

文章编号 1004-924X(2012)11-2548-11

适于高速 CCD 图像数据光纤传输的纠错技术

李 进^{1,2*}, 吕增明¹, 陶宏江¹, 李新娥¹, 金龙旭¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:提出了一种适于高速 CCD 图像数据光纤传输的纠错算法用于提高大视场时间积分延迟(TDI)CCD 相机中图像数据传输的可靠性。首先,分析了大视场空间相机图像数据光纤传输特点和光纤信道加性高斯白噪声(AWGN)模型下的数据传输差错,在此基础上提出了(16,8)纠错编码算法。阐述了(16,8)纠错编码算法思想以及纠错原理,说明了(16,8)纠错编码器的超大规模集成电路(VLSI)实现方法和编码器电路。然后,从不同角度分析了(16,8)纠错编码算法在大视场空间相机中应用的可行性。最后,在一空间多光谱相机样机的传输系统上进行了试验验证。结果表明:(16,8)纠错编码算法纠错能力强、易于硬件实现、占用资源少,在 3 043 Byte 内可以纠正 191 bit 错误,编码器资源占用率小于 5%。提出的算法提高了空间相机中图像数据光纤传输的可靠性。

关键词:CCD 图像;光纤传输;(16,8)纠错算法;编码电路

中图分类号:TN919.8;TN915 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122011.2548

Error correction technology for CCD image using high speed optical fiber transmission

LI Jin^{1,2*}, LÜ Zeng-ming¹, TAO Hong-jiang¹, LI Xin-e¹, JIN Long-xu¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: 664910699@qq.com

Abstract: An error correction algorithm for CCD images was proposed to improve the reliability of image optical fiber transmission in a Time Delay Integrated(TDI)CCD camera with a large field of view. First, the image optical fiber transmission characteristics for the space camera and data transmission errors in a fiber channel Additive White Gaussian Noise(AWGN) model were analyzed, and a (16, 8) error correction algorithm was proposed. Then, the (16, 8) algorithm idea and error correction principle were described and an implementation method using Very Large Scale Integration(VLSI) and an encoder were explained. Meanwhile, the feasibility of the algorithm for space camera was explained in different aspects. Finally, the experiments were performed for the transmission system of a prototype in a space multispectral camera. The results show that the (16, 8) algorithm has strong error detec-

收稿日期:2012-06-15;修订日期:2012-07-16.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

ting ability, less resource occupied rate and easier to realize with a hardware. The method is able to correct 191 bit errors in 3 043 Byte, and the resource occupied rate for the encoder is less than 5%. In conclusion, the algorithm improves the reliability of image optical fiber transmission in space cameras.

Key words: CCD image; optical fiber transmission; (16,8)error correction algorithm; coding circuit

1 引 言

目前基于时间延迟积分(TDI)电荷耦合器件(CCD)推扫成像技术的空间相机正向着大视场、宽覆盖、高分辨率方向发展,从而导致 CCD 图像数据量呈几何级数增加^[1-4]。空间相机为保证 CCD 信号质量和减少成像部分的负荷,数据压缩存储单元设计的距焦平面较远,这就需要远距离地进行图像传输。由于数据量十分庞大,目前通常采用的传输方式为先将并行图像高速串化转化为差分信号,然后通过光纤进行收发^[5-8]。这些光纤传输系统进行远距离、高速的图像传输可获得较好的性能,但是这些传输系统均没有考虑传输可靠性,而 CCD 图像在光纤传输系统中传输时,各通道通常需要在高达几 Gbps 的传输速率下工作,且空间工作环境复杂,系统易受信道失真、噪声和干扰等的影响从而劣化光信号的性能,随着传输距离的增加,将导致光信噪比连续下降,当接收端超出光接收机灵敏度时,就会出现误码,导致图像数据的传输差错。因此,如何纠错编码是图像可靠传输的关键问题。

