

准循环 LDPC 码高速译码实现方法

王 健,李集林,战勇杰

(北京卫星信息工程研究所,北京 100083)

摘 要:20 世纪 60 年代初,香农的学生 Gallager 在他的博士毕业论文中首次提出了 LDPC 码的概念和完整的译码方法,但是直到上世纪末期,随着 LDPC 码译码理论的进步和计算机技术的发展,LDPC 码才以其优良的误码性能成为人们研究的焦点。目前 LDPC 码正向着高速高增益的方向发展。文中针对目前对高速 LDPC 码译码技术的迫切需求,以 CCSDS 标准近地通信(8176,7154)LDPC 码为研究对象,在传统高速译码实现方案所用资源不变的前提下,利用该校验矩阵中 1 的排列特点,仅通过改变水平运算过程中数据处理的流程,来增大水平运算和垂直运算之间的复用程度,从而达到大大提高译码速度的目的。采用文中给出的方案对 CCSDS 近地通信标准(8176,7154)LDPC 码进行译码,每个水平迭代周期可以减少近 10% 的运算时间。该方案同样适用于其他的 QC-LDPC 码。

关键词:LDPC;准循环;高速;数据分配

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)02-0028-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.02.007

Implementation for High Speed Decoder of QC-LDPC Code

WANG Jian,LI Ji-lin,ZHAN Yong-jie

(Beijing Institute of Satellite Information Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract:At the beginning of 60's of last century, Gallager, the student of Shannon, issued the concept and a whole set of method for decoding of LDPC code at the first time in the world. But the LDPC code had not been on the focus of the research with its super performance until the end of the last century, for the improvement of the decoding theory and the development of the computer technology. Nowadays, the LDPC code is developing aiming at high speed and super performance. It studies the (8176,7154) LDPC code in the CCSDS near earth standard, aiming at the exigent demand of the high speed LDPC decoder. This method uses the character of the "1"s to enhance the overlapped degree to improve the speed significantly of the decoder by the only change of the processing order of the CNU without any resource increase comparing with the traditional method. The decoder of the CCSDS near earth standard (8176,7154) LDPC code can save computation 10% by this method. And this implementation can also be used to other QC-LDPC codes.

Key words:LDPC;quasi-cyclic;high speed;data distribution

0 引言

近几年,人们对可靠高效的信息传输和存储技术提出了越来越高的要求。差错控制编码作为一种纠正由信道噪声带来传输错误的有效方式,被广泛应用于数字通信和存储等领域。由信道编码理论,对于一个信道容量为 C 的信道,信息速率 $R \leq C$ 时,总存在一种编码方式,能够在最大似然译码的条件下,使得译码错误任意的小。由于极大似然算法这种典型的译码方法的实现复杂度会随着码长的增长而迅速的增加,因此人们致力于找到新的码型,以便采用简单的方法就可

以进行译码,而且性能接近于极大似然译码。Low-Density Parity-Check(LDPC)码发明于 20 世纪 60 年代初期^[1],它是一类性能接近香农极限的差错控制编码,采用置信传播的译码方式进行译码^[2]。由于当时计算能力的不足,LDPC 码只能停留在理论阶段,实用化受到了很大的限制;另外当时人们普遍认为新诞生的级联码将会是未来译码方式的主要发展方向。这导致了 LDPC 码被忽视了 30 多年。随着 VLSI 和计算机技术革命性进步的到来,LDPC 码的实现成为了可能,在 20 世纪 90 年代末期,LDPC 码重新回到了人们的视野,并且由于在 AWGN 信道下的极佳误码性能和很好的可高速实现性起了人们的强烈关注^[3]。

1 传统的高速译码方案的不足

传统的双向译码方案存在下面的问题导致难以大

收稿日期:2012-06-18;修回日期:2012-09-20

基金项目:国家“863”高技术发展计划项目(2009AA12Z149)

作者简介:王 健(1982-),男,黑龙江哈尔滨人,博士,研究方向为 LDPC 码的编译码技术;李集林,研究员,研究方向为卫星通信与卫星遥感信息处理技术。

幅度地提升译码速度^[4,5]。

CNU 和 VNU 的利用率各 50%,没有充分发挥运算单元的作用。

因为最小和算法是顺序执行的算法,只有进行完水平运算才能够进行垂直运算,因此在不进行“交叠”实现的前提下,CNU 和 VNU 的利用率很难有本质的提升^[6]。

2 文中所采用的译码算法

LDPC 码的译码算法主要分为软译码算法和硬译码算法,通常情况下采用软译码算法译码获得的编码增益比较高,虽然后来人们提出了很多针对 BP 算法、最小和算法、BF 算法的改进算法,但是在大多数情况下,众多软译码算法中具备实现价值的译码方法之一仍是 BP 算法的改进算法之一,最小和算法^[7,8]。

