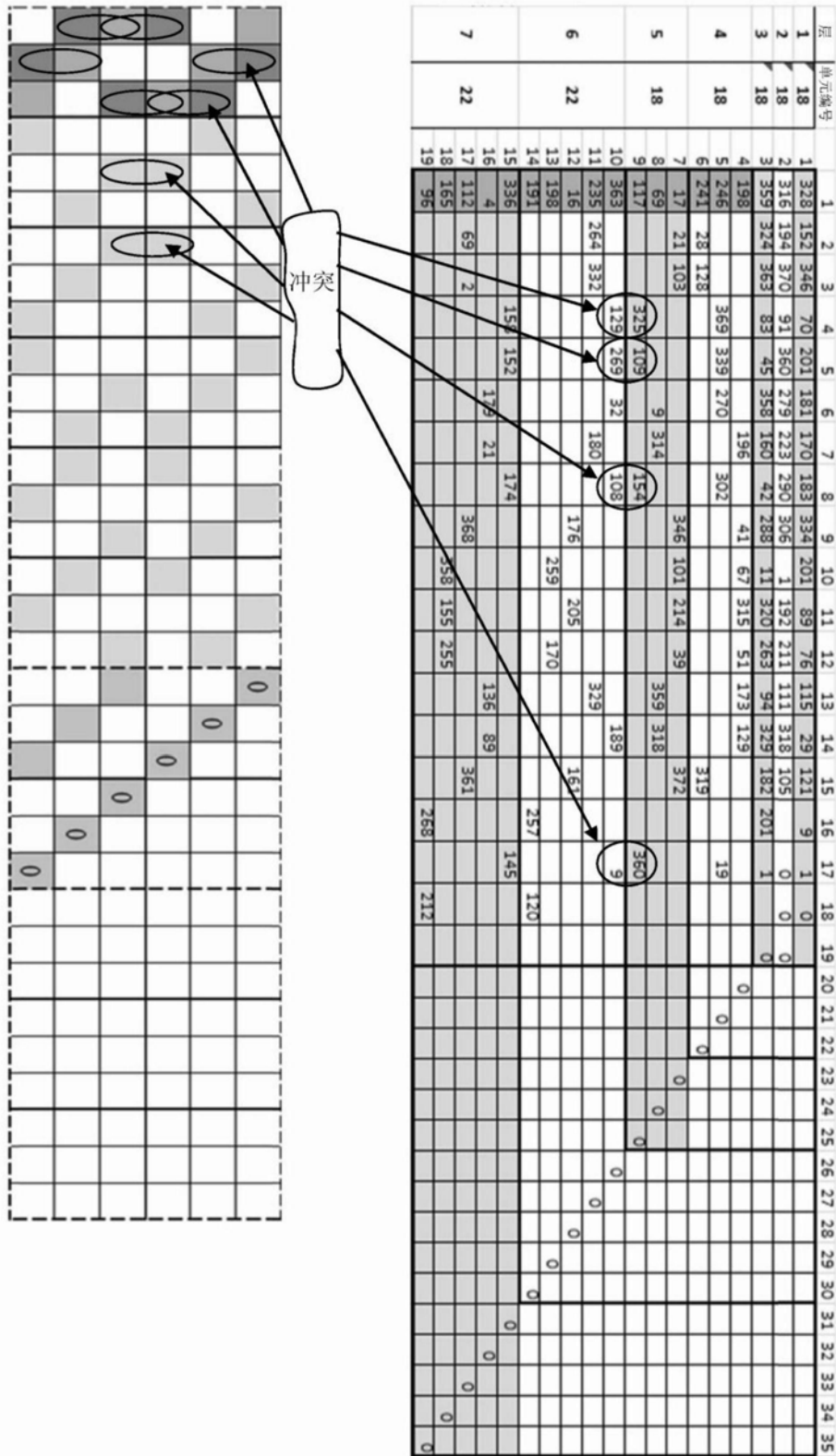


图6

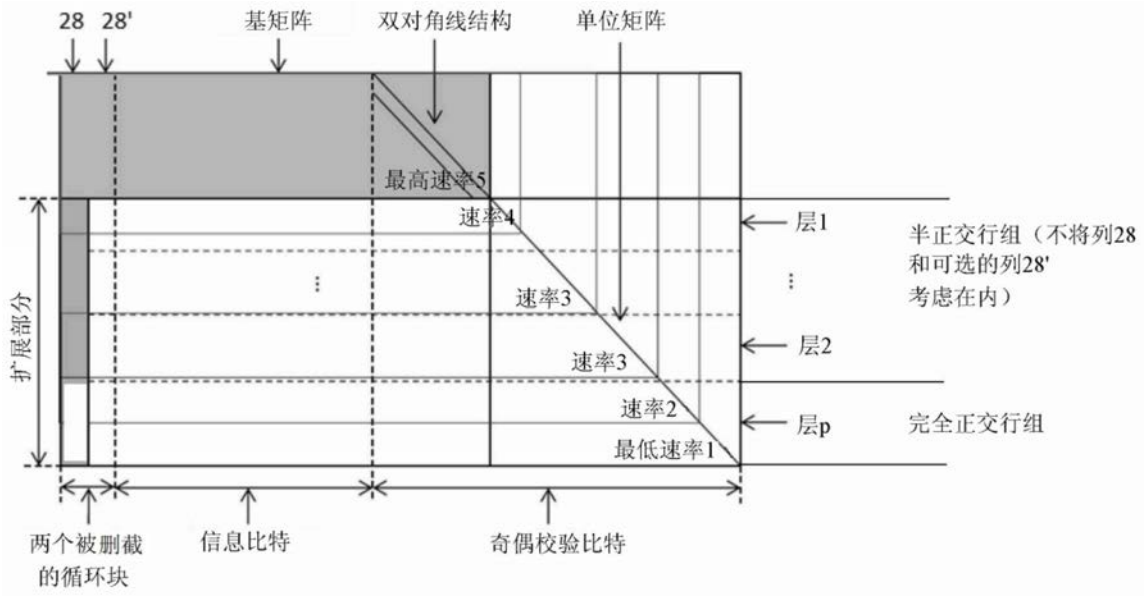


图7

