

引用格式:刘盟,李家强,张茂龙,等.基于 DVB-S2 协议的 LDPC 码译码算法研究[J].微电子学与计算机,2019,36(3):71-76.[LIU Meng, LI Jia-qiang, ZHANG Mao-long, et al. Development of IP core automatic evaluation platform based on VIP model[J]. Microelectronics & Computer, 2019, 36(3): 71-76.]

基于 DVB-S2 协议的 LDPC 码译码算法研究

刘 盟,李家强,李 杰,赤 诚,肖立伊

(哈尔滨工业大学微电子中心,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 在通信过程中,由于信道的干扰,会使信息出错,通常会使用纠错码来提高传输数据的正确率.在纠错码中,级联码以优秀的性能被广泛应用.而 LDPC 码作为接近香农限的特别好码受到越来越多的应用,所以对 LDPC 码编解码算法的研究成为了热点.本文以 DVB-S2 协议的前向纠错系统中 LDPC 码为研究背景,对 LDPC 码译码算法最小和算法(Minimum Sum Algorithm,MSA)、偏移最小和算法(Offset Minimum Sum Algorithm,OMSA)及归一化最小和算法(Normalized Minimum Sum Algorithm,NMSA)进行了介绍.本文提出了一种最小和算法的实现方法,并且用于归一化最小和算法和偏移最小和算法的实现,之后通过对迭代次数和误码率的对比,选择出偏移量为 0.1,迭代次数为 20 次的偏移最小和算法作为最优算法来实现 LDPC 码译码器设计.

关键词: DVB-S2;LDPC;最小和算法;偏移最小和算法

中图分类号: TN47

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2019)03—0071—06

Development of IP core automatic evaluation platform based on VIP model

LIU Meng, LI Jia-qiang, LI Jie, CHI Cheng, XIAO Li-yi

(Microelectronics Center of Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In the communication process, due to the interference of the channel, the information be erroneous. Error correction code is usually used to improve the accuracy of the transmitted data. Concatenated codes as a kind of error correction codes are widely used due to their excellent performance, and LDPC codes are increasingly used as a good code that is close to the Shannon limit. Therefore, the research on LDPC codec algorithms has become a hot topic. This dissertation takes the LDPC code in forward error correction system of DVB-S2 protocol as the research background, and introduces the minimum sum algorithm, offset minimum sum algorithm and normalized minimum sum algorithm of LDPC code decoding. In this paper, a minimum sum algorithm implementation method is proposed, and it is used to the implementation of normalized minimum sum algorithm and the offset minimum sum algorithm. After comparing the number of iterations and the error rate, the offset parameter is set to 0.1 and the number of iterations is set to 20, and the algorithm is used as the optimal algorithm to implement the LDPC decoder design.

Key words: DVB-S2; LDPC; minimum sum; offset minimum sum

1 引言

由于信息经过信道之后会受到噪声影响而出现

错误,所以在现代数字通信系统中前向纠错码受到了广泛应用,而优秀的级联码相对与一种纠错码可以表现出更加优秀的性能,可以进一步降低误码率,级联码性能的理想的情况是逼近香农极限^[1].在第

二代地面数字电视广播标准(Digital Video Broadcasting Satellite-2nd Generation, DVB-S2)中也采用了级联码纠错技术. 在 DVB-S2 中应用了外码 BCH (Bose Chaudhurl Hocquenghem) 和内码低密度奇偶校验(Low Density Parity Check, LDPC) 码相级联的结构^[2-3].

在 LDPC 码译码算法中, Tanner 提出了和积算法(Sum-Product-Algorithm, SPA) 和最小和算法(Min-Sum-Algorithm, MSA) 两种信息传递算法. 在之后人们对于 LDPC 码的译码算法进行了更加深入的研究^[4]. 近些年, 国内外学者对研究 LDPC 码译码算法和设计译码器进行了广泛的关注. 比如 Dale E. Hocevar 于 2004 年提出了基于行的分层译码算法, 该算法所需的迭代次数很少, 相比并行译码算法减小了一倍^[5]. 但是应用到 DVB-S2 协议中的 LDPC 的译码算法普遍都是最小和算法, 比如国防科技大学的张波涛等人于 2009 年, 在 IEEE 上提出了一种 DVB-S2 标准的 LDPC 码译码器, 该译码器是基于最小和算法和 RMP(Row Message Passing) 的译码顺序的, 当其码率为 9/10, 时钟为 320MHz 时, 译码速率可达 998Mbit/s^[6]. 本文对 DVB-S2 协议中的 LDPC 码译码算法进行了研究, 提出了一种关于最小和算法与其改进算法: 归一化最小和算法(Normalized Minimum Sum Algorithm) 与偏移最小和算法(Offset Minimum Sum Algorithm) 的实现方式, 并对比了它们的性能. 发现当偏移最小和算法偏移量为 0.1 时算法最优.

