

三值汉明码检错纠错原理和方法

沈云付 潘磊

(上海大学计算机工程与科学学院 上海 200444)

(上海大学高性能计算中心 上海 200444)

摘 要 随着光通信技术的应用和千位三值光学计算机系统研究的推进,确保数据信息免受各种干扰以及系统的可靠运行显得十分重要.该文给出了三值汉明码的一种分组形式,提出了三值汉明码的检错原理和出错位置的确定方法.基于给出的三值汉明码的两个纠错码表,提出了三值汉明码的纠错原理,画出了基于三值光学计算机的三值汉明码检错纠错概念结构图.该工作为三值光学信息的检错纠错奠定了理论基础.

关键词 三值光学计算机;三值汉明码;检错纠错码;纠错码表

中图法分类号 TP302 **DOI号** 10.11897/SP.J.1016.2015.01648

Principle and Method of the Error Detection and Correction of Ternary Hamming Codes

SHEN Yun-Fu PAN Lei

(School of Computer Engineering and Science, Shanghai University, Shanghai 200444)

(High Performance Computing Center, Shanghai University, Shanghai 200444)

Abstract With the application of optical communication technology and the promotion of the thousand-bit ternary optical computer system, it is very important to ensure the system running reliably and the data exempting from all interference. In this paper, a grouping form of ternary Hamming code is presented and a principle of error detection and a method of determining error positions in ternary Hamming code are proposed. Based on the two error-correcting tables presented, the principle of error correction of ternary Hamming code is put forward. Then the conceptual structure graph of error detection and error correction of ternary Hamming code based on the ternary optical computer is drawn. The work in this paper lays a theoretic foundation for the error detection and correction of ternary Hamming code in ternary optical information.

Keywords ternary optical computer; ternary Hamming code; error detection and correction code; error-correction tables

1 引 言

现代社会中信息的处理和存储主要是由电子计算机来完成的.随着电子计算机集成度的提高、集成

电路处理速度的加快和性能的优化,以及社会经济对高性能计算需求的与日俱增,人们对低功耗、高性能的计算机的追求热情不减,对各种新型计算机的研究不断深入.研究人员在光学领域的研究已有很长的历史,获得了许多研究成果,研制出了许多可用

的器件. 与电子计算机相比, 光学计算机的制作门槛较低, 在数据处理宽度、无进位加法器设计等多个方面有一定优势, 因此全球基于光学的计算机研究形成了多个分支和流派^[1-5], 其中光学计算机是引人注目的一种未来计算工具.

随着各种光器件如光开关、光逻辑门、空间光调制器、光放大器、波分复用器和光交换器等研制成功, 光纤通信已在远程通信和城域网中成为主角, 全光网将成为新一代通信网络. 在光学计算机领域, 光技术已经在液晶显示器、光存储、数据传输等方面特别是在运算器设计中得到应用. 中国科学院杨林等人^[6]早于国际同行开展硅基集成光学矩阵处理器的研究, 提出了硅基集成光学矩阵处理器的结构并实现了器件的原理验证, 其计算速度达 8000 万次乘加运算/秒, 研制出了调制速率为 40 Gbit/s 的低功耗硅基马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder) 光调制器^[7]. Thomson 等人^[8]也给出了相应的硅基光调制器, 近来文献^[9]提出了消光率为 3.1 db、调制速率为 50 Gbit/s 的硅基 Mach-Zehnder 光调制器. 高速光调制器的进展大大提高了光纤的信道传输速率, 但信号传输时也受到色度色散、非线性效应等光学特性的限制, 需要探测、隔离和纠正传输过程中产生的任何错误. 林榕慧^[10]对在时钟同步条件下三值光信号的异步传输和同步传输方式进行讨论, 对三值光纤通信原理及电路设计进行了研究, 但未涉及传输中的错误. 王岩等人^[11]提出了光通信系统可靠性设计的硬件和软件方法, 设计和实现了一种新的高可靠性代码存储方法, 通过将代码存放在铁电随机存储器 FRAM (Ferroelectric Random Access Memory) 中, 用串行外围接口 SPI (Serial Peripheral Interface) 引导加载的方法有效提高了代码存储加载的安全性.

金翊、何华灿等人利用光的偏振态, 调制产生三值码元进行信息传输 (即利用两个相互垂直的偏振光态和无光态实现光的三值编码), 对提高光纤的通信容量提供了一个新的途径. 自 2000 年起, 金翊^[12-13]领导的研究团队开创了以计算机原理和光特性为出发点、光电混合、逐代提高的三值光学计算机研究分支, 目前正在构建面向应用研究的千位三值光学计算机系统. 这个系统既可以作为一个独立的计算机来使用, 也可以将它直接纳入高性能计算机系统, 成为其中的一个应用节点, 其控制系统实现对电子部件和光学部件的控制, 光学部件的编码器以千位并行方式接收数据, 光学运算器以千位并行和三值运算的形式高效地处理数据, 运算结果由解码

器采集, 并以千位并行方式输出到存储阵列^[14]. 随着千位三值光学计算机系统研究的推进, 系统的复杂程度在不断增加, 设计过程中错误和缺陷在所难免, 这些缺陷不仅影响系统的可靠运行而且影响运行效率和安全, 甚至导致系统失败. 因此, 三值光学计算机的可靠性和稳定性成为倍受关注的新课题. 在这种情况下作者开展了对三值汉明码检错和纠错技术的研究.