传统最小和算法的水平运算公式:

$$L_{mn}^{(k)} = \prod_{n \in N(m) \setminus n} \operatorname{sgn}(Z_{mn}^{(k-1)}) \bullet \min_{n \in N(m) \setminus n} |Z_{mn}^{(k-1)}| \quad (1)$$

垂直运算公式:

$$Z_{mn}^{(k)} = Z_n^{(0)} + \sum_{m' \in M(n) \setminus m} L_{m'n}^{(k)} \quad (2)$$

判决公式:

$$Z_n^{(k)} = Z_n^{(0)} + \sum_{m \in M(n)} L_{mn}^{(k)} \quad (3)$$

后来人们改进了最小和算法,提出了 Normalized BP 和 Offset BP 两种算法,这两种算法在本质上是等价的^[9],都极大地改进了最小和算法的译码精度,使得最小和算法的编码增益更加接近传统的 BP 算法^[10~12],Normalized BP 算法与传统的最小和算法的区别主要表现在水平运算步骤上,水平运算步骤改为^[13]:

$$L_{mn}^{(k)} \leftarrow (1/\lambda_k) L_{mn}^{(k)} \quad (4)$$

前面的乘性因子的数据选择通常范围是 0.7~0.8。

Offset BP 算法的水平运算过程为:

$$L_{mn}^{(k)} \leftarrow \operatorname{sgn}(L_{mn}^{(k)}) \max(|L_{mn}^{(k)}| - \beta, 0) \quad (5)$$

式(5)中的 β 称为偏移因子,该式将所有小于 β 的校验消息设为 0,它们对变量节点消息的计算没有影响。

目前这两种算法中以 Normalized BP 算法应用较为广泛。文中采用了 Normalized BP 算法,图 1 给出了 Normalized BP 的参数选择情况,如图所示,在参数值为 1.25 时得到了最小和算法的最好修正结果,但是通常在实现过程中,为了利于硬件功能的实现,会将 $(1/\lambda_k)$ 的值设为 0.75,这样便于硬件乘法的实现。

3 文中所采用的范例码

基于 EG(欧式几何)的 QC(准循环) LDPC 码属

于线性分组码,该类码的构造是基于欧式几何有限域的分解的。(8176,7154) LDPC 码最初是为 NASA 设计的,它是一个规则的 QC LDPC 码,行重 32,列重 4。目前(8176,7154) LDPC 码^[14]是 CCSDS 推荐的近地通信码,它具有很好的规则性,目前已被应用于遥感卫星等航天器的近地通信领域。

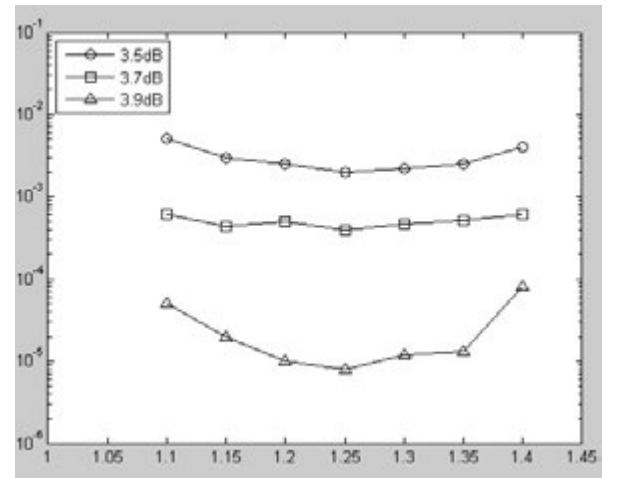


图 1 Normalized BP 的参数选择

本部分内容给出的 CCSDS 近地通信(8176,7154) QC-LDPC 码的译码方法,同样适用于其他的每个循环子矩阵中有 1 组或 2 组 1 的 QC-LDPC 码情况。

4 改进的进行水平运算的过程

为了简化问题,便于说明,下面以一个 2×2 的循环子矩阵阵列组成的 H 矩阵为例,说明该改进方法。图 2 给出了一个 2×2 的循环子矩阵阵列,每个循环子矩阵都是 8×8 规格的,而且每个循环子矩阵的列重都是 2,也就是说每个循环子矩阵中有两组循环移位的 1。它们的初始位置如表 1 校验矩阵列起始位置表所示。