光纤传输系统通常采用前向纠错编码(FEC)技术来提高光纤链路传输可靠性。目前用于光纤传输系统的 FEC 码主要有 BCH 码、RS 码、Goppa 码、Turb 乘积码以及卷积码等,这些码也可以通过交织或级联的方式实现。这些纠错编码技术在其自身的应用场合取了较好的效果,但对于大视场空间 CCD 相机并不完全适用。这是因为每片 CCD 每通道输出的视频信号经处理后的图像数据足以行为单位实时输出的,每行包括有效像素和消隐像素。相机在轨工作时为了进行异速匹配,消隐像素数需要进行实时调整,即行频是实时变化的。为了保持行频在传输中不发生畸变,传输系统不仅需要发送有效数据还需发送消隐像素数。传统的 FEC 纠错算法由于译码算法复杂、计

算耗时、实现困难,不适于空间相机数据量、实时性强的场合。

本文在参考国内外相关技术的基础上,根据背景项目需求,结合空间相机图像传输工作特点提出了一种适合于空间高速多通道 CCD 图像传输纠错编码算法和实现该算法的编码器电路。该算法突破了传统图像数据光纤传输可靠性低的现状,解决了传统纠错算法中的复杂译码纠错问题,大大提高了纠错效率、降低了资源占用率,同时没有增加空间相机其他模块的设计难度。纠错算法的这种特点非常适合于大视场空间相机高速多通道图像传输系统,故本文提出的技术已经在一空间多光谱相机样机的图像传输设备上获得了应用。应用结果表明,该技术可以有效地解决空间相机图像数据光纤传输的不可靠存储问题。

2 高速 CCD 图像光纤传输系统

2.1 CCD 图像信息光纤传输系统组成

为了说明高速 CCD 图像数据光纤传输纠错算法的应用背景,以笔者设计的某一空间多光谱相机原理样机的图像光纤传输系统为例,系统总体结构如图 1 所示。

系统含有 9 片 TDICCD,每片 CCD 具有 5 个成像谱段,其中全色 CCD 像元数为 12 000,蓝、红、绿和近红外 CCD 像元数均为 3 000,每片 CCD 采用 8 通道模拟信号同时并行输出,包括 4 通道全色模拟信号和 4 通道多光谱模拟信号。为了避免由单点失效引起的全系统功能的失败,各片 CCD 输出的模拟视频信号独立并行处理,即 CCD 单元分成 9 个独立通道并行处理和传输。每片 CCD 的每通道均采用 12 位专用视频处理器进行模数转换。每片 CCD 的输出图像数据率为

$$K_{\text{CCD}} = m \times n \times f_{\text{L}}, \quad (1)$$

式中:

$$f_{\text{L}} = f/H \times v/a, \quad (2)$$

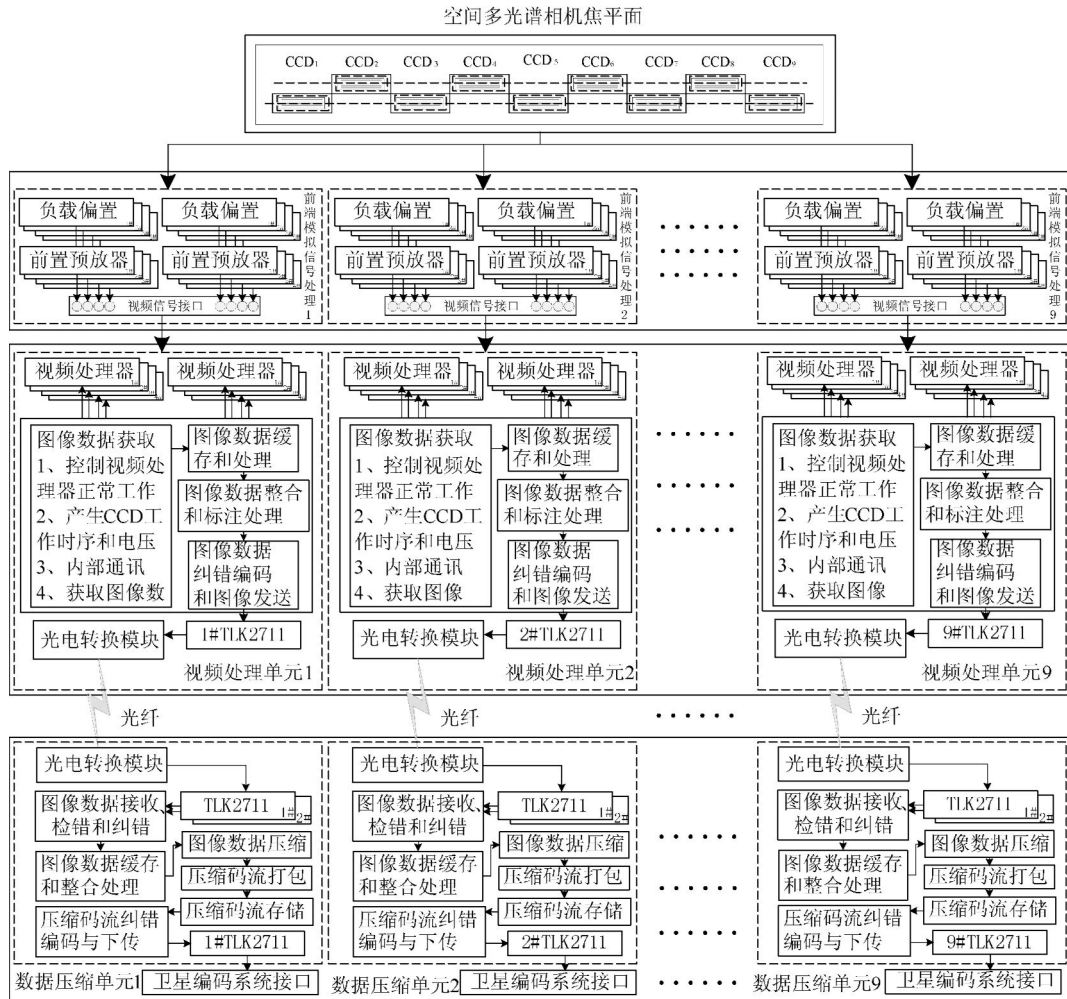


图 1 CCD 图像传输系统

Fig. 1 CCD image transmission system

其中： m 为 CCD 有效像元数， n 为量化位数， f_L 为推扫行频， f 为相机焦距， H 为卫星轨道平均高度， v 为星下点速度， a 为 CCD 像元尺寸。在轨道高度为 500 km，相机焦距为 3.5 m，星下点速度为 7 063 m/s 下，由式(2)求得全色 CCD 行频为 7.06 kHz，多光谱 CCD 行频为 1.766 kHz。由式(1)求得每片 CCD 全色通道输出的图像数据率为 1.016 64 Gbps，红、绿、蓝和近红外通道输出的总图像数据率为 0.254 304 Gbps。因此相机每通道需要传输的图像总数据率为 1.270 944 Gbps。由于相机每通道数据率为 G 比特级，传统图像传输方式难以满足，需要光纤传输。图 1 中 9 通道的光纤传输链路内部结构相同，且每通道的发送端与接收端的结构也相同，电路结构如图 2 所示。通常光纤通信为点对点的，而 CCD 输出的模拟视频信号经 A/D 转

换后为 12 bit 的并行数据，因此，需要将待传输的并行数据串化。串化器并行工作时钟由下式决定：

$$H = \frac{k}{n}, \quad (3)$$

其中： n 为量化位数， k 为相机每通道需要传输的数据率。这里， $n=16$ ， $k=1.270\ 944\ \text{Gbps}$ ，代入式(3)可求得 $H=105.912\ \text{MHz}$ 。因此，传输系统选用并行工作频率为 85 ~ 135 MHz 的串化器 TLK2711。TLK2711 内部结构如图 2 所示，工作原理为：将 16 bit 输入数据进行 8/10 bit 编码为 20 bit，并行时钟 20 倍频为串行传输时钟，然后进行串行传输。其中 8/10 bit 编码用来确保最小传输密度，便于转换前后时钟同步，并确保串行传输中“0”，“1”信号数量一致，以获得更好直流平衡性，抑制收发两端参考电压差异的影响。

