

基于三值光计算机的并行无进位加法

王先超^{1,2} 姚云飞¹ 金 翊²

(阜阳师范学院数学与计算科学学院 阜阳 236041)¹ (上海大学计算机工程与科学学院 上海 200072)²

摘 要 在三值光计算机(其核心是一块体积为 $38.0 \times 65.5 \times 2.2 \text{ mm}^3$ 、功耗为 0.3mw 的单色液晶显示器及其两侧的偏振片)上以全并行方式实现了两向量无进位光学加法。为利用光的并行性,在 MSD(Modified Signed-Digit)数字系统上通过定义 4 个变换,分 3 步实现了全并行无进位加法。加法所需时间与操作数的位数无关。通过实验证明了三值光计算机并行无进位加法运算的可行性和正确性。该系统能以全并行的方式完成两个 680 位的 MSD 数加法运算。

关键词 三值光计算机, MSD, 并行, 无进位

中图分类号 TP338.6, TP338.7 **文献标识码** A

Carry-free Addition in Parallel Based on Ternary Optical Computer

WANG Xian-chao^{1,2} YAO Yun-fei¹ JIN Yi²

(School of Mathematics and Computational Science, Fuyang Normal College, Fuyang 236041, China)¹

(School of Computer Engineering and Science, Shanghai University, Shanghai 200072, China)²

Abstract This study implemented carry-free addition of two vectors in parallel on the ternary optical computer. Its key part is made up of a piece of monochromatic LCD, whose volume is $38.0 \times 65.5 \times 2.2 \text{ mm}^3$ and power is 0.3mw, and a layer of polaroid on either side. The parallel and carry-free addition was realized in three steps by defining four transformations on Modified Signed-Digit (MSD) number system. And the required time of the addition is independent of the digits of operands. An experiment certified the feasibility and correctness of the parallel and carry-free addition on the ternary optical computer. The system can finish the addition of two numbers with 680 bits in MSD code in three steps and in fully parallel.

Keywords Ternary optical computer, Modified signed-digit, In parallel, Carry-free

金翊教授于 2003 年提出了三值光计算机原理和结构^[1-3],开创了三值光计算机的研究,于 2004 年进行了三值光计算机一位与九位的编码器和解码器的实验研究^[4,5]。2006—2007 年,黄伟刚和包九龙等人利用单片机和点阵式液晶,进行了百位量级编码器的实验研究^[6-8]。左开中等人利用摄像头进行了百位量级解码器的实验^[9],还进行了三值光计算机中的数值表示及其基本算法的研究,主要研究了两种数字系统:原三进制数和对称三进制数^[10]。由于光的互不干扰性使得光计算机具有空间巨并行性,这意味着光学计算机将有很高的数据宽度^[6,7,11],理论上可以达到 10^6 量级,这样在进行加法运算时就会产生串行进位延迟问题。为此金翊教授于 2005 年提出了进位直达并行加法器原理^[12],随后蔡超等人基于对称三进制数对三值光计算机半加器和加法器进行了研究^[13-15],但由于其结构较复杂而没有做具体的实验验证工作。2007 年,严军勇等人提出了降值设计理论^[16],使得三值光计算机的逻辑运算器可以动态重构。在降值设计理论的指导下,300 位量级三值逻辑光学运算器模型已研制成功^[7]。本文将在以前研究成果的基础上,采用 MSD(modified signed-digit)数对数据进行编码,利用三值光计算机来实现并

行无进位加法。

1 MSD 数的加法

1.1 MSD 数字系统

MSD 数早在 1961 年就由 A. Avizienis 等人首次提出^[17],1986 年 B. LDraker 等人在研究光子计算时首次将其引入到光计算中^[18]。MSD 数字系统是一种带符号位三值二进制数。对任意实数 A,其 MSD 表达形式为

$$A = \sum_i a_i 2^i \quad (1)$$

其中, i 为整数, $a_i \in \{\bar{1}, 0, 1\}$, 其中 $\bar{1}$ 即为 -1 。任意一个数(除 0 外)的 MSD 数都可以具有多种表达形式。例如

$$(4)_{10} = (100)_{2 \text{ or MSD}} = (1 \bar{1} 00)_{\text{MSD}} = (1 \bar{1} \bar{1} 00)_{\text{MSD}}$$

$$(-4)_{10} = (\bar{1} 100)_{\text{MSD}} = (\bar{1} 1 100)_{\text{MSD}}$$

从上例可以看出该数字系统具有如下特点:

- ①将 MSD 数的每一位都按 $\bar{1} \rightarrow 1, 1 \rightarrow \bar{1}, 0 \rightarrow 0$ 进行取反,即得其相反数;
- ②最高位为正数是正数,反之是负数,所以用 MSD 数字系统表示负数时不需要符号位;
- ③具有冗余性;

到稿日期:2009-03-17 返修日期:2009-05-25 本文受国家自然科学基金(No. 60473008),上海市重点学科建设(No. J50103)资助。

王先超(1973—),男,博士生,讲师,主要研究方向为三值光计算机等,E-mail:wxcdx@126.com;姚云飞(1957—),男,教授,主要研究方向为分析学等;金 翊(1957—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为三值光计算机及计算机体系结构等。

④正数和负数用同一表示形式,无需反码和补码。

其冗余性使得在进行加减运算时可以不进行进位或借位,即没有进位或借位传播。

1.2 MSD 数加法

为了使光学系统能够以全并行的方式完成 MSD 加法运算,定义了表 1 中的 4 种变换,其中 T 和 W 变换、T' 和 W' 变换在本质上都是 MSD 数的一对进位和本位,只是其表达形式不同而已。其中 T 和 W 变换使二进制数的表示具有冗余性,从而避免了进位传播,如 $0+1=1=1\bar{1}, \bar{1}+0=\bar{1}=\bar{1}1$ 。

表 1 MSD 数加法用到的变换

T	$\bar{1}$	0	1	W	$\bar{1}$	0	1	T'	$\bar{1}$	0	1	W'	$\bar{1}$	0	1
$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{1}$	0	$\bar{1}$	0	1	0	$\bar{1}$	$\bar{1}$	0	0	$\bar{1}$	0	$\bar{1}$	0
0	$\bar{1}$	0	1	0	1	0	$\bar{1}$	0	0	0	0	0	$\bar{1}$	0	1
1	0	1	1	1	0	$\bar{1}$	0	1	0	0	1	1	0	1	0

在进行 MSD 数加法时具体步骤如下。

第 1 步 对位。如果两个 MSD 数的位数不同,则在位数较小的最高位前补 0 以使其位数相等。

第 2 步 同时进行 T 和 W 变换。第 i 位的 T 变换结果作为进位应写在第 $i+1$ 位,第 0 位补 0,即 $t_i = T(x_{i-1}, y_{i-1})$, $w_i = W(x_i, y_i)$ 。

第 3 步 对第 2 步的结果同时进行 T' 和 W' 变换,第 i 位的 T' 变换结果作为进位应写在第 $i+1$ 位,第 0 位补 0,即 $t'_i = T'(t_{i-1}, w_{i-1})$, $w'_i = W'(t_i, w_i)$ 。

第 4 步 对第 3 步的结果进行 T 变换,即可得到其两个 MSD 数的和。与第 2 步中的 T 变换不同的是第 i 位的 T 变换结果不是作为进位写在第 $i+1$ 位,而是写在第 i 位,即此处的 $t_i = T(t'_i, w'_i)$ 。

下面通过一个例子来说明两个 MSD 数的加法, $(14)_D + (112)_D = (1\bar{1}0\bar{1}10)_{MSD} + (100\bar{1}0000)_{MSD}$ 。其过程如表 2 所列,其中的 ϕ 表示填充的 0。