表 1 校验矩阵列起始位置表

循环矩阵	起始列位置	循环矩阵	起始列位置
AC	0,6	BC	3,6
AD	1,7	BD	2,5

如图 2 所示,在校验矩阵中,水平运算按照由上到下的顺序进行运算,垂直运算按照由左至右的顺序进行运算,每个循环子矩阵中的 1 参与水平运算和垂直运算的顺序都是按照箭头所指方向进行。

改进方案的主要想法是要进行水平运算与垂直运算之间的复用,使得整个计算过程不等水平运算结束就已经进行了垂直运算。对提前进行垂直运算的要求是:

1. 运算方向必须都以每个循环子矩阵中的 1 参与运算的顺序为准;

2. 提前进行的垂直运算不能影响还未完成的水平运算。

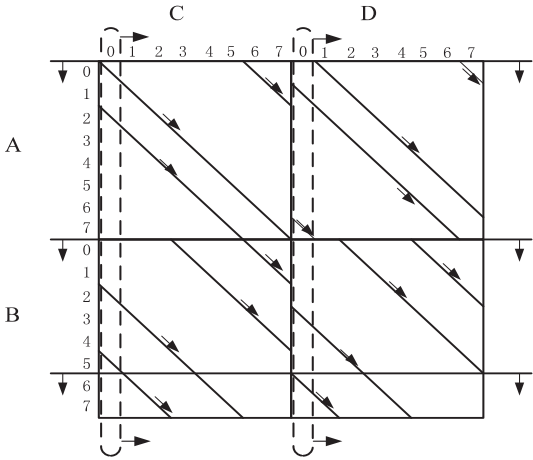


图 2 行重列重都为 4 的校验矩阵

为了满足以上两个条件,首先假设每个循环子矩阵中的 1 参与运算的顺序是按照图 2 中箭头所示方向由左上方到右下方进行的,在这个前提下,水平运算要求从上至下一行一行的扫描,垂直运算要求由左至右一一列一列扫描。同时,为了保证提前进行的垂直运算不能影响还未完成的水平运算,要求参与对应列垂直运算的数据已经进行完水平运算,同时垂直运算的结果对存储器值的修改不影响接下来要进行的水平运算。

若要从第 1 列进行垂直运算就需要等到列块 AC 块中的 0,2 两行信息,BC 块中的 2,5 两行信息;同时需要得到 AD 块中的 1,7 两行信息,BD 块中的 3,6 两行信息。于是得出结论,若要提前并行进行第 1 列的列运算就需要得到 0、1、2、3、5、6 和 7 共 7 行的信息,可以看出这样的要求基本覆盖了整个行运算的区域,因此无法在进行完行运算之前提前进行列运算。

但是如果在行块 B 已经完成运算的前提下考虑该问题就容易了很多。假设行块 B 已经进行完水平运算,接下来看行块 A,如图 3 所示,运算后的信息已经存储到了 R 存储器(用来存储水平运算结果的存储器)的相应行位置,这样若要进行第 1 列的列运算就只需要第 0、1、2 和 7 四行的信息了。显然在进行完行块 A 第 7 行的运算之后进行第 1 列的垂直运算是不会影响到接下来的水平运算的。因为待完成的水平运算只存在于区域 3 中,即只与 AC 循环子矩阵的 5、7 两列有关,同时只与 AD 循环子矩阵中的 0、6 两列有关,这其中与当时要进行的水平运算有关的列只有 AD 循环子矩阵中的第 7 行,第 0 列。因此先计算完毕第行块 A 的第 7 行就能够进行列运算了,由于每个循环子矩阵中 1 参与运算的顺序是左上到右下的,与行列运算方向相同,因此接下来要进行的列运算无论如何也不会

“追上”未进行完的行运算。同时该种运算方式并不会对 R 存储器中存储的数据造成任何的影响,因为不同的行信息是存储在不同的地址中的,因此对于 R 存储器来说,先进行哪行的运算,后进行哪行的运算都是无关紧要的,只要行运算能够遍历所有的行就可以了。