I_a 表示发送端发 a 信号 s_a 通过 AWGN 信道后在接收端接收的信号, 它是由原来发送的 s_a 加上 AWGN 中的噪声形成的, 其概率密度函数为 $p(v/s_a)$ 。 I_b 表示发送端发 b 信号 s_b , 通过 AWGN 信道后在接收端接收的信号, 它是由原来发送的 s_b 加上 AWGN 中的噪声形成的, 其概率密度函数为 $p(v/s_b)$ 。设高斯信道中的高斯噪声均值为 0, 方差为 σ_0^2 , 则:

$$p(v/s_a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-(v-s_a)^2/(2\sigma_0^2)}, \quad (4)$$

$$BER = \frac{1}{2}(P_{e1} + P_{e0}) = \frac{1}{2} \left(\int_{-\infty}^{I_c} p(v/s_b) dv + \int_{I_c}^{+\infty} p(v/s_a) dv \right) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{s_b - I_c}{\sqrt{2}\sigma_0} \right] + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{I_c - s_a}{\sqrt{2}\sigma_0} \right] \right], \quad (6)$$

为了使误码率 BER 最小, 要取 $I_c = \frac{S_a + S_b}{2}$, 同时假设 $s_a = -s_b$, 则上式可以化为:

$$BER = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left[\frac{S_b - S_a}{2\sqrt{2}\sigma_0} \right] \right] = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left[\sqrt{2} \frac{S_b}{\sigma_0} \right] \right] = \frac{1}{2} (\operatorname{erfc}(\sqrt{2} \operatorname{SNR})), \quad (7)$$

其中: $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2} dy$.

由式(7)可以看出: 信道的信噪比(SNR)的变化会影响信道输出的误码率, SNR 小到一定程度时, 信号经过信道传输就会有较严重的误码率, 以至于超出传输系统的最大误码要求, 导致图像传输差错。因此, 为了确保高速图像数据远距离正确传输而不受噪声影响, 本文采用前向纠错技术(FEC)解决这一问题, 它通过在发送端给发送的图像数据加入一定的行列校验冗余信息, 可以在接收端通过译码将原来的误码率降低, 从而可以减少因信道中信噪比较小导致的大误码率, 提高数据传输的可靠性和功率利用率。

3 算法的提出与实现

3.1 纠错编码算法

考虑到空间 CCD 相机图像在轨传输特点, 本文提出一种新的 FEC 纠错算法—(16, 8)纠错算法。该算法先将图像数据进行编码生成行列校验冗余信息, 然后将校验信息和图像数据一起通过光纤发送。在接收端将接收的图像数据再一次编码生成新的校验数据信息, 通过计算发送前校验数据和接收后校验数据关系进行检测并纠正正在传输中发生的错误, 恢复发送的图像数据, 不需要重新发送出错的图像数据, 满足空间相机图像实时传输的要求。

(16, 8)纠错编码算法是一种小步长数据范围

$$p(v/s_b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-(v-s_b)^2/(2\sigma_0^2)}. \quad (5)$$

设发送端发送信号 a 信号和信号 b 的概率是等概率的, 即发送 a 信号的概率 $p(s_a) = 1/2$, 发送 b 信号的概率为 $p(s_b) = 1/2$ 。再设接收端接收到信号后, 使用的判决门限为 I_c , 将 s_b 误判为 s_a 的概率为 P_{e1} , 将 s_a 误判为 s_b 的概率为 P_{e0} , 则信号经过信道传输后的误码率为

的纠错编码策略, 具有很高的纠错能力。纠错编码思想为: 每 16 个 8 bit 图像数据为一组进行纠错编码, 把 16 字节数据看成 16×8 的矩阵, 矩阵的每个元素表示一个比特位。矩阵进行编码后分别生成 6 bit 的列校验信息和 8 bit 的行校验信息, 行列校验码共 14 bit, 添“00”组成为 2 字节的校验码。最后, 将图像数据和校验码组合为编码输出结果。本文称这种编码算法为(16, 8)纠错编码算法。(16, 8)纠错编码算法的校验码编码规则如图 5 所示。其中 P1, P1', P2, P2', P4, P4' 为列校验码, P8, P8', P16, P16', P32, P32', P64, P64' 为行校验码。设待输入编码器的第 n 字节 S 为

$$S(n) = (\alpha_n^7, \alpha_n^6, \alpha_n^5, \alpha_n^4, \alpha_n^3, \alpha_n^2, \alpha_n^1, \alpha_n^0), \quad (8)$$

