

韩光延, 刘杰, 蔡仁浩. 基于游程的改进编码测试数据压缩方案[J]. 智能计算机与应用, 2026, 16(1): 129-132. DOI: 10.20169/j. issn. 2095-2163. 24032103

基于游程的改进编码测试数据压缩方案

韩光延, 刘杰, 蔡仁浩

(湖州师范学院 信息工程学院, 浙江 湖州 313000)

摘要: SOC 复杂性的增加导致测试数据量剧增, 且测试难度也随即加大, 因而降低测试数据量就成为亟待解决的问题。为此提出一种编码压缩方法, 针对一个 SOC 测试集统计其游程长度, 通过游程切分方法将游程长度值转换成更小的数值来表示, 减少测试数据集中表示游程长度所需要的二进制位数。该方法采用特殊的变长到变长的编码方案进行压缩, 其目的就是缩小游程长度值的变化范围达到减少编码位数的效果。ISCAS89 基准电路实验结果表明该方法的压缩效果与 Golomb 码、改进型相对游程长度编码方法等编码压缩方案相比有一定的优势。

关键词: 测试数据压缩; 游程长度; 切分方法; 编码压缩

中图分类号: TN407 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-2163(2026)01-0129-04

Improved coding test data compression scheme based on run length

HAN Guangyan, LIU Jie, CAI Renhao

(School of Information Engineering, Huzhou University, Huzhou 313000, Zhejiang, China)

Abstract: The increase of SOC complexity leads to a sharp increase in the amount of test data, which increases the test difficulty. Therefore, reducing the amount of test data becomes an urgent problem to be solved. In view of this, the paper proposes a coding compression method, which counts the run-length of a SOC test set, and converts the run-length value into a smaller number by the run-length segmentation method, so as to reduce the number of binary bits needed to represent the run-length in the test data set. This method uses a special variable-length coding scheme for compression, which is to reduce the number of coding bits by narrowing the range of the run-length value. The experimental results of ISCAS89 benchmark circuits show that the compression effect of the proposed method is better than that of Golomb code and the improved relative run length coding method.

Key words: test data compression; run length; segmentation method; coding compression

0 引言

SOC (System-On-a-Chip) 称为系统级芯片, 也可称为片上系统。随着集成电路技术的飞速发展, 现代 SOC 集成了各种复杂的功能模块, 功能模块数量的增加则导致了更多的测试数据需求。当测试数据量增加后, 自动测试设备 (Automated Test Equipment, ATE) 就需要面对存储需求和数据传输带宽需求同时增加等问题, 因此测试成本也大大提升。

为了解决这些问题, 可以采用测试数据压缩技术。基于编码的测试数据压缩方法是测试数据压缩中最主要的方法之一, 而基于游程的编码方法又是

基于编码的测试数据压缩的有效途径之一。基于游程的编码方法包括 Golomb 码^[1]、FDR 码^[2]、EFDR 码^[3]、IFDR 码^[4]、ERFDR 码^[5]、AMT-RLC^[6]、ARHRLC^[7]、改进型 EFDR 码^[8] 等。其中, Golomb 编码对于长游程的压缩非常有效, 对于短游程的编码压缩效果则很不理想, 而 FDR 与 Golomb 方法类似。IFDR 编码则可以同时对 0 游程、1 游程进行编码, ERFDR 又在 IFDR 编码的基础上进行改进, 不仅能够同时对 0、1 游程进行编码, 而且当相邻游程相等时后一个游程可以用更短的码字替换, 进一步压缩原测试集。其他的编码压缩方案是在游程编码的基础上加以改进^[9-13], 例如对原测试数据集进行数据预处理^[14-17] 后再对处理后的数据进行编码压缩。

作者简介: 韩光延 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 测试数据压缩。Email: 1753667089@qq.com; 刘杰 (1970—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 计算机组成, IC 设计与测试, EDA 和智能控制; 蔡仁浩 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 充电桩。

收稿日期: 2024-03-21

哈尔滨工业大学主办 ◆ 系统开发与应用

Golomb 码编码方案都是直接对游程长度进行编码,其优点在于解压结构简单,但是压缩效率不高。本文提出一种基于游程切分的改进编码压缩方案,通过切分方法将游程长度切分成若干个不大于已知设定的数值,根据特定的编码方案对其进行编码,从而达到减少需要编码的游程长度值的效果。