2 三值汉明码构成形式

纠错码是指在信息传输过程中发生错误后能在接收端自行发现或纠正的码, 检错码是指能在接收端发现错误的码. 为使一种码具有检错或纠错能力, 须对原信息码字增加校验码元. 1950 年汉明 (Hamming R) 提出了可以纠正一个独立错误的线性分组码-汉明码, 后经扩展后可以检测出两位错误、纠正一位错误. 汉明码由于编码和译码容易实现, 抗干扰能力较强, 至今仍是应用最广泛的一类码^[15-16].

1960 年 Avizienis^[17]提出了 MSD (Modified Signed Digit) 冗余表示计数法, 通过冗余表示法使加法没有进位过程, 1986 年 Drake 等人^[18]将 MSD 加法运算引入到光学计算领域, 这极大地加快了光学加法器的设计进程^[19-22]. 任意一个整数或小数都可用下面的 MSD 数表示

$$A = \sum_i x_i 2^i,$$

其中 x_i 的取值为 $\bar{1}, 0$ 或 1 , 符号 $\bar{1}$ 表示 -1 .

无光态、垂直偏振光态、水平偏振光态这 3 种物理状态可以以任何方式与 $\bar{1}, 0, 1$ 这三值信息建立一一对应关系. 在我们研究的三值光学系统中, 发生的错误主要是指液晶板上某些像素位的输出未必是希望得到的结果, 如某位应输出 $0, 1, \bar{1}$ 之一, 但输出恰为其它两个值之一. 因此, 对于三值系统而言, 存在 6 种可能的静态故障, 即“ $0 \rightarrow 1$ ”, “ $0 \rightarrow \bar{1}$ ”, “ $1 \rightarrow 0$ ”, “ $1 \rightarrow \bar{1}$ ”, “ $\bar{1} \rightarrow 0$ ”与“ $\bar{1} \rightarrow 1$ ”. 本文只考虑这些故障.

考虑各个位置由 MSD 数符 $\{0, 1, \bar{1}\}$ 构成的 n 位三值信息码 $M = a_n a_{n-1} \cdots a_6 a_5 a_4 a_3 a_2 a_1$. 三值汉明码由信息码位和校验码位两部分构成. 假设信息码位数为 n , 校验码位数为 k , 那么校验码位数 k 可选取满足下列不等式的最小整数

$$2^k \geq k + n + 1.$$

将第 i 个校验位 (或称校正子) b_i 放置在 2^i 码位上, 并将信息码位从低到高依次插入, 所得的 $n+k$

位三值码称为三值 $(n+k, n)$ 汉明码(或简称三值汉明码). 三值汉明码的构成如表 1 所示.

表 1 三值 $(n+k, n)$ 汉明码构成形式

码位	$n+k$	\dots	2^i	\dots	9	8	7	6	5	4	3	2	1
信息码	a_n	\dots	\dots	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1					
校验码		\dots	b_i		b_4			b_3		b_2	b_1		
三值汉明码	a_n	\dots	b_i	\dots	a_5	b_4	a_4	a_3	a_2	b_3	a_1	b_2	b_1

校验过程是通过分组来实现的,具体过程如下:

(1) 首先根据校验位的个数 k 确定 k 组: S_1, S_2, \dots, S_k .

(2) 其次将表 1 中汉明码各码元的码位用二进制表示,然后根据各码元所在码位二进制中 1 的出现与否由低位向高位进行分组;如 b_1 所在的码位为 1,二进制表示为 $(0001)_2$,因此 b_1 被分在 S_1 组,仅参与 S_1 组的校验; a_4 所在的码位为 7,二进制表示为 $(0111)_2$,因此 a_4 分别被分在 S_1 组、 S_2 组和 S_3 组中,参与 S_1, S_2, S_3 组的校验,不编入除此之外的其余组,也不参与其余组的校验;其余码元的分组类似,具体如表 2 所示.