列校验码 P 和 P' 的生成计算方法为

$$D(m) = \sum_{n=1}^{16} \alpha_n^m \quad m = 0, 1, 2, \dots, 7, \quad (9)$$

$$P1 = D(7) + D(5) + D(3) + D(1), \quad (10)$$

$$P1' = D(6) + D(4) + D(2) + D(0), \quad (11)$$

$$P2' = D(5) + D(4) + D(1) + D(0), \quad (12)$$

$$P2 = D(D(7) + D(6) + D(3) + D(2)), \quad (13)$$

$$P4 = D(7) + D(6) + D(5) + D(4), \quad (14)$$

$$P4' = D(3) + D(2) + D(1) + D(0), \quad (15)$$

行校验码 P 和 P' 的生成计算方法为:

$$E(n) = \sum_{i=0}^7 \alpha_n^i \quad n = 1, 2, 3, \dots, 16, \quad (16)$$

$$P8 = \sum_{k=1}^8 E(2k), \quad (17)$$

$$P8' = \sum_{k=1}^8 E(2k-1), \quad (18)$$

$$P64 = \sum_{k=9}^{16} E(k), \quad (19)$$

$$P64' = \sum_{k=1}^8 E(k), \quad (20)$$

其中：“+”表示“位异或”操作。

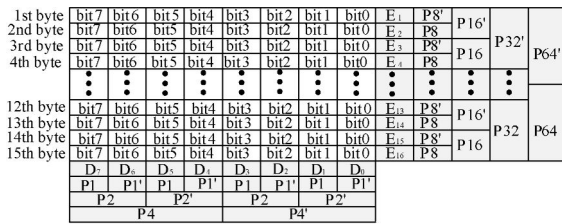


图 5 (16,8)纠错校验码生成方法

Fig. 5 (16,8) error correct generation method

下面说明纠错编码算法如何检测错误并进行纠正。检错与纠错原理如图 6 所示。图像数据发送时,每 16 个数据生成一组 16 bit 的校验码,称为发送校验码。传输系统发送端将发送校验码和图像数据通过光纤链路进行发送,接收端将图像数据和发送校验码接收后分离,同时对接收的一组图像数据进行(16,8)编码生成新的 16 bit 的校验码,称为接收校验码。然后将接收的发送校验码和新生成的接收校验码按位异或操作。结果会出现 3 种情况:(1)全为“0”,则数据不存在错误;(2)只存在 1 bit 为 1,则生成的校验码出错,数据本身无错;(3)存在 8 bit 为“1”,则存在一个比特错误,且可以纠正;(4)其他情况则出现多个错误,不可纠正。

当出现情况(2)时,传输过程图像数据没有发送差错,因此不需要纠正。当出现情况(3)时,由于

发生单粒子翻转的数据位在数据组中的字节偏移量为 P64, P32, P16, P8。发生单粒子翻转的数据位在所处的字节中的位偏移量为 P4, P2, P1。因此,根据字节的偏移量和字节中的位偏移量就可以确定数据中发生的翻转位,然后对其进行纠正。