表 2 两个 MSD 数加法过程

第 1 步	被加数(x_i)	ϕ	ϕ	1	$\bar{1}$	0	$\bar{1}$	1	0
	加数(y_i)	1	0	0	$\bar{1}$	0	0	0	0
第 2 步	T 变换(t_i)	1	0	1	$\bar{1}$	0	$\bar{1}$	1	ϕ
	W 变换(w_i)	ϕ	$\bar{1}$	0	$\bar{1}$	0	0	1	$\bar{1}$
第 3 步	T' 变换(t'_i)	0	0	0	$\bar{1}$	0	0	1	ϕ
	W' 变换(w'_i)	ϕ	1	$\bar{1}$	1	0	0	$\bar{1}$	0
第 4 步	T 变换(t_i)	0	1	$\bar{1}$	0	0	0	0	$\bar{1}$

将表 2 中最后一行对应的 MSD 数利用式(1)将其转换成十进制数即为 126。从表 2 中可以看出,两个 n 位的 MSD 数相加的结果是一个 $n+2$ 位 MSD 数。因为二进制也是 MSD 数,所以在第 1 步中的两个操作数可以直接使用其二进制编码,即编码中只含有 0 和 1,这样就不需要数据的预处理,从而可以提高系统的整体效率。而且使用这 4 个变换完成加法运算时,无论被加数和加数的位数如何(在该系统中只要不超过 680 位),都只需 3 步(表 2 中第 1 步即为输入操作数可以去掉,主要是第 2—4 步)。

2 两个向量相加的三值光计算机实现

2.1 光学加法运算的实现

三值光计算机体系结构,如图 1 所示。其中,

S 为面光源;

E 为三态光编码器,用来调制数千条光线的状态,使其成

为携带三值数据信息的光信号;

O 为光学运算器,它完成三态光状态间转换,即完成计算;

D 为三态光解码器,它读出每一条信号光线携带的信息,并将其转换成电子信号。

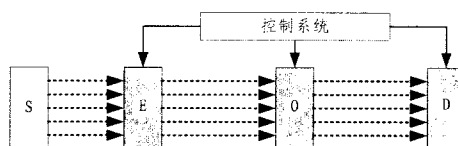


图 1 三值光计算机体系结构

该系统的核心是千位量级可重构光学运算器 O。三值光计算机的光学处理部件物理结构如图 2 所示。

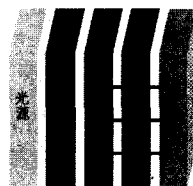


图 2 光学部件的物理结构

图 2 中最左边为光源,其能耗 240mw;4 个薄片为偏振片;偏振片之间是规格(mm)均为 $38.0 \times 65.5 \times 2.2$ 、能耗为 0.3mw、有 128×64 个像素的单色液晶显示器;最右边为感光阵列。左边的两片垂直偏振片和两片液晶在一块构成了三值光计算机编码器,其用于生成三态光(无光态、垂直偏振光和水平偏振光)。右边的两层偏振片及其中间的液晶构成千位量级可重构光学运算器 O,具有三明治式结构。根据降维设计理论,将光学运算器分成大小相等 4 个区域,即 VV 区、VH 区、HH 区和 HV 区,每个区有 32×64 个像素。VV 区两侧均为垂直偏振片;VH 区左侧为垂直偏振片,右侧为水平偏振片;HH 区两侧均为水平偏振片;HV 区左侧为水平偏振片,右侧为垂直偏振片。所以在 VV 区和 HV 区只能输出垂直偏振光和无光,VH 区和 HH 区只能输出水平偏振光和无光。感光阵列供解码器使用,解码器只要根据所在的区域判断光线有无即可精确解码,而不需要判断光线的强弱,从而提高系统的精度和速度。可以看出三值光计算机主要是利用液晶的旋光性和偏振片的滤光性来实现光信号间的转换即计算。

根据降维设计理论,19683 个二元三值逻辑运算中任何一个均可以由分布在不同区域上的 50 种基元(每个基元在硬件结构上即为一个液晶像素及其两侧的偏振片,其在本质上就是上述的运算器)中的 1 个、2 个、3 个、4 个、5 个或最多 6 个来实现。例如,要完成上述加法的 4 个变换所需的各分区基元数及编码如表 3 所列。