1 基于游程长度拆分的编码方法

1.1 游程长度拆分方法

集成电路测试数据集主要包含一系列的测试向量,测试向量是用于对电路进行功能验证和测试的输入序列。测试向量主要由 0、1、无关位 X 组成,而测试数据中的无关位 X 占比较高。为了后续方便处理,本方案在数据预处理阶段对测试向量中的无关位 X 进行 0 填充,统计其 0 游程长度。

游程长度越长、对应的编码字就越长,因此将长游程进行拆分缩减达到压缩测试数据的效果。游程拆分方法可以分为 2 种:

(1) 游程切分方法^[18]。当游程长度值较大则对应的编码位数就越多,通过游程切分方法可以将长游程切分成若干个短游程。

(2) 游程长度值取余方法。游程长度值是整数型,通过整数除法运算法则将长游程长度值除以固定值得到一个商和一个余数,通过该方法即可将长游程分解成远小于原游程长度值的商值和余数值。例如当游程长度为 65,设固定值为 9,得商值和余数值分别为 7 和 2,只需对 7 和 2 编码即可。

本方案采取的游程拆分方法对 0 游程的处理规则是:当游程长度小于 9,则不需要切分直接编码;当游程长度正好等于 9 时,为了与游程长度大于 9 的情况区分开,通过游程切分方法将游程长度 9 切分成 9 和 0;当 0 游程长度大于 9 时,通过游程切分方法将游程长度切分成若干个不大于 9 的数。

对测试数据集中的游程进行切分的算法过程具体如下。

```
int rlc_0[ ]; //用作存储切分前的游程长度值
int rlc_0_cut[ ]; //用作存储切分后的游程长度值
int rlc_k;
for (int i = 0; i < L; i++) //L 为切分前测试集中所有游程长度的个数 {
    if (rlc_0[i] > 9) //游程大于 9 的情况
    {
```

```
        c1 = rlc_0[i] / 9;
        c2 = rlc_0[i] % 9;
        for (int l = 0; l < c1; l++) {
            rlc_0_cut[rlc_k] = 9;
            rlc_k++;
        }
        rlc_0_cut[rlc_k] = c2;
        rlc_k++;
    }
    else if (rlc_0[i] == 9) //游程等于 9 的情况 {
        rlc_0_cut[rlc_k] = 9;
        rlc_k++;
        rlc_0_cut[rlc_k] = 0;
        rlc_k++;
    }
    else //游程小于 9 时直接存储原游程长度 {
```

假设一段测试数据 T_D 如图 1(a) 所示, T_D 对应的 0 游程长度为 16、3、1、9、4、12、7、8、13,根据切分方法得到的数据序列为 9、7、3、1、9、0、4、9、3、7、8、9、4(见图 1(d))。后续解压缩时读取第 1 位数为 9,这时就需要读取下一个数来判断该游程长度属于大于 9、还是等于 9 的情况,读取第 2 位数为 7 时可知原游程长度属于大于 9 的情况,因此将 2 个数相加可得原游程长度为 16;第 3 位数为 3,属于小于 9 的情况,此时原游程长度为 3;第 5 位为 9,但第 6 位为 0,与大于 9 的情况不同,此时原游程长度等于 9。

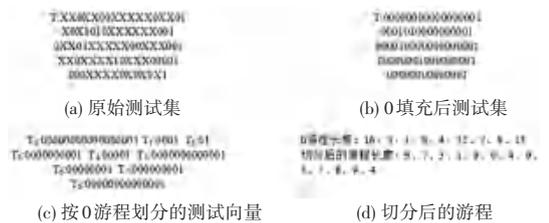


图 1 游程切分方案

Fig. 1 Run-splitting scheme

1.2 编码方案与编码实例

由 1.1 节提出方案对游程进行处理后,研究中又提出了一种特殊的编码方案对处理过的游程进行编码。通过图 2 的树状图对该编码方案进行说明,定义该树状图向左子树遍历编码为 0,向右子树遍历编码为 1。由图 2 树状图的路径可以看出编码表(见表 1)中每个码值对应的编码字不会出现路径重复的情况,即后续解码时就可分辨出编码字对应的码值。

本方案在对游程进行切分后,其值的范围在 0

和 9 之间,不会出现大于 9 的情况。因此根据本方案对游程处理之后提出的编码方法详见表 1。编码表中码值为 9 时对应的编码字位数是最少的,因此当测试数据集中长游程占比较大时,游程切分后的码值为 9 的个数越多,编码压缩后的位数越少。