2 最小和算法与其改进算法

LDPC 码的校验矩阵是稀疏矩阵, 因此有很多高效的译码算法. 其中最常用的译码算法是 BP 算法及其改进衍生出的算法, BP 算法最常见的有三种: 基于概率的 BP 算法、对数域 BP 算法及最小和算法. 概率域的译码算法其运算量非常大, 易造成算法具有不稳定性. 对数域 BP 算法有 $\tanh(x)$ 和 $\tanh^{-1}(x)$ 两个函数, 计算复杂度较高.

为了对下面的译码算法进行更好的说明, 在这里需要定义一些变量, 用于之后参与公式的运算.

定义 $L(U)$ 为一个随机变量 U 的对数似然比, $P_U(u=0)$ 为该变量取值为 0 的概率, $P_U(u=1)$ 为该变量取值为 1 的概率. 所以随机变量 U 的对数似然比可以表示为公式(1) 所示.

$$L(U) = \log \frac{P_U(u=0)}{P_U(u=1)} \quad (1)$$

式中, $L(x_n | y_n)$ 代表经过信道之后携带了噪声的码字中第 n 个比特的对数似然比, 也是用于在算法中初始化第 n 个变量节点的对数似然比. 它是由编码之后的二进制码字经过信道被噪声干扰之后得到的, 可以用公式(2) 表示.

$$L(x_n | y_n) = \log \frac{P(x_n = 0 | y_n)}{P(x_n = 1 | y_n)} \quad (2)$$

式中, $Z_{n \rightarrow m}$ 代表在校验节点更新过程中, 第 n 个变量节点的对数似然比传递给第 m 个校验节点. 可以用公式(3) 表示:

$$Z_{n \rightarrow m}(x_n) = \log \frac{q_{n \rightarrow m}(0)}{q_{n \rightarrow m}(1)} \quad (3)$$

式中, $L_{m \rightarrow n}(x_n)$ 代表在变量节点更新过程中, 第 m 个校验节点的对数似然比传递给第 n 个变量节点. 可以用公式(4) 表示:

$$L_{m \rightarrow n}(x_n) = \log \frac{r_{m \rightarrow n}(0)}{r_{m \rightarrow n}(1)} \quad (4)$$

根据以上的变量定义和公式推导, 对数域 BP 算法可以描述为:

第一步: 初始化变量节点. 编码之后的码字经过信道之后得到的对数似然比, 作为对变量节点的初始化数据. 相当于为 H 矩阵中每列中元素值为 1 的位置赋予初始值. 公式描述如公式(5) 所示.

$$Z_{n \rightarrow m}(x_n) = L(x_n | y_n) \quad (5)$$

第二步: 更新校验节点. 根据由变量节点传递到校验节点的信息, 对每一个校验节点 m 和每一个变量节点 n , 进行以下计算来实现对校验节点的更新, 可以用公式(6) 表示.

$$L_{m \rightarrow n}(x_n) = \prod_{n \in N(m) \setminus n} \text{sign}(Z_{n \rightarrow m}(x_n)) \cdot \min_{n \in N(m) \setminus n} (|Z_{n \rightarrow m}(x_n)|) \quad (6)$$

第三步: 更新变量节点. 根据由校验节点传递到变量节点的信息, 对每一个变量节点 n 和每一个校验节点 m , 进行以下计算来实现对校验节点更新, 可以用公式(7) 表示.

$$Z_{n \rightarrow m}(x_n) = L(x_n | y_n) + \sum_{m \in M(n) \setminus m} (L_{m \rightarrow n}(x_n)) \quad (7)$$