表 3 加法所需的 4 个变换的有关信息

所需基元数量				编码		
VV	VH	HH	HV	$\bar{1}$	0	1
T	3	0	3	水平偏振光	无光	垂直偏振光
W	0	2	0	水平偏振光	无光	垂直偏振光
T'	1	0	1	水平偏振光	无光	垂直偏振光
W'	2	0	2	水平偏振光	无光	垂直偏振光

注:由于其所用基元数的对称性,表 3 中的编码不唯一,还可以有其他编码方案,如各行中的水平偏振光和垂直偏振光可以互换。但有一个原则:真值表中出现次数最多的那个元素的编码为无光。

对于任何变换的每一位而言,其所用基元中最多只能有一个是亮的。对于这4种变换,如果VV区和HV区有亮点,则说明该位输出的是垂直偏振光,再根据表3中的编码可知其表示为1;如果VH区和HH区有亮点,则说明该位输出的是水平偏振光,再根据表中的编码可知其表示为-1;如果没有亮点即无光,则表示为0。

2.2 实验与分析

为了便于实验观察,采用像素冗余的方法,这里将相邻近的 $4 \times 4 = 16$ 个像素作为一个基元。这样每个分区都具有 $16 \times 8 = 128$ 个基元阵列。下面给出一个实验来验证上述光学加法的可行性和正确性。同时,为了说明加法的并行性,以两个向量相加为例。

$$\begin{pmatrix} -3 \\ 6 \end{pmatrix}_D + \begin{pmatrix} -2 \\ -3 \end{pmatrix}_D = \begin{pmatrix} 1111 \\ 1010 \end{pmatrix}_{MSD} + \begin{pmatrix} 0010 \\ 1111 \end{pmatrix}_{MSD}$$

其具体步骤如下。

第1步 对输入数据-111-1,10-10和00-10,-111-1,同时进行T和W变换,其结果如图3所示。为便于观察,在每个分区用实线方框标出了第一位所使用的基元,每个方框代表一个基元。同时使用虚线框标出了每个分区中的发光基元(后面各图采用同样方法标出)。根据表3中T和W变换的编码使用解码器得到其运算结果分别为-110-1,010-1和1-101,0-101。由表2可知,要对该结果稍作修改,即在每组T变换的最后分别补上一个0和W变换的最前面分别补上一个0,得-110-10,010-10和01-101,00-101,才能作为下一步的输入。

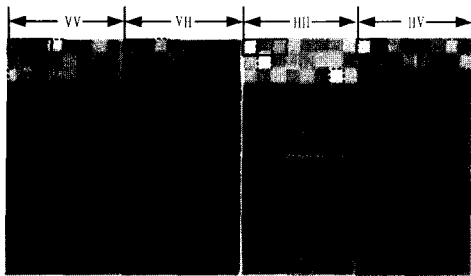


图3 T变换和W变换后的输出结果

第2步 对第1步的运算结果同时进行T'变换和W'变换,其结果如图4所示。由于一位T'变换只使用VV区和HH区的各一个基元,同时把T'变换所需的运算基元安排在靠前部分,因此这两个分区的前10位表示T'变换的运算结果,其他表示W'变换的结果。可得T'变换和W'变换运算结果解码后分别为01000,00000和-10-1-11,01-1-11。同理T'变换结果要做和T变换一样的修改,由于补0后每组的最高位都为0,可以去掉,即10000,00000和-10-1-11,01-1-11,作为下一步的输入。