表 2 信息位与校验位分组表

码位	$n+k$	\dots	2^i	\dots	9	8	7	6	5	4	3	2	1
分组	三值汉明码												
	a_n	\dots	\dots	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1					
S_1	y	\dots	\dots	a_5	a_4	a_2	a_1	b_1					
S_2	y	\dots	\dots		a_4	a_3	a_1	b_2					
S_3	y	\dots	\dots		a_4	a_3	a_2	b_3					
S_4	y	\dots	\dots	a_5	b_4								
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots									
S_i	y	\dots	b_i										
\dots	\dots	\dots	\dots										

表 2 中, y 表示 a_n 或空. 对于每一个分组 S_i 而言,校验位 b_i 是未知的并且只有 1 个,而分在该组的所有信息位是已知的,用每组中已知的所有信息位按照某个合适的运算“ \oplus ”计算该组中未知的校验位 b_i . 如 b_1 所在的分组为 S_1 ,将 S_1 组中除 b_1 外其余所有信息位按照某个合适的运算“ \oplus ”计算 b_1 (对于 S_1 组,码元所在码位的二进制表示的最低位必须为 1,如 a_2, a_4 等).

上述分组模式与二进制汉明码的分组模式相同.

以下以 8 位三值信息码 $M = a_8 a_7 a_6 a_5 a_4 a_3 a_2 a_1$ 为例进行说明. 取 $k=4$,即取 4 个校验位,对应的三值汉明码形式为 $H = a_8 a_7 a_6 a_5 b_4 a_4 a_3 a_2 b_3 a_1 b_2 b_1$,如表 3 所示.

校验过程是通过分组实现的,分组过程与表 2 一致. 分组方式如表 4 所示.

表 3 三值 $(12, 8)$ 汉明码

码类	码位												
	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
信息码	a_8	a_7	a_6	a_5		a_4	a_3	a_2		a_1			
校验码					b_4				b_3		b_2	b_1	
三值汉明码	a_8	a_7	a_6	a_5	b_4	a_4	a_3	a_2	b_3	a_1	b_2	b_1	

表 4 $(12, 8)$ 汉明码分组方式

行	分组	码位											
		12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	S_1		a_7		a_5		a_4		a_2		a_1		b_1
2	S_2		a_7	a_6			a_4	a_3			a_1	b_2	
3	S_3	a_8					a_4	a_3	a_2	b_3			
4	S_4	a_8	a_7	a_6	a_5	b_4							

表 4 中校验位值是由每组中已知全部信息位通过下列公式计算而得

$$b_1 = a_1 \oplus a_2 \oplus a_4 \oplus a_5 \oplus a_7$$

$$b_2 = a_1 \oplus a_3 \oplus a_4 \oplus a_6 \oplus a_7$$

$$b_3 = a_2 \oplus a_3 \oplus a_4 \oplus a_8$$

$$b_4 = a_5 \oplus a_6 \oplus a_7 \oplus a_8$$

为方便起见, \oplus 称为三值汉明码校验位生成运算,满足交换律和结合律. 经验证,对 MSD 表示形式而言,可用于三值汉明码校验位的生成运算只有 3 个,即:(1) $x \oplus y = x + y$; (2) $x \oplus y = x + y + 1$; (3) $x \oplus y = x + y - 1$. 本文取 \oplus 为模 3 绝对值最小剩余系 $\{0, 1, \bar{1}\}$ 上的加法运算,即 $x \oplus y = x + y$,运算规则如表 5 所示.

假定汉明码 H 经传输后变为 $H' = a'_8 a'_7 a'_6 a'_5 b'_4 a'_4 a'_3 a'_2 b'_3 a'_1 b'_2 b'_1$. 对 H' 按如下分组方式计算各组对应的值,即计算 S'_1, S'_2, S'_3, S'_4 ,并称它们为监督位,相应的等式称为监督关系式:

$$S'_1 = (a'_1 \oplus a'_2 \oplus a'_4 \oplus a'_5 \oplus a'_7) \otimes b'_1$$

$$S'_2 = (a'_1 \oplus a'_3 \oplus a'_4 \oplus a'_6 \oplus a'_7) \otimes b'_2$$

$$S'_3 = (a'_2 \oplus a'_3 \oplus a'_4 \oplus a'_8) \otimes b'_3$$

$$S'_4 = (a'_5 \oplus a'_6 \oplus a'_7 \oplus a'_8) \otimes b'_4$$

其中,运算 \otimes 称为监督位生成运算. 这里令 \otimes 满足如表 6 所示的运算规则,前面的符号 S_1, S_2, S_3, S_4 仅用于分组,未计算它们的值.

表 5 \oplus 的运算规则

\oplus	0	1	$\bar{1}$
0	0	1	$\bar{1}$
1	1	$\bar{1}$	0
$\bar{1}$	$\bar{1}$	0	1

表 6 \otimes 的运算规则

\otimes	0	1	$\bar{1}$
0	0	$\bar{1}$	1
1	1	0	$\bar{1}$
$\bar{1}$	$\bar{1}$	1	0

易见, \otimes 是模 3 绝对值最小剩余系 $\{0, 1, \bar{1}\}$ 上的减法运算,满足如下关系:对任何三值数 $x, y, x \otimes y = x - y$.