第四步: 硬判决. 判断每个变量节点的对数似然比对应的码字. 对于每一个 $Z_n(x_n)$ 进行判决, 如果 $Z_n(x_n) \geq 0$, 则该对数似然比对应的变量节点位置的码字为 0, 如果 $Z_n(x_n) < 0$, 则该对数似然比对应的变量节点位置的码字为 1, 这样就可以得到发送码字的一个判决值, 可用公式(8) 表示为:

$$\hat{x} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_N] \quad (8)$$

如果有公式(9)成立,则译码成功,否则继续迭代,知道迭代到最大迭代次数,如果仍然没有成功,则译码失败^[7].

$$\hat{x}^T H = 0 \quad (9)$$

归一化最小和算法和偏移最小和算法只是在最小和算法的基础上进行了修改,修改的是校验节点更新的步骤.

MSA 其实估计的幅值要大于实际值,所以可以适当的对最小和算法进行改进来逼近对数域 BP 算法的性能.而本节所讲述的算法就是以 MSA 估计的幅值乘以一个 0 到 1 之间的因子,从而更加逼近真实值.在本节讲述的算法中对于校验节点的计算如公式(10)所示,其他迭代步骤与最小和算法相同^[8-9].

$$L_{m \rightarrow n}(x_n) = \prod_{n \in N(m) \setminus n} \text{sign}(Z_{n \rightarrow m}(x_n)) \cdot \min_{n \in N(m) \setminus n} (|Z_{n \rightarrow m}(x_n)|) \cdot \alpha \quad (10)$$

可以通过仿真计算 α 取值使得该算法更加逼近对数域 BP 算法的性能.

最小和算法的另一种改进方法除了乘以因子来改进外,可以在最小值的赋值上减去一个小的正数 β ,不同的信噪比下可以通过改变这个正数的值使得性能提高.由于这个值的变化不大,所以可以取一个固定的常数^[10-11].

在偏移最小和算法中,只有校验节点更新与最小和算法不同,其他迭代步骤相同.在偏移最小和算法中对于校验节点的计算如公式(11)所示.

$$L_{m \rightarrow n}(x_n) = \left(\prod_{n \in N(m) \setminus n} \text{sign}(Z_{n \rightarrow m}(x_n)) \right) \times \max \left\{ \min_{n \in N(m) \setminus n} (|Z_{n \rightarrow m}(x_n)| - \beta, 0) \right\} \quad (11)$$

3 算法实现过程

最小和算法解码程序总体框图即 main 函数流程图如图 1 所示.可以看到译码的第一步是进行编码,利用随机函数产生信息位序列,然后按照上一小节中所提到的 DVB-S2 协议中给出的 LDPC 码的编码方法对信息序列进行编码.编码之后对码字进行添加噪声,然后将添加噪声后的似然比信息作为迭代中传输的数据进行解码,解码之后输出一些参考信息.

在主函数执行过程中调用了一些子函数,下面将会一一介绍其功能.在程序中包括有 get_P,

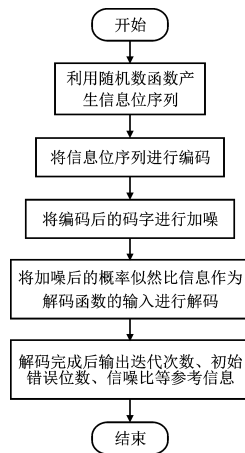


图1 最小和算法解码程序总体框图

check, ms2_decode, top_dec_include_noise, generate_codeword 和 initms2、iterms2 几个函数.

get_P 函数:该函数有两个功能.一是用来编码时产生校验位然后作为码字进行添加噪声解码等.二是在每一次迭代之后用硬判决之后的信息位进行编码与添加噪声之前的校验位对比.在 generate_codeword 和 check 调用.因为在编码中已经介绍该函数的流程图,在此不再介绍.

check 函数:每一次迭代之后用硬判决之后的信息位进行编码与添加噪声之前的校验位对比,如果相同则译码成功,如果不相同则继续迭代.可以看到该函数的传入值有 code_word[N],所以只需要将新的硬判决的值进行编码与 code_word[N]对比即可.函数比较简单所以在此不给出流程图.

initms2 函数:用来初始化迭代参数并进行第一次硬判决,将 N 个似然比信息依次初始化给 H 矩阵的 N 列,每列 1 的位置初始化相同的值,0 的位置不需要初始化.