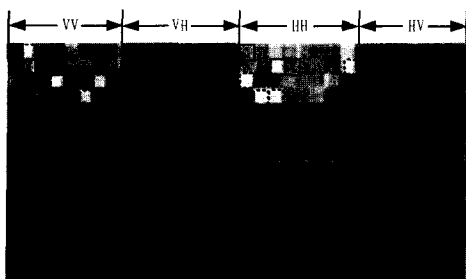


图4 T'变换和W'变换后的输出结果

第3步 对第2步运算结果进行T变换,得到两向量对

应元素之和,其结果如图5所示。解码为00-1-11和01-1-11,即十进制的-5和3。

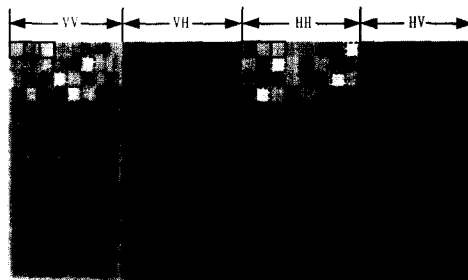


图5 最终结果

至此采用表1中的4种变换、分3步并以全并行方式完成了两向量中对应元素之和,从而证明了使用三值光计算机以并行方式完成无进位加法的可行性和正确性。

从图3-图5可以看出,使用一位运算时使用基元数最多的是第2步和第3步,所以如果不使用像素冗余,最多可以并行处理 $\lfloor \frac{2048}{3} \rfloor = 682$ 位数据。又因为两个n位的MSD数相加的结果是一个n+2位MSD数,所以只需3个时钟周期就可以完成两个680位的MSD数加法。

结束语 本文通过给MSD数字系统定义4个变换,在三值光计算机上以全并行的方式,分3步实现了两向量的光学加法。该加法具有如下特点:

- 无论是哪一步均是以全并行方式工作;
- 所用的步数与位数无关;
- 采用了MSD数字系统使得在完成加法运算时不会产生进位传播;
- 该光学向量加法可以很容易扩展到上千乃至数万位;
- 该系统把光强与光的偏振性结合起来表达信息,从而提高了运算速度和精度;
- 能够在一个平面内显示所有的数据。

但因为实验条件的限制,没有考虑其运算速度。同时,本研究只是探讨在三值光计算机上实现并行无进位加法的可行性,没有考虑资源的利用率等问题。

参考文献

- [1] Jin Yi, He Huacan, Lü Yangtian. Ternary Optical Computer Principle[J]. Science in China(Series F), 2003, 46(2): 145-150
- [2] Jin Yi, He Hua-can, Lü Yang-tian. Ternary Optical Computer Architecture[J]. Physica Scripta, 2005, T118: 98-101
- [3] 金翊,何华灿,艾丽蓉,等. 三值光计算机的基本原理和实验[J]. 计算机技术与发展, 2005, 15(1): 1-3
- [4] 孙浩,金翊,严军勇. 三值光计算机编码器与解码器原理的实验研究[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(16): 82-83
- [5] 严军勇,金翊,孙浩. 三值光计算机多位编码器与解码器的可行性实验研究[J]. 计算机工程, 2004, 30(14): 175-177
- [6] 黄伟刚,金翊,艾丽蓉,等. 三值光计算机百位编码器的设计与构造[J]. 计算机工程与科学, 2006, 28(4): 139-142
- [7] 包九龙,金翊,蔡超. 三值光计算机百位量级编码器的实现[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(2): 19-22
- [8] 李军,金翊,尹逊玮. C51单片机在三值光计算机编码器中的应用[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(9): 180-182
- [9] 左开中,金翊,等. 三值光计算机解码模拟器的图像采集系统[J]. 半导体光电, 2008, 29(6): 949-952
- [10] 左开中,金翊,严军勇. 三值光计算机的数值表示及其基本算法[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(9): 8-10