3 三值汉明码的检错原理及错误位置确定

在校验位 b_1, b_2, \dots, b_k 计算完成后, 得到三值汉明码 H , 同时经传输后变为新三值汉明码 H' . 以下假定传输过程中仅发生一位数据错误.

对 H' 按分组方式计算 S'_1, S'_2, \dots, S'_k 的值. 有如下的结论.

定理 1. 如果 S'_1, S'_2, \dots, S'_k 不全为 0, 那么汉明码 H' 中的第 $(|S'_k| \cdots |S'_2| |S'_1|)_2$ 位发生错误. 这里, $|x|$ 是通常意义下 x 的绝对值, $(y)_2$ 表示 y 的二进制表示.

证明. 为书写清楚起见, 以下以三值(12, 8)汉明码为例进行证明, 对一般的三值 $(n+k, n)$ 汉明码, 其证明方法是相同的.

设经传输后的三值汉明码为 $H' = a'_8 a'_7 a'_6 a'_5 b'_4 a'_4 a'_3 a'_2 b'_1 b'_1$. 记

$$\begin{cases} c_1 = a'_1 \oplus a'_2 \oplus a'_4 \oplus a'_5 \oplus a'_7 \\ c_2 = a'_1 \oplus a'_3 \oplus a'_4 \oplus a'_6 \oplus a'_7 \\ c_3 = a'_2 \oplus a'_3 \oplus a'_4 \oplus a'_8 \\ c_4 = a'_5 \oplus a'_6 \oplus a'_7 \oplus a'_8 \end{cases}, \begin{cases} S'_1 = c_1 \otimes b'_1 \\ S'_2 = c_2 \otimes b'_2 \\ S'_3 = c_3 \otimes b'_3 \\ S'_4 = c_4 \otimes b'_4 \end{cases}.$$

为叙述方便起见, 这里称 c_1, c_2, \dots, c_k 为验证位.

情况 1. 信息位中有一位错误.

此种情况下, 校验位数据完全正确, 即 $b_i = b'_i, i = 1, 2, 3, 4$. 又假定 a_i 有跳变, 即 $a_i \rightarrow a'_i, a_i \neq a'_i$; 而对其他的位, $a_i = a'_i$. 设 a_i 码位的二进制表示为 $(t_4 t_3 t_2 t_1)_2$. 根据汉明码分组规则, a_i 至少分在 2 组中, 于是 t_4, t_3, t_2, t_1 中至少有 2 个取值为 1.

对不含有 a_i 的任何分组号 j , 易见 $b_j = c_j$, 且 $S'_j = c_j \otimes b'_j = b_j \otimes b'_j = b_j - b'_j = 0$.

含有 a_i 的每个分组(如含组号 i) 必使二进制 $(t_4 t_3 t_2 t_1)_2$ 中的 $t_i = 1$. 如 0101 表示第 1 组、第 3 组中含有 a_i , 其 $t_1 = 1, t_3 = 1$. 现设第 i 组含有 a_i , 那么可写 $b_i = a_i \oplus x, c_i = a'_i \oplus x$, 其中 x 是信息码中除了 a_i 外的位经 \oplus 运算而得的结果. 因 $b_i = b'_i$, 所以有 $S'_i = c_i \otimes b'_i = c_i \otimes b_i$. 根据运算 \oplus 和 \otimes 的规定, $u \oplus v = u + v, u \otimes v = u - v$, 下文总假定在模 3 绝对值最小剩余系意义下进行运算. 因此

$$\begin{aligned} S'_i &= c_i \otimes b_i = c_i - b_i = (a'_i \oplus x) - (a_i \oplus x) = \\ &= (a'_i + x) - (a_i + x) = a'_i - a_i \neq 0. \end{aligned}$$

这表明 $(t_4 t_3 t_2 t_1)_2$ 中使 $t_i = 1$ 的组 i 在汉明码

分组方式表中对应的 S'_i 都取同一个不为 0 的值 $a'_i - a_i$. 由此可以判定第 $(|S'_4| |S'_3| |S'_2| |S'_1|)_2$ 位数据 a_i 有误.

情况 2. 校验位有一位错误, 但信息位中无错误.

由于 a_1, a_2, \dots, a_n 不变, 因此经传输后, $c_i = b_i$.

假如某 b_i 有跳变, 即 $b_i \rightarrow b'_i, b_i \neq b'_i$, 而其它校验位 b_j 不变, 即 $b'_j = b_j$. 很显然 $S'_i = c_i \otimes b'_i = c_i - b'_i = b_i - b'_i \neq 0$, 而其余的 $S'_i = c_i \otimes b'_i = c_i - b'_i = b_i - b'_i = 0$. 这表明, 新三值汉明码 H' 中的第 $(|S'_4| |S'_3| |S'_2| |S'_1|)_2$ 位(即数据 b_i) 发生错误.