iterms2 函数:迭代主体函数,完成译码算法主要工作.其流程图如图 2 所示.可以看到第一步是定义迭代中需要的存储器即数组来存储迭代过程中的中间变量.然后进行校验节点更新,校验节点更新的操作是找到每个校验节点所连接的变量节点传输过来的最小值、次小值、最小值的位置以及所有该校验节点相邻节点传输过来的负值个数.下一步是更新校验节点传给变量节点的值,更新规则是之前传输最小和的线更新成次小值其它更新为最小值,符号信息由本身的符号与之前计算的所有负值的符号共同决定.接下来是更新变量节点,实际上是更新传输到校验节点的值,其传输值为:所有与该变量节点连接的校验节点传输过来的值+初始似然比-该校验

节点上一步传输给该变量节点的值, 最后是进行硬判决, 所有与该变量节点连接的校验节点传输过来的值+初始似然比为该变量节点的硬判决参考值, 硬判决需要判断这个值为 0 还是为 1. 至此结束一次迭代.

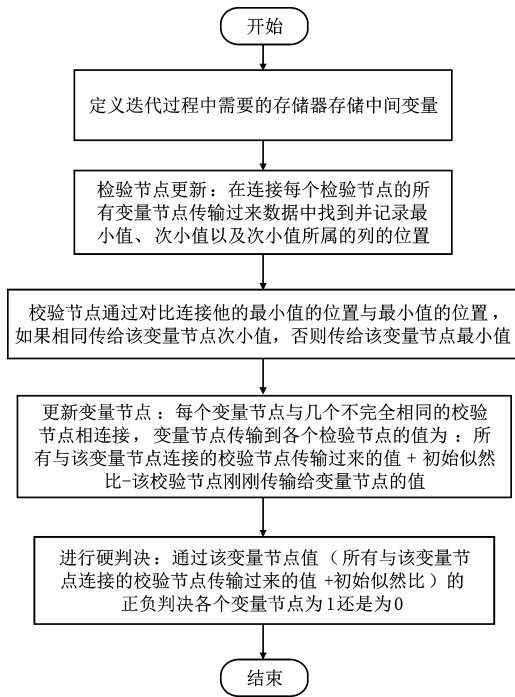


图 2 解码主体函数 itirms2 流程图

ms2_decode 函数: 顶层的解码函数, 该函数流程图如图 3 所示: 先调用 initms2 函数进行迭代初始化, 然后调用 check 函数检测译码是否成功. 然后判断是否达到最大迭代次数或者是解码成功, 如果是则结束译码, 如果否则调用 itirms2 函数继续迭代.

generate_codeword 函数用随机数产生信息位序列再通过调用 get_P 函数来获得校验位, 与之前的随机数产生的信息位一起组成码字序列.

top_dec_include_noise 函数用来添加噪声. 添加噪声的过程在信道建模已经介绍, 在此不再介绍.

归一化最小和算法与偏移最小和的实现过程是类似的, 只是在校验节点更新处有稍微不同. 因为最小和算法对于校验节点更新处的概率进行了过估计, 所以需要减小最小值来逼近标准值. 归一化最小和算法是在最小和算法中的最小值基础上, 乘以一个因子. 偏移最小和算法是在最小值基础上减去一个值. 两者都对最小和算法进行了修正, 两个因子可以通过仿真来决定取值, 从而找到更加逼近标准值

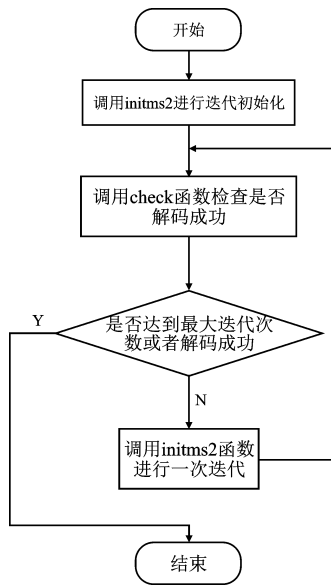


图 3 ms2_decode 顶层的解码函数流程图

的解.