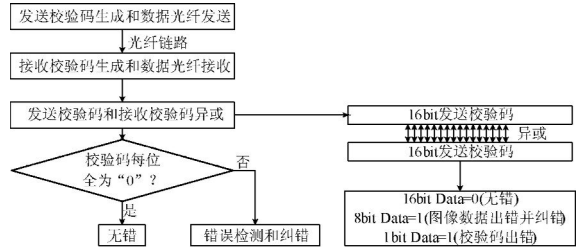


图 6 (16,8)纠错编码算法纠错原理

Fig. 6 Correction principle of (16,8) error correct algorithm

3.2 (16,8)纠错编码算法应用及 VLSI 实现

(16,8)纠错编码算法进行编码的数据是 8 bit,以图 1 所示传输系统为例,CCD 图像数据为 12 bit,本文采用添“0”的办法将 CCD 图像数据组织成为 16 bit,将 16 bit 分为高字节和低字节分别进行纠错编码。图 1 传输系统中,由于 9 片 CCD 是相同的,所以对应的 9 路数据纠错编码结构也是一致的。具体到每路,其结构如图 7 所示。每片 CCD 同时并行输出 8 路数据,每路通过乒乓操作的 RAM 进行缓存,在乒乓作业方式的读 RAM 时,以 16 个数据为一组,每读取 1 个图像数据一方面进入高低字节(16,8)纠错编码器进行编码,另一方面通过 TLK2711 进行串化、光纤传输。当读取数据计数器为 16,编码器生成校验码,然后分别将 2 字节校验码组织成 16 bit,进行串化、光纤传输。读取计数器清零,准备对下一组数据进行编码。接收端采用相同的原理生成接收校验码,然后根据发

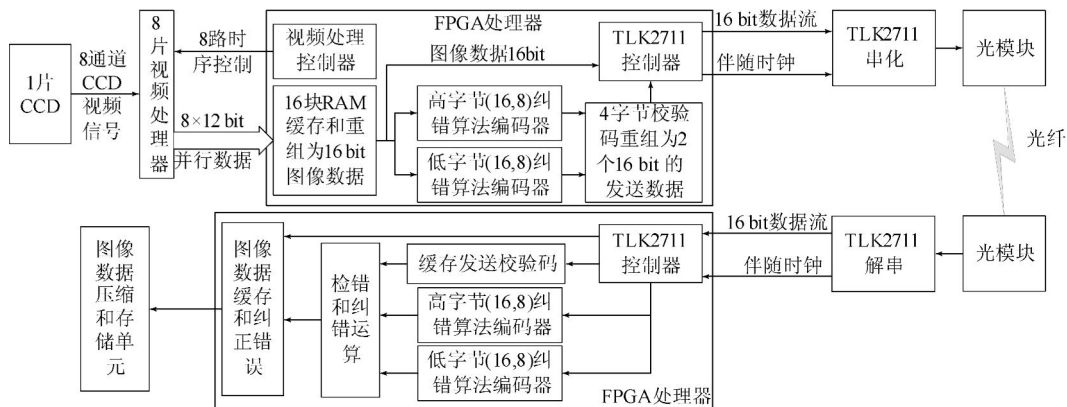


图 7 光纤传输通道编码器结构

Fig. 7 Encode structure in fiber-link

送校验码和接收校验码进行纠错。

由式(9)~(20)可知,(16,8)纠错编算法中运算是有限域 $GF(2^8)$ 上的算术运算,这些运算只需使用有限域加法器就可以实现。设计的编码器电路如图 8 所示,初始时,编码器中各寄存器值为“0”,Gate 选通,送入信息组 $S(n)$, $S(n)$ 各比特进

入相应运算链路,一方面进行码内比特之间异或运算,另一方面进行码间相应比特异或运算,运算结果保存到寄存器中。当输入编码器信息码数为 16 时,寄存处中保留的是最终校验码的各比特。Gate 断开,校验码元从编码器中输出,与最初的 16 个信息组成一个长为 18 的码字。