综上所述, 定理得证.

证毕.

4 三值汉明码的纠错方法和纠错码表

根据上述分析, 一旦发现 S'_1, S'_2, \dots 不全为 0, 那么汉明码数据传输发生一位错误. 更进一步地, S'_1, S'_2, \dots 只有两种可能, 即 0 或非 0 值.

情况 1. 如果校验位 b_i 有跳变 $b_i \rightarrow b'_i$, 那么 S'_1, S'_2, \dots 中仅有一个为非 0 值, 即 $S'_i = c_i \otimes b'_i = c_i - b'_i = b_i - b'_i \neq 0$.

根据三值二元 \otimes 运算表 6 中取值 1 和 $\bar{1}$ 这两种情况: (1) $0 \otimes \bar{1} = 1 \otimes 0 = \bar{1} \otimes 1 = 1$; (2) $0 \otimes 1 = 1 \otimes \bar{1} = \bar{1} \otimes 0 = \bar{1}$, 构造两个纠错码表 7 和表 8.

表 7 纠错码表 A

当前值	正确值
0	1
1	$\bar{1}$
$\bar{1}$	0

表 8 纠错码表 B

当前值	正确值
0	$\bar{1}$
1	0
$\bar{1}$	1

如果经计算后 $S'_i = 1$, 那么用纠错码表 A 进行校验; 否则, 当 $S'_i = \bar{1}$ 时用纠错码表 B 进行校验.

情况 2. 如果信息位 a_i 有跳变 $a_i \rightarrow a'_i$, 此时 a'_i 为当前值, a_i 为原值(正确值), 那么 S'_1, S'_2, \dots 中至少有 2 个不等于 0 的值, 且均取值 $a'_i \otimes a_i = a'_i - a_i$. 如果该值为 1, 那么用纠错码表 B 纠错, 否则用纠错码表 A 进行纠错.

例 1. 设三值信息码为 $M = 1\bar{1}101\bar{1}01$, 相应的 12 位汉明码为 $H = 1\bar{1}1011\bar{1}01111$. 假设 $H' = 1\bar{1}101\bar{1}\bar{1}01111$. 经计算得 $c_4 = 1, c_3 = \bar{1}, c_2 = \bar{1}, c_1 = \bar{1}$. 由 $S'_i = c_i \otimes b'_i$ 得 $S'_4 = 0, S'_3 = 1, S'_2 = 1, S'_1 = 1$. 故在 $(|S'_4| |S'_3| |S'_2| |S'_1|)_2 = (0111)_2$ 位, 即第 7 位上发生错误. 因 S'_i 中不为 0 的值为 1, 所以用纠错码表 B 进行纠错, 将当前值 $\bar{1}$ 改为 1, 错误得到修正.

5 三值汉明码纠错的实现概念结构图

以下以 8 位信息位为例给出三值汉明码的纠错过程. 三值汉明码检错纠错概念结构图如图 1 所示, 包括光源、编码器、校验位生成器、汉明码接收器、验证位生成器、监督位生成器与纠错部件等.

其基本工作流程是: 光源发出的自然光进入编码器; 编码器在通过 8 位数据输入线送来的编码信号控制下, 把自然光调制成表示用户输入运算数据的三态光信号 $a_8 a_7 a_6 a_5 a_4 a_3 a_2 a_1$; 这些三态光信号经校验位生成运算部件的处理(计算)后输出相应的校验码位结果光信号 $b_4 b_3 b_2 b_1$, 得到 12 位汉明码 $a_8 a_7 a_6 a_5 b_4 a_4 a_3 a_2 b_3 a_1 b_2 b_1$; 然后将这 12 位汉明码通过光传输网络传送到(远程)汉明码接收器; 经过汉明码的验证位生成器生成验证位 $c_4 c_3 c_2 c_1$, 再经监督码