4 算法实现结果

以码长为 16200, 码率为 1/4 为例, 如图 4 所示, 为解码程序运行结果图, 从图中可以看出当信噪比为 2.7dB 时的四次解码结果, 迭代次数 50 次迭代为没有解码成功的情况. 从图中可以看出, 因为码字经过信道之后错误位数及位置无法预测, 所以不能解码成功, 解码成功需要多少次迭代都是不确定的, 所以越多次数解码结果进行平均才能很好的说明问题.

```

[liumeng@Ford decoder_c_change2]$ ./dec_test
x=0.80
EBN0=2.700
generate codeword
top_dec
original error=2694
original error rate=0.166
number of iterations=19
generate codeword
top_dec
original error=2699
original error rate=0.167
number of iterations=50
generate codeword
top_dec
original error=2709
original error rate=0.167
number of iterations=20
generate codeword
top_dec
original error=2588
original error rate=0.160
number of iterations=20
  
```

图 4 解码程序运行结果图

在实现 MSA 的基础上完成了与 NMSA 的对比. 首先介绍一下这三种解码算法的区别, 在更新校验节点的步骤时, 对于最小和的处理不同. MSA 应用的是真实求出来的最小和, NMSA 应用的是求出的最小和与一个系数 x 相乘, x 的取值一般在 1 左

右, NMSA 应用的是求出的最小和减去一个参数 y , 这个参数一般在 0 到 1 之间.

如图 5 所示为不同信噪比下 MSA 与 NMSA 的迭代次数折线图, 其中 $x=1$ 的折线代表 MSA. 可以看到当 $x=0.95$ 时算法最优, 所需的迭代次数最少. 也就是说当 $x=0.95$ 时 NMSA 最优并且优于 MSA.

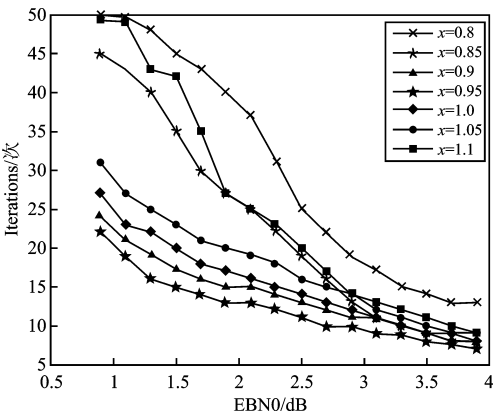


图 5 不同信噪比下最小和算法与归一化最小和算法的迭代次数折线图

如图 6 所示的是归一化系数为 $x=0.95$ 的 OMSA 与 NMSA 在不同信噪比下所需的迭代次数折线图, 对比发现当 $y=0.1$ 时是在 NMSA 是最优的, 同时又比 $x=0.95$ 时归一化最小和算法需要的迭代次数更少.

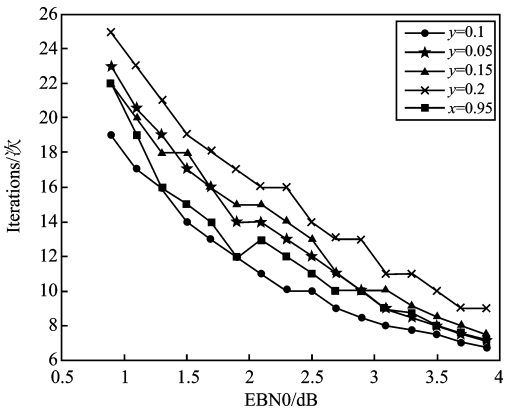


图 6 不同信噪比下偏移最小和算法与归一化最小和算法的迭代次数折线图

如图 7 所示为不同信噪比下在 20 次迭代的 MSA 与 NMSA 的误码率折线图, 其中 $x=1$ 的折线代表 MSA. 可以看到当 $x=0.95$ 时算法最优, 误码率也相比较比较好. 也就是说当 $x=0.95$ 时 NMSA 最优并且优于 MSA. 与迭代次数的比较结果一致.