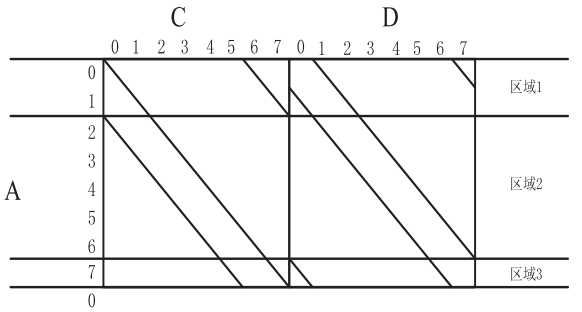


图 3 图 2 中的行块 A

上面的论述,最终可以总结为,当行块 B 已经进行完水平运算的时候,找到行块 A 中所有循环子矩阵中初始行位置的最大值,在本例中该值为 7。因为水平运算、垂直运算和每组 1 参与运算的方向是相同的,因此,只要在这个初始行位置的最大值的位置开始复用过程,后面进行的列运算就永远不可能对行运算构成影响了。

可以把每个行块进行进一步的划分,如图 3 所示,行块 A 被分成了 3 个区域,图 4 将行块 B 分成了 4 个区域。只要在每一个区域内水平运算、垂直运算和每组 1 参与运算的顺序是相同的,不论先进行哪行的运算,都不破坏前面所述的前提条件。

于是把上面的想法进行拓展,可以很容易地想到,假设已经完成了行块 B 的水平运算过程,接下来想得到的并不一定是行块 A 中列初始位置的最大值,而是所有列初始位置的一个相对的最大差值,最大差值代表了最大的距离。仍以图 3 为例,能够开始进行第 1 列运算的所有行初始位置是 0、1、2 和 7,差值分别为 $1-0=1$, $2-1=1$, $7-2=5$ 以及 $8-7=1$ 。可以看出最大差值为 5,也就是说复用度为 $5-1=4$,发生在第 7 行与第 2 行之间,也就是区域 2。

可以看出,在进行完行块 B 的水平运算的前提下,如果首先进行行块 A 中的区域 1 和区域 3 中的行运算,然后在进行区域 2 中的行运算,在开始进行区域 2 的行运算的时候就同时开始了每个列块从左至右的列运算,该方法相比上面所述的寻找最大行初始值的方法可以提前 $5-1=4$ 个周期进行列运算的复用。

于是将这一理论进一步应用于行块 B,如图 4 所示,行块 B 若要从左侧开始进行列运算,则需要知道第 2、3、5 和 6 行的信息。行初始值 2、3、5 和 6 的差值分别为 $3-2=1$, $5-3=2$, $6-5=1$ 以及 $8-6=2$ 。因此最大差值为 2,不如行块 A 中的最大差值大,也就是说,

如果首先进行完毕了行块 A 的水平运算,再进行行块 B 的水平运算,能得到的垂直运算的复用度最多为 $2-1=1$,远远小于先进行行块 B 的运算再进行行块 A 的运算的 4 复用度。

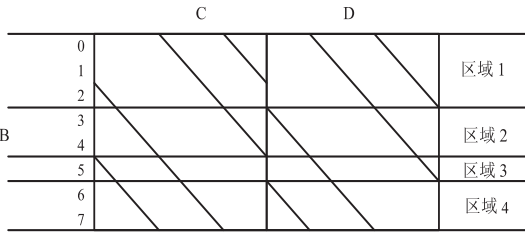


图 4 图 2 中的行块 B

因此得出结论,针对该例子给出的校验矩阵 H ,若要最大限度地提前进行从左至右的列运算就需要先进行行块 B 的运算,然后进行行块 A 中区域 1 和区域 3 范围内的行运算,最后在进行行块 A 中的区域 2 的行运算的时候进行垂直运算与水平运算的复用。

现在将这一方法应用于 CCSDS 近地通信标准的 (8176,7154) LDPC 码,它也具有两个行块,但是它拥有 16 个列块。仔细观察校验矩阵的循环子矩阵的具体初始位置,位置由错误!未找到引用源给出。该表详细给出了每个循环子矩阵的列初始位置。利用该表就唯一确定了校验矩阵。在这张表中存在一定的特点,它的行块 A1 中对应的的所有奇数列块的循环子矩阵都有 1 组 1 是以 0 为初始行位置和列位置的。从上面的分析中得出结论,由于大多数 LDPC 码的校验矩阵 H 中的 1 的分布都是近似均匀的,即使是 QC 类 LDPC 码,虽然它的所有子矩阵都具有准循环结构,但是它的列初始位置的分布也是非常均匀的,每一个行块都有 32 个数参与上述距离运算,校验矩阵中的所有循环子矩阵都是 511×511 的结构,因此通常来说能够获得的最大复用度为 $511/32 \approx 16$ 左右。但是该 LDPC 码的行块 A1 中只有 $32-16+1=17$ 个初始列位置(因为有 16 是 0),因此可能存在最大复用度的行块为 A1,而不是 A2,这一点将在下面的计算中得以证明。