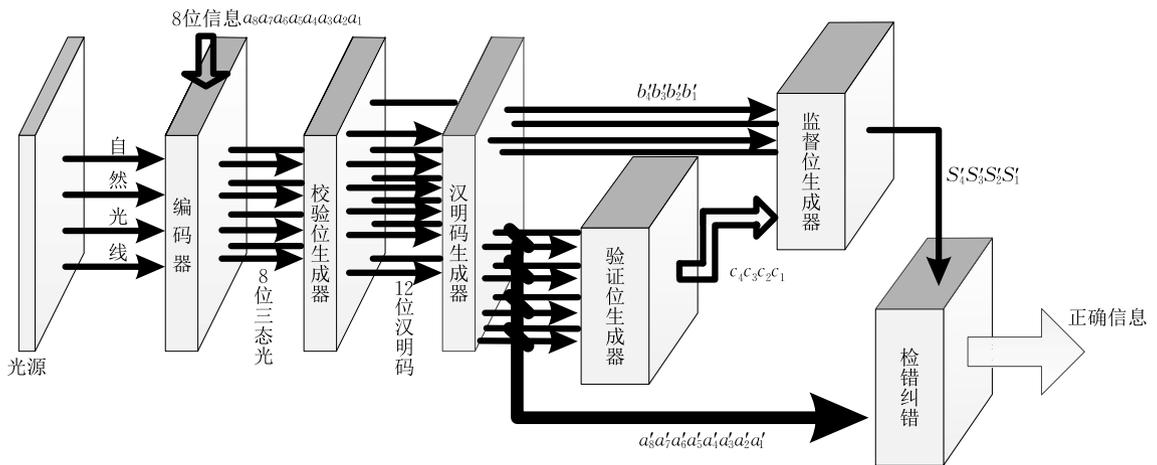


图 1 三值(12,8)汉明码检错纠错概念结构

对一般的 $(n+k, k)$ 三值汉明码, 每个校验位 b_i 至多是 n 个一位数的和, 因此通过 MSD 加法器在二叉迭代加法模式下用 $3 \log n$ 个时钟周期可以并行地计算所有 k 个校验位 b_1, b_2, \dots, b_k ; 对验证位计算同法处理. 而每个监督位计算可通过其真值表至多需要 6 个基元构建模 3 减法处理器, 仅需几个时钟周期. 如所有的监督位都无光表明无错误发生; 如某些监督位透光, 则通过光电转换与编码确定错误位置, 并用查表方式纠错.

6 结 论

随着千位三值光学计算机应用系统研究的推进, 确保三值光学计算机系统的正确性和可靠性, 已

生成器生成监督码信息 $S'_4 S'_3 S'_2 S'_1$, 确定错误出现的位置, 如有错, 则通过纠错部件进行纠错; 最后对正确信息进行下一步的处理(如正确信息的光信号转换成表示同一信息的电信号, 再对这些电信号通过输出线存储到输出存储阵列等).

校验位生成器与验证位生成器: 对输入的信号经模 3 加法运算后生成相应的校验码位和验证码位.

监督位生成器: 通过 4 个一位数模 3 减法生成 4 位监督码位.

纠错部件: 通过计数器统计监督码信息 $S'_4 S'_3 S'_2 S'_1$ 中 0 的个数, 如为 0, 那么信息传输无误; 如为 1, 那么校验位有误, 可不必处理; 否则信息位出现错误. 然后根据纠错码表 A 或 B 进行纠错. 纠错处理过程实际是一个加 1 或减 1 过程, 光学实现很容易. 根据如图 1 所示的三值汉明码检错纠错概念结构图画出如图 2 所示的三值汉明码检错纠错框架图.

成为三值光学计算机理论和设计研制中的重要问题. 本文对三值光学计算机可靠性有关技术进行了研究, 提出了基于 MSD 表示的三值汉明码的检错纠错原理和一位错误位置的判定和纠错方法, 但该方法不能实现检二纠一功能. 本文给出了基于三值光学计算机的三值汉明码检错纠错概念结构图, 从目前光学处理器研究进展来看, 本文的检错纠错的实现已不存在技术问题. 本文所给出的校验位分组模式易于扩展以提高检错性能, 但编码效率不高, 对扩展三值汉明码以及其他较高效率的编码方式的相关研究正在进行之中.

致 谢 感谢金翊教授、彭俊杰副教授、欧阳山博士及课题组其他老师和博士、硕士研究生, 他们在本文写作过程中给予了帮助!