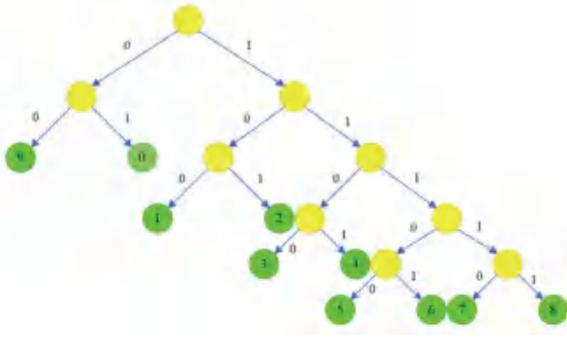


图 2 编码的树状图

Fig. 2 A dendrogram of the encoding

表 1 编码表

Table 1 Coding schedule

| 分组 | 码值 | 编码字 |
|----------------|----|-------|
| A ₁ | 9 | 00 |
| | 0 | 01 |
| A ₂ | 1 | 100 |
| | 2 | 101 |
| A ₃ | 3 | 1100 |
| | 4 | 1101 |
| A ₄ | 5 | 11100 |
| | 6 | 11101 |
| | 7 | 11110 |
| | 8 | 11111 |

举例说明本文所提方案的编码压缩过程,下文以测试集 T 举例说明,具体如图 1 所示。对原始测试数据进行无关位的填充,因为本论文采用的是 0 填充,所以填充后的测试数据见图 1(b)。原始测试集 T 按 0 游程划分统计其游程长度,见图 1(c)。测试集 T 对应的 0 游程长度分别为 16、3、1、9、4、12、7、8、13,切分后的游程长度为 9、7、3、1、9、0、4、9、3、7、8、9、4。根据本方案提出编码方案对切分后的游程长度编码为 00 11110 1100 100 00 01 1101 00 1100 11110 11111 00 1101 共 44 位,原始测试数据位数为 82 位,减少了 38 位。

2 解码器设计

解压结构由一个有限状态机(FSM)、一个缓存器、一个编码表组成,该电路组成模块少且成本较低。结构设计如图 3 所示。图 3 中, en 为使能信号, bit_in 为位输入, clk 为时钟信号。解压电路的

解压步骤:有限状态机发出使能信号(en)为高电平,通过 bit_in 将数据传入有限状态机中,FSM 控制数据依次存入缓存器,数据每次存入缓存器中都与编码表中的数据加以比对,直到缓存器中的数据与编码表中的数据对应,则输出编码表中的对应的码值。

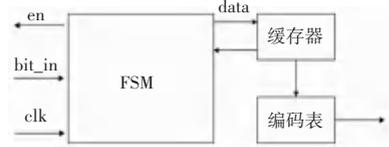


图 3 解压结构

Fig. 3 Decompression structure

3 实验结果与讨论

为了证明本压缩方案是否有效,本文选择 ISCAS89 标准电路中的 6 个电路进行实验。本文方案的压缩算法程序由 C 语言实现,表 2 为本方案对 ISCAS89 标准电路压缩后的位数和压缩结果。

表 2 本方案压缩率

Table 2 The compression ratio of this scheme

| 电路名称 | 原始测试集/位 | 压缩后数据位数/位 | 压缩率/% |
|--------|---------|-----------|-------|
| S5378 | 23 754 | 13 528 | 43.1 |
| S9234 | 39 273 | 21 658 | 44.9 |
| S13207 | 165 200 | 50 175 | 69.6 |
| S15850 | 76 986 | 31 032 | 59.7 |
| S38417 | 164 736 | 100 017 | 39.3 |
| S38584 | 199 104 | 87 447 | 56.1 |
| 平均压缩率 | | | 52.1 |

为了进一步证实本方案的压缩效果,将本方案与国内外其他几种编码压缩方案进行对比,比较结果见表 3。表 3 中第 1 列的内容是 ISCAS89 标准电路中的 6 个电路名称,第 2~4 列则是 Golomb 码、改进型相对游程长度编码方法、应用二分算法压缩测试数据的方案的压缩效率,最后一列则是本方案的压缩效率。根据表 3 可知,除 FDR 码以外,本方案只有 S13207 与 S38417 这 2 个电路略低, S5378、S9234、S15850、S38584 这 4 个电路的压缩率均高于其他的压缩方案的压缩率。与 FDR 码相比,本方案的 S9234、S15850、S38584 电路压缩率相对较高。由表 3 可以看出,本方案的平均压缩效率为 52.1%,要优于直接对游程编码压缩,同时比 Golomb 码提高了 2.2%,比文献[19]方案平均压缩效率提高了