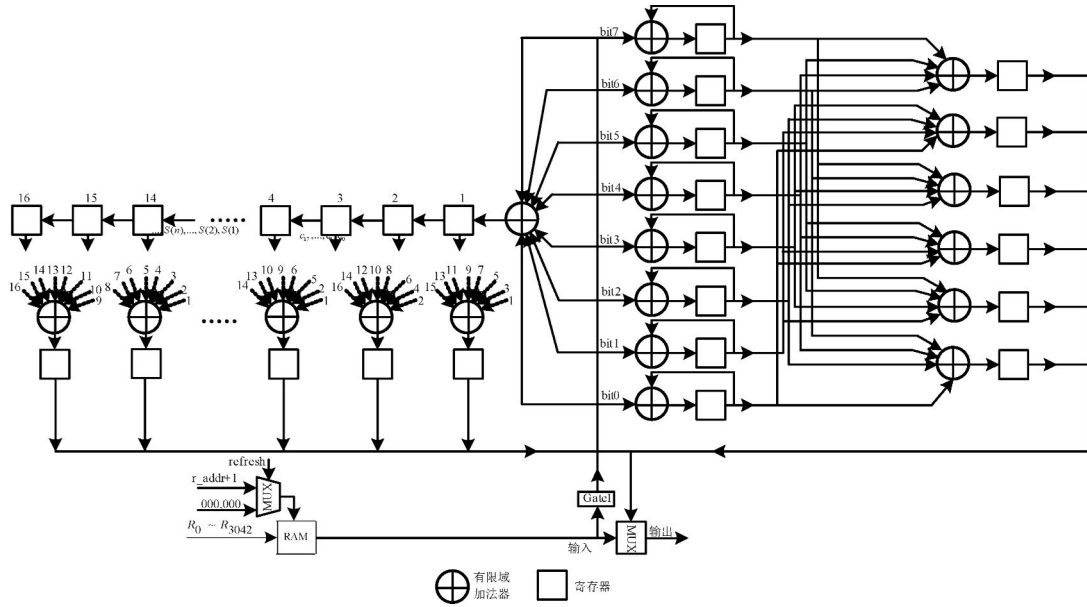


图 8 编码电路

Fig. 8 Encode circuit

3.3 纠错编算法在空间相机中的可行性分析

下面分析纠错编算法的引入对空间相机相应模块的影响,以图 1 所示系统为例。从串行化的并行和串行传输速率方面看,(16,8)纠错编算法在待传输的原始图像数据中加入了冗余码元,使总的传输数据量增多,必然使串行化工作时钟增高和串行输出速率。因此,需要分析纠错算法的可行性。

以 CCD 全色通道为例,设单片 CCD 全色通道数为 a ,有效像元数为 b ,图像数据占用的字节数为 c ,全色通道行频为 f_{PL} ,则全色通道经编码后总输出数据率为

$$K_{PCCD} = a \times \left[\left(b + \frac{2b}{16} \right) \times c \right] \times f_{PL}, \quad (21)$$

其中: $a=4$, $b=3\ 000$, $c=2$ 。相机工作在轨道平均高度为 500 km,侧摆为 40° ,纬度 $-70^\circ \sim +70^\circ$ 条件下,全色 CCD 工作行频为 $7.237\ 6 \sim 3.437\ 8$ kHz。因此, $f_{PL,max}=7.237\ 6$ kHz。求得 $K_{PCCD}=1.563\ 3$ Gbps。同理,求得红、绿、蓝和近

红外通道输出的总图像数据率为 0.390 8 Gbps。因此,经编码后,相机每通道需要传输的图像总数数据率变为 1.954 1 Gbps。由公式(3)可求得 H 为 122.13 MHz,串行传输速率为 $20 \times H=2.44$ Gbps,而 TL2711 最大并行工作时钟为 135 MHz,最大串行传输速率为 2.7 Gbps。可见,加入冗余的校验码后仍然小于串行化的工作极限值,即(16,8)纠错编算法是可行的。

从图像传输的实时性方面看,CCD 每通道输出的图像数据通过两块乒乓操作的 RAM 作为缓存,如图 9 所示。以全色通道为例,为了实现图像高速实时传输的作用,要求

$$T_I = n \times T_{read} \times \left(N + a + \frac{2b}{16} \right) \leq T_{line}, \quad (22)$$

其中: T_I 为传输一行数据所花费的时间, n 为 CCD 输出通道数, T_{read} 为读缓存 RAM 周期, $T_{read}=1/H=8.188$ ns, N 为 CCD 像元数, a 为消隐像素数占用的字大小, b 为 CCD 有效像元数, T_{line} 为 CCD 输出行周期。由于 $f_{PL,max}=7.237\ 6$ kHz,因此, T_{line}