- [11] 金翊. 三值光计算机高数据宽度的管理策略[J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2007, 13(5): 519-523
- [12] Jin Yi, He Hua-can, Ai Li-rong. Lane of parallel through carry in ternary optical adder[J]. Science in China (Series F), 2005, 48(1): 107-116
- [13] 蔡超, 金翊, 包九龙. 三值光计算机的对称三进制半加器原理设计[J]. 计算机工程, 2007, 33(17): 278-279
- [14] 蔡超, 金翊. 对称三进制光学加法器的进位直达通道设计[J]. 微电子学与计算机工程, 2007, 24(6): 150-152
- [15] 尹逊玮, 金翊, 李军. 三值光计算机半加器结构的简化[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(14): 3773-3775
- [16] Yan Junyong, Jin Yi, Zuo Kaizhong. Decrease-radix design principle for carrying/borrowing free multi-valued and application in ternary optical computer[J]. Science in China (Series F), 2008, 51(10): 1415-1426
- [17] Avizienis A. Signed-digit number representations for fast parallel arithmetic[J]. IRE Trans. Electron. Comp., 1961, EC-10: 389-400
- [18] Draker B L, Bocker R P, Lasher M E, et al. Photonic Computing Using the Modified Signed-Digit Number Representation[J]. Optical Engineering, 1986, 25: 038-043

第 27 届中国数据库学术会议(NDBC 2010)征文通知

第 27 届全国数据库学术会议(NDBC 2010)将于 2010 年 10 月 14 日至 17 日在北京举行。本次会议由中国计算机学会数据库专业委员会主办,中国人民大学、北京大学、清华大学承办,中科院计算所、中科院软件所、北京航空航天大学、北京邮电大学、北京理工大学、北京师范大学、北京科技大学、北京交通大学等单位协办。

本届会议将主要关注数据库技术所面临的新的挑战和研究方向,着力反映我国数据库技术研究的最新进展。为突出我国在系统研发方面的成就,本届会议将首次设立系统演示主题(Demonstration Program)。此外会议将继续开设“研究生论文指导计划”研讨班,以及“云数据管理”专题等。届时还将邀请国内外数据库领域著名专家到会作专题报告。

我们诚征数据管理及其应用领域的论文、专题讨论与系统演示报告等。

1. 征文范围(不限于这些领域):

数据库实现新技术	云计算环境中的数据管理	Web 数据管理
查询处理与查询优化	数据流管理	XML 和半结构化数据
数据仓库和 OLAP	近似和非确定性数据库	内容与知识管理
数据挖掘和知识发现	元数据管理	数据集成和迁移
嵌入式数据库与移动数据库	并行和分布式数据库系统	特定领域的数据库系统
数据库自管理	智能用户接口技术	空间和时态数据库系统
多媒体数据库技术	数据隐私与安全	信息检索与数据库

2. 投稿要求

- 1) 论文应是未发表的研究成果,应包括中英文题目、中英文摘要、关键词、正文和参考文献。由于论文采用匿名评审,故论文中不能包含任何作者相关信息(如姓名、单位、电子邮件、通信地址、资助项目等)。
- 2) 论文中英文均可,用 Word 排版,论文篇幅一般不超过 A4 幅面 8 页。其格式需参考《计算机学报》的投稿要求,可见《计算机学报》网站:<http://cjic.ict.ac.cn/>。
- 3) 会议论文均采用网上提交方式,不支持电子邮件提交论文的方式。
- 4) 投稿网址:<http://www.easychair.org/conferences/?conf=ndbc2010>

3. 系统演示

本次大会第一次设立系统演示部分,欢迎踊跃投稿,详见系统演示征文通知。

4. 论文出版

会议录用论文将分 A 辑和 B 辑出版,其中 A 辑论文拟安排在《计算机学报(正刊)》、《计算机科学与探索(正刊)》出版;B 辑论文拟安排在《计算机研究与发展(增刊)》出版。会议将评选“萨师煊优秀研究生论文”和最佳系统演示报告。

5. 重要日期

论文提交截止时间:2010 年 5 月 1 日

论文录用通知时间:2010 年 6 月 10 日

排版稿件截止时间:2010 年 6 月 25 日

提交出版社时间:2010 年 7 月 1 日

6. 联系方式

会议网站 <http://ndbc2010.ruc.edu.cn> 电话:010-62512334 传真:010-62512334

邮件:ndbc10@gmail.com