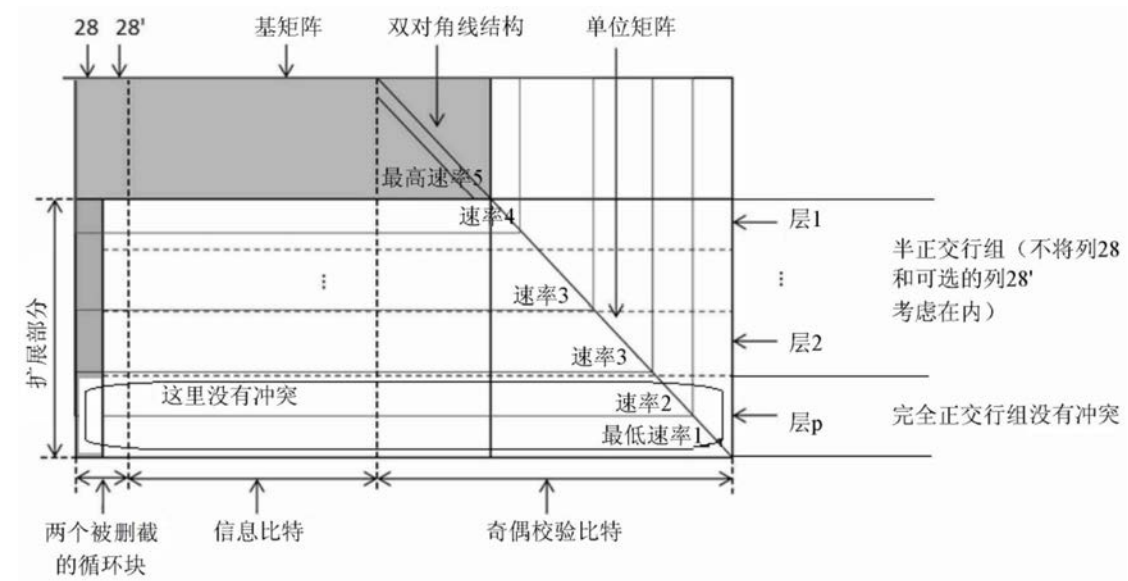


图8

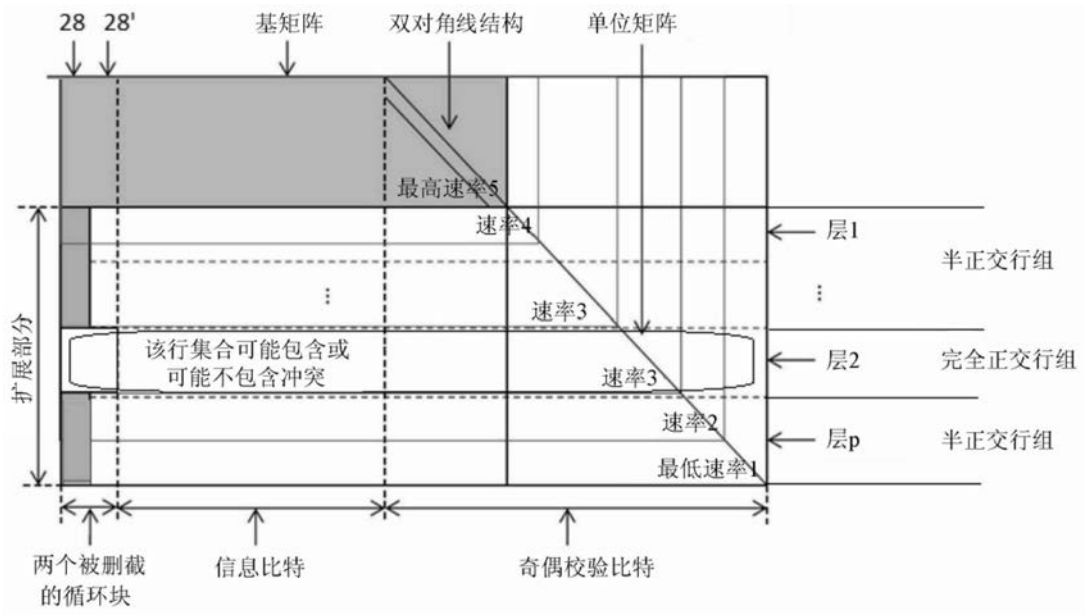


图9