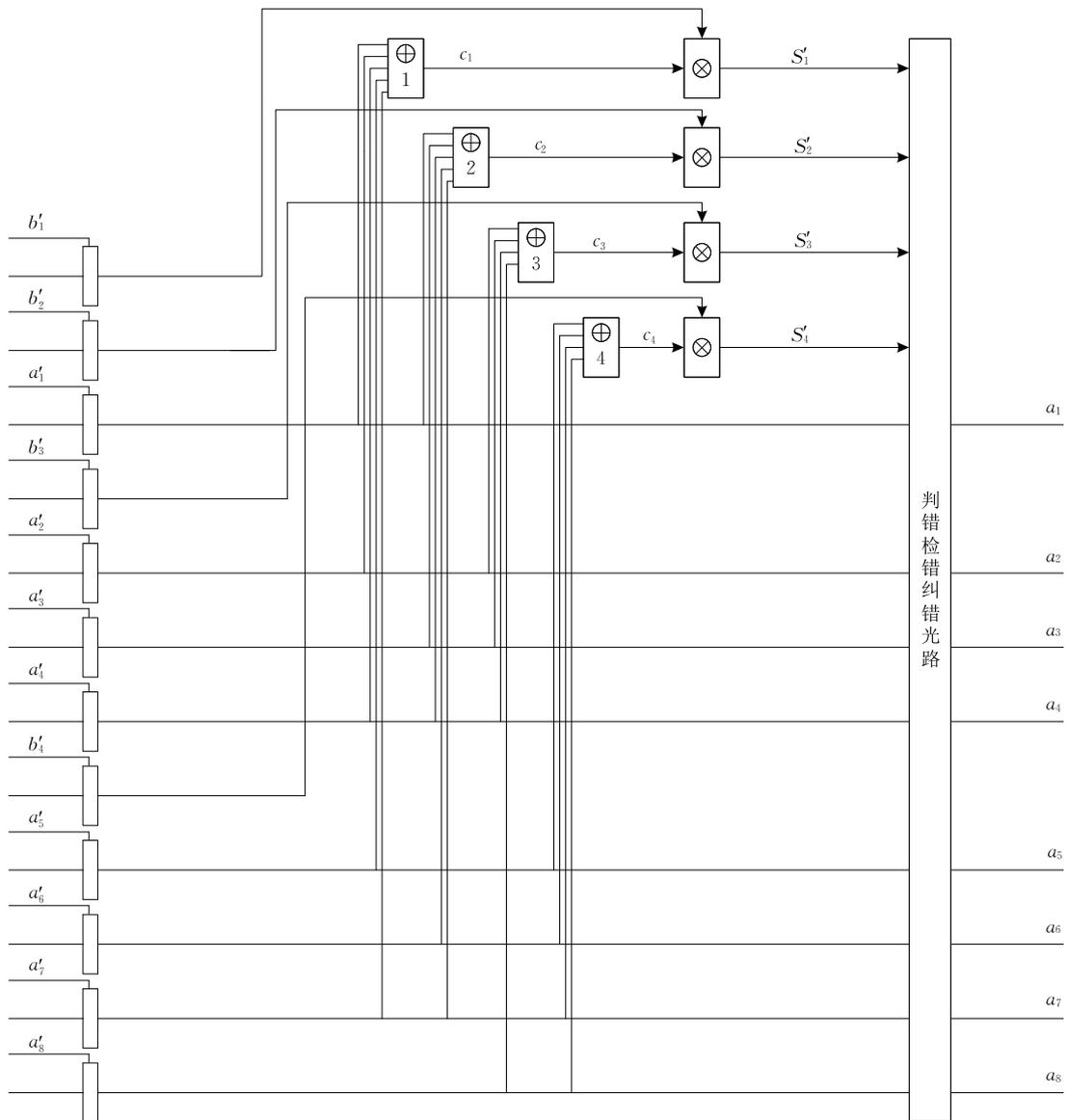


图 2 三值(12,8)汉明码检错纠错框架

参 考 文 献

- [1] Caulfield H J, Vikram C S, Zqvalin A. Optical logic redux. *Journal for Light and Electron Optics*, 2006, 117(5): 199-209
- [2] Mal P, Cantin J F, Beyette F R. Development of a multitechnology field-programmable gate array suitable for photonic information processing. *Applied Optics*, 2005, 44(22): 4753-4760
- [3] Chen Gui-Ying, Zhang Chun-Ping, Guo Zong-Xia, Yang Xiu-Qin. Research and application of all-optical logic gates by bacteriorhodopsin. *Physics Experimentation*, 2005, 25(2): 13-17(in Chinese)
(陈桂英, 张春平, 郭宗霞, 杨秀芹. 细菌视紫红质在全光逻辑器件中的研究与应用. *物理实验*, 2005, 25(2): 13-17)
- [4] Ye Jun-Qing, Zhao Chan, Zhang Xin-Liang. Experimental and theoretical investigation on all-optical logic nor gates. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, 4(5): 66-69(in Chinese)
(叶俊卿, 赵婵, 张新亮. 一种全光逻辑或非门的理论和实验研究. *光学与光电技术*, 2006, 4(5): 66-69)
- [5] Guilfoyle P S, Mccallum D S. High speed low energy digital optical processors. *Optical Engineering*, 1996, 35(2): 436-442
- [6] Yang Lin, Ji Rui-Qiang, Zhang Lei, et al. On-chip CMOS-compatible optical signal processor. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13560-13565
- [7] Ding Jian-Feng, Chen Hong-Tao, Yang Lin, et al. Ultra-low-power carrier-depletion Mach-Zehnder silicon optical modulator. *Optics Express*, 2012, 20(12): 7081-7087
- [8] Thomson D J, et al. High contrast 40 Gb/s optical modulation in silicon. *Optics Express*, 2011, 19(12): 11507-11516