6.8%,比文献[20]方案平均压缩效率提高了10.1%。

表3 本方案与其他编码压缩方法的比较

Table 3 Comparison between the proposed scheme and other coding compression methods

| 电路名称 | Golomb | FDR | 文献[19] | 文献[20] | 本方案 |
|--------|--------|------|--------|--------|------|
| S5378 | 40.7 | 48.1 | 18.9 | 21.6 | 43.1 |
| S9234 | 43.3 | 44.8 | 24.4 | 36.3 | 44.9 |
| S13207 | 74.4 | 78.6 | 77.8 | 56.4 | 69.6 |
| S15850 | 41.8 | 52.8 | 55.0 | 47.5 | 59.7 |
| S38417 | 44.1 | 54.5 | 47.7 | 44.3 | 39.3 |
| S38584 | 54.9 | 52.8 | 47.9 | 45.6 | 56.1 |
| 平均 | 49.9 | 55.2 | 45.3 | 42.0 | 52.1 |

4 结束语

为了降低测试时间和提高测试效率,减少测试数据量,本文提出一种基于编码的测试数据压缩方法。其主要特点:通过对游程进行切分,将长游程用若干个短游程代替;该编码方案提出了特殊的编码表,对切分点用最少位数编码,最后对处理过的游程根据本方案提出的编码方案进行编码压缩。分析可知,本方案对长游程的压缩效果非常有效。实验结果表明,本文方案相较于其他压缩方案获得了不错的性能提升。

参考文献

- [1] CHANDRA A, CHAKRABARTY K. System-on-a-chip test-data compression and decompression architectures based on Golomb codes[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2001, 20(3): 355-368.
- [2] CHANDRA A, CHAKRABARTY K. Test data compression and test resource partitioning for system-on-a-chip using Frequency-Directed Run-length (FDR) codes[J]. IEEE Transactions on Computers, 2003, 52(8): 1076-1088.
- [3] EL-MALEHA H. Test data compression for system-on-a-chip

- using extended frequency-directed run-length code[J]. IET Computers and Digital Techniques, 2008, 2(3): 155-163.
- [4] 欧阳一鸣,郭文鹏,梁华国. 改进型FDR码对SoC测试数据的压缩及解压缩[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(1): 174-177.
- [5] 尤志强,罗奇钧. 一种基于IFDR改进的测试激励数据压缩方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(2): 130-134.
- [6] SUSHMA K N, THILAGAVATHI M, PARIMALARANGAN S. Adoption pattern of mechanization of Paddy farms in West Godavari district of Andhra Pradesh, India[J]. Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology, 2022, 40(10): 653-658.
- [7] RADHIKA K, GEETH D M. Retraction note: Augmented recurrence hopping based run-length coding for test data compression applications[J]. Wireless Personal Communications, 2022, 128: 747.
- [8] 邝继顺,周颖波,蔡烁,等. 一种用于测试数据压缩的改进型EFDR编码方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(10): 1464-1471.
- [9] 吴海峰,詹文法,程一飞. 独立于测试数据的字典编码方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(4): 638-644.
- [10] 程一飞,詹文法. 长度折半的测试资源编码方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(3): 480-486.
- [11] 吴琼,黄丽. 基于逻辑运算的折半划分测试数据压缩方法[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(6): 1324-1328.
- [12] 程一飞,詹文法. 一种基于相邻位异或运算的测试数据压缩方法[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(11): 2756-2761.
- [13] 吴海峰,詹文法,程一飞. 快速查找最佳有理渐近分数的测试数据压缩方法[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(6): 2384-2389.
- [14] 陈田,易鑫,王伟,等. 一种低功耗双重测试数据压缩方案[J]. 电子学报, 2017, 45(6): 1382-1388.
- [15] 张明和,夏泽,邝继顺. 基于测试集主成分的变换-拆分法提高编码压缩率[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 94-100.
- [16] 陈田,周洋,任福继,等. 基于三态信号的改进游程编码压缩方法[J]. 计算机工程, 2021, 47(2): 219-225.
- [17] 詹文法,陶鹏程. 最小游程切换点标记编码压缩方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(10): 837-844.
- [18] 詹文法,梁华国,程一飞,等. 利用整数存储无理数的测试数据编码压缩方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(9): 1605-1612.
- [19] 吴琼,周啸宇. 进型相对游程长度编码方法[J]. 安庆师范大学学报(自然科学版), 2019, 25(2): 48-51.
- [20] 张振林,詹文法. 用二分算法压缩测试数据的方案[J]. 安庆师范大学学报(自然科学版), 2019, 25(4): 35-39.