假设将 CCSDS 标准中的近地通信码的上下两个行块分别定义为 A1 和 A2,分别计算行块 A1 和行块 A2 的最大复用度如下,具体的列初始位置请参考 CCSDS 标准。

对于行块 A1 而言,A1,6 和 A1,10 两个循环子矩阵的初始行位置产生了最大的复用度 $151-53=98$ 。

对于行块 A2 而言,A2,10 和 A2,14 两个循环子矩阵的初始行位置产生了最大的复用度 $364-302=62$ 。

因此得出结论,在进行 CCSDS 近地通信标准的 (8176,7154) LDPC 码的译码过程中,想要利用文中所述方法最大限度地提高复用度(提前进行列运算),需

要先进行行块 A2 的水平运算,待行块 A2 的水平运算结束的时候,进行行块 A1 的水平运算,首先进行 53 行以上的水平运算,然后进行 151 以下的水平运算,然后在进行 53 ~ 151 行的水平运算的时候,按照由上至下的顺序进行,同时开始由左至右的垂直运算。这样相当于少做 98 行的水平运算,占有所有水平运算的 $98/1022 \approx 9.6\%$ 。

另外一种运算的顺序是水平运算由下至上,垂直运算由右至左,每组 1 的取值方向是由右下至左上,由于该种运算顺序是对上文所述运算方向的一个对称映射,因此并不会产生新的排列信息,故该种情况是包括在上文所述方法之内的,文中对这种运算顺序将不再详述。

通过 ISE 中 Xinlin 公司 V5-330 芯片上的仿真可以看出该方法的资源消耗情况,如表 2 所示。时钟频率 120MHz。

表 2 实现资源数据

资源类别	数目	占总资源百分比
Slice Flip Flops	27816	13%
Slice LUT	31462	15%
Block RAM/FIFO	128	44%

5 结束语

文中主要介绍了一种能够提高水平运算和垂直运算之间复用度的译码实现方案,而且该方案不受校验矩阵中循环子矩阵中 1 的组数的限制,对不同类型的 QC-LDPC 码都能进行应用。然后文中以典型的 CCSDS 近地通信标准的 LDPC 码为例,说明了该方案的具体实现过程,经分析,对该 LDPC 码,该方案的实现过程比传统实现方案节约 10% 的 CNU 运算时间,并且没有增加任何存储器的开销。

参考文献:

[1] Gallager R G. Low density parity check codes[J]. IRE Transactions on Information Theory,1962,8(1):21-28.

[2] Kou Y,Lin S,Fossorier M P C. Low density parity check codes based on finite geometries;a rediscovery and new results[J]. IEEE Trans. on Inf. Theory,2001,47(7):2711-2736.

[3] Zhang T. Efficient VLSI architectures for error-correction coding[D]. USA:University of Minnesota,2002.

[4] Yazdani M,Banihashemi A H. On construction of rate-compatible low-density parity-check codes[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Paris: IEEE,2004:430-434.

[5] Hu X,Fossorier M,Eleftheriou E. On the computation of the minimum distance of low-density parity-check codes[C]//IEEE International Conference on Communications. Paris:

4.2 结果分析

由表 4 与表 5 可以看出,文中所建立的评估模型的评估误差仅在一个级别(0.1)范围内,随着对作战效能级别的细分还可进一步提高武器作战效能评估结果的数值精度,因此能够满足军事行动辅助决策的需要,从而验证了文中所提出的武器装备作战效能自学习评估模型的可行性。对表 4 与表 5 比较可知,针对 5 组测试样本,在利用由 20 个样本建立的评估模型进行作战效能评估时,有 3 组可以得到正确的评估结果,而通过样本的增加使得评估模型进行学习修正后,有 4 组可以得到正确的评估结果,因此可知学习后的评估模型较原评估模型具有更高的可信度,达到了模型自学习的目的。

与基于层次分析法等的评估模型恒定不变的方法相比,文中所建立的评估模型可通过不断地进行自学习从而提高其本身的评估可信度,具有一定的优势。另外,文中建立的评估模型无需对专家经验的依赖,提高了评估结果的客观性。