如图 8 所示的是归一化系数为 $x=0.95$ 的在

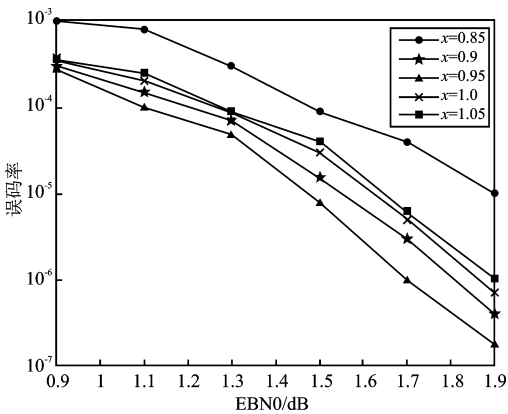


图 7 不同信噪比下最小和算法与归一化最小和算法的迭代次数折线图

20 次迭代的 NMSA 与 OMSA 在不同信噪比下误码率折线图, 对比发现当 $y=0.1$ 时是在 OMSA 里面是最优的, 同时又比 $x=0.95$ 时 NMSA 的误码率稍低一些, 综合考量, 所以在之后的硬件实现时, 选用 OMSA 实现, 选取的偏移量为 $y=0.1$, 迭代次数为 20 次.

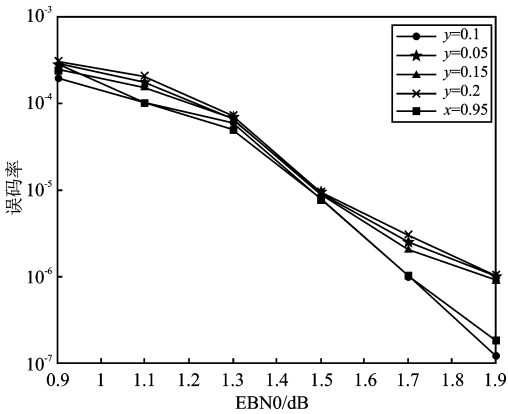


图 8 不同信噪比下偏移最小和算法与归一化最小和算法的迭代次数折线图

5 结束语

本文是基于 DVB-S2 协议中 LDPC 码的译码器实现上, 提出了一种最小和算法的实现方法, 基于该方法实现了归一化最小和算法与偏移最小和算法. 并对三种算法的实现结果进行了对比, 发现在迭代次数为 20 次的基础上当偏移化最小和偏移系数为 0.1 时算法最优, 优于最小和算法与归一化最小和算法.

参考文献:

[1] 张鹏飞. 编码信道香农限的分析和计算[D]. 成都: 电

- 子科技大学,2006.
- [2] 靳文鹤. 基于卷积 LDPC 码的编码协作研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [3] 竺一婷. 基于 LDPC 码和喷泉码级联的研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2017.
- [4] 鲍丹. 数字通信系统中高性能前向纠错码(FEC)译码算法及其 VLSI 实现研究[D]. 上海:复旦大学,2011.
- [5] HOCEVAR D E. A reduced complexity decoder architecture via layered decoding of LDPC [C]// IEEE Workshop on SIPS 2004. [S. l.]: IEEE Press, 2004: 107-112.
- [6] ZHANG B T, LIU H Z, CHEN X C, et al. Low complexity DVB-S2 LDPC decoder [C]// Vehicular Technology Conference, 2009. Vtc Spring 2009. Barcelona, Spain. IEEE, 2009:1-5.
- [7] 童胜,王鹏,王单,等. LDPC 码量化和积译码的高效实现[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版). 2004, 31(5):709-711.
- [8] 陈志,白晋超. 适用于 IEEE802. 16e 标准的 LDPC 分层修正最小和译码算法[J]. 信息通信,2018,31(2): 11-12.
- [9] 范芳,冯雪林. 基于变量节点更新改进的最小和算法[J]. 无线电工程,2018,48(2):121-125.
- [10] SONG J J. Non-Binary LDPC APP-based decoding for BDS navigation data[C]//第九届中国卫星导航学术年会论文集-S09 用户终端技术. 北京,中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心,2018.
- [11] LI H. A low-complexity min-sum decoding algorithm for LDPC codes[C]//Proceedings of 2017 17th IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT 2017). Sichuan ,IEEE Beijing Section, Sichuan Institute of Electronics,2017.

作者简介:

刘 盟 女,(1994-),硕士研究生. 研究方向为集成电路设计与验证.

李家强 男,(1988-),博士研究生. 研究方向为 ECC 编码研究.

李 杰 男,(1990-),博士研究生. 研究方向为集成电路可靠性设计.

赤 诚 男,(1993-),硕士研究生. 研究方向为 IP 核设计与验证.

肖立伊(通信作者) 女,(1961-),博士,教授,博士生导师. 研究方向为 IP 核设计与标准化及集成电路抗辐射可靠性设计. E-mail: xiaoly@hit. edu. cn.