- [9] Thomson D J, Gardes F Y, Fedeli J-M, et al. 50-Gb/s silicon optical modulator. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(4): 234-236
- [10] Lin Rong-Hui. Research on Principle of Ternary Optical Fiber Communications and Circuit Design [M. S. dissertation]. Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 2003(in Chinese) (林榕慧. 三值光纤通信原理研究及电路设计[硕士学位论文]. 西北工业大学, 西安, 2003)
- [11] Wang Yan, Yang Qi-Feng, Jia Qi, Zheng Yan-Hong. Reliability design and realization of the optical communication system. *Microelectronics & Computer*, 2010, 27(9): 12-15 (in Chinese) (王岩, 杨奇峰, 贾琪, 郑燕红. 空间光通信系统可靠性设计与实现. *微电子学与计算机*, 2010, 27(9): 12-15)
- [12] Jin Yi, He Hua-Can, Lv Yang-Tian. Ternary optical computer principle. *Science in China (Series F)*, 2003, 46(2): 145-150
- [13] Jin Yi. Draw near optical computer. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2011, 17(4): 401-411 (in Chinese) (金翊. 走近光学计算机. *上海大学学报(自然科学版)*, 2011, 17(4): 401-411)
- [14] Jin Yi, Wang Xian-Chao, Peng Jun-Jie, et al. Conceptual structure of ternary optical computer and high performance computer merger//*Proceedings of the HPC China 2010*. Beijing, China, 2010: 1-4
- [15] Shen Shi-Quan. Application of extend Hamming codes in serial data communication. *Journal of Guizhou University (Natural Science)*, 1995, 12(2): 91-95(in Chinese) (申时全. 扩展 Hamming 码在串行通信中的一种应用. *贵州大学学报(自然科学版)*, 1995, 12(2): 91-95)
- [16] Wang Ai-Zhen. Design of expansion Hamming coder/decoder and its FPGA realization. *Modern Electronics Technique*, 2008, 282(19): 187-191(in Chinese) (王爱珍. 扩展汉明码的编解码器设计及其 FPGA 实现. *现代电子技术*, 2008, 282(19): 187-191)
- [17] Avizienis A. Signed digit number representation for fast parallel arithmetic. *IRE Transactions on Electronic Computers EC*, 1961, 10(3): 389-400
- [18] Drake B L, Bocker R P, Lasher M E, et al. Photonic computing using the modified signed-digit number representation. *Optical Engineering*, 1986, 25(1): 38-43
- [19] Yao Li, George Eichmann. Conditional symbolic modified signed-digit arithmetic using optical content-addressable memory logic elements. *Applied Optics*, 1987, 26(12): 2328-2333
- [20] Casasent D, Woodford P. Symbolic substitution modified signed-digit optical adder. *Applied Optics*, 1994, 33(8): 1498-1506
- [21] Huang Hong-Xin, Masahide I, Toyohiko Y. Classified one-step modified signed-digit arithmetic and its optical implementation. *Optical Engineering*, 1996, 35(4): 1134-1140
- [22] Jin Yi, Shen Yun-Fu, et al. Principles and construction of MSD adder in ternary optical computer. *Science China Information Sciences*, 2010, 53(11): 2159-2168



SHEN Yun-Fu, born in 1960, Ph.D., associate professor. His research interests include formalization method of software and hardware, model checking and reliability of ternary optical computer and so on.

PAN Lei, born in 1988, M. S. candidate. His research interest is reliability of ternary optical computer.

Background

Since 2000, the team led by Jin Yi has been studying the ternary optical computer with characteristics of photoelectric hybrid, reconfigurable arithmetic unit, and numerous data bits. SD11, the application-oriented optical computer system of thousand bits, was launched in 2011. Now the hardware manufacture and software design for the system SD11 are close to the end. With the development and advancement of SD11, its complexity is increasing, and errors and defects are unavoidable in the design. These errors and defects not only affect the reliable and safe operation for the system, but also

cause the system to failure. In order to ensure the right operation of system, a lot of theory and implementation technology needs to be put forward. The research on monitoring system and the reliability for SD11 has been carried out. In addition, any error for three-valued data in operation, transmission, storage etc needs to be detected, isolated and corrected. So the researches related to the subject are carried out not only on the theory of detecting-correcting error and fault tolerance for ternary data but also on the technology in reliability of SD11. This is a new subject which is paid close

attention in reliability of the ternary optical computer. It is also a new research field. The related project was supported by innovation program of Shanghai Municipal Education Commission(No. 13YZ005), Shanghai Leading Academic Discipline Project (No. J50103) and the National Natural Science Foundation of China (No. 61103054). Till now we have not seen the reports in the related research in journals at home and abroad.

Our team has done the research on system monitoring and reliability in ternary optical computer deeply for a long time. In addition, the authors studied the theory of Berger

code in detecting errors of three-step MSD adder and one-step MSD adder. In this paper, the study of the theory and technology of the error detecting and error correcting in ternary Hamming code is from the requirement of error detecting and error correcting performance extension. It gives a feasible encoding mode for ternary Hamming code and a method for determining position of the error, and correction technique based on two correction tables. For other encoding methods to improve the coding efficiency and to develop the Extended Ternary SEC-DEC Code are our next work.