5 结束语

文中针对武器装备受海洋环境影响下作战效能评估的问题,提出了基于 BP 神经网络的自学习评估模型。该模型将作战效能进行分级,通过样本库中的样本对 BP 网络进行训练从而获得气象水文要素与武器装备作战效能级别之间的非线性映射,进而达到效能评估的目的。随着样本的增加,该模型可对作战效能级别作进一步细分用以提高评估结果的数值精度,然后通过基于新增样本对模型中 BP 网络的自学习训练达到模型自学习修正的目的。实验结果表明学习后的评估模型较之前的评估模型具有更高的评估可信度,从而验证文中所提出的自学习评估模型的可行性。该评估模型可通过自学习使其本身不断得到修正,在应用中具有一定的优势。另外,文中所提出的评估模型无需依赖专家的经验,具有较高的客观性。

参考文献:

[1] McLaughlin J W, Henderson S. Applying GLOBE measurements and resources to the study of marine environments [C]//Proc. of MTS. [s. l.]:IEEE,2005;2621-2624.

[2] 方书甲. 海洋环境要素纳入战场辅助决策的技术探讨[J]. 舰船科学技术,2008,30(3):22-25.

[3] 庞云峰,张 韧,黄志松,等. 大气-海洋环境对舰载雷达探测效能的影响评估[J]. 指挥控制与仿真,2009,31(2):65-69.

[4] 万自明,廖良才,陈英武. 武器系统效能评定模式研究[J]. 系统工程与电子技术,2000,22(3):1-3.

[5] 张维琴,严洪森,刘乔乔. 海洋环境下武器效能评估系统的知识库构建[J]. 计算机技术与发展,2012,22(3):59-63.

[6] 刘俊先,姜志平,舒 振. 对抗条件下 C4ISR 系统效能指标权重确定方法[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(10):2418-2421.

[7] Huang Yanyan. A methodology of simulation and evaluation on the operational effectiveness of weapon equipment[C]//2009 Chinese Control and Decision Conference. Guilin, China; [s. n.],2009:17-19.

[8] Yin Dejin, Wang Hongli. An evidential reason approach for operational effectiveness evaluation of weapon system under uncertain[C]//International Conference on Computer Application and System Modeling. Taiyuan, China; [s. n.],2010:22-24.

[9] 卞凤兰,黄晓明,刘 睿. 城市化进程中公路网用地的 BP 神经网络预测模型[J]. 东南大学学报:自然科学版,2010,40(5):1073-1076.

[10] Burke H B, Rosen D B, Goodman P H. Comparing artificial neural networks to other statistical methods for medical outcome prediction[C]//IEEE International Conference on Neural Networks. Orlando, American; [s. n.],1994:2213-2216.

[11] 王炳权. 基于神经网络的网络信息资源评价模型研究[D]. 广州:暨南大学,2010.

[12] 华顺刚,曾令宜,苏铁明,等. 基于线性降维技术和 BP 神经网络的热红外线人脸图像识别[J]. 大连理工大学学报,2010,50(1):62-66.

(上接第 31 页)

IEEE,2004;767-771.

[6] Brink S T. Design of serially concatenated codes based on iteratively decoding convergence[C]//2nd International Symposium on Turbo Codes and Related Topics. [s. l.]:[s. n.],2000.

[7] 李志国. BCH 码迭代译码算法及软件实现方法[J]. 计算机技术与发展,2007,17(4):171-174.

[8] 刘晓莹. 应用于无线局域网的高速维特比译码器电路[J]. 计算机技术与发展,2008,18(1):11-13.

[9] Shu Lin. Channel Codes Classical and Modern[M]. [s. l.]:Cambridge University Press,2009.

[10] 陈旭灿,刘东培. 改进的 LDPC 译码算法研究[J]. 电子科技大学学报,2010,39(2):68-75.

[11] 李千玲,陈 伟,樊 丰. 基于 DVB-T2 标准的 LDPC 码最小和译码算法的改进[J]. 电视技术,2011(5):120-126.

[12] 张天瑜. MIMO-OFDM 系统中 LDPC 码的改进型最小和译码算法研究[J]. 云南民族大学学报,2011(2):78-85.

[13] Cui Zhiqiang. Low-complexity High-speed VLSI Design of Low-density Parity-check Decoders[D]. USA:Oregon State University,2007.

[14] CCSDS 通信标准[S]. 131.1-0-2,2007.

准循环LDPC码高速译码实现方法

作者: [王健](#), [李集林](#), [战勇杰](#)
作者单位: [北京卫星信息工程研究所, 北京100083](#)
刊名: [计算机技术与发展](#)
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2013 (2)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201302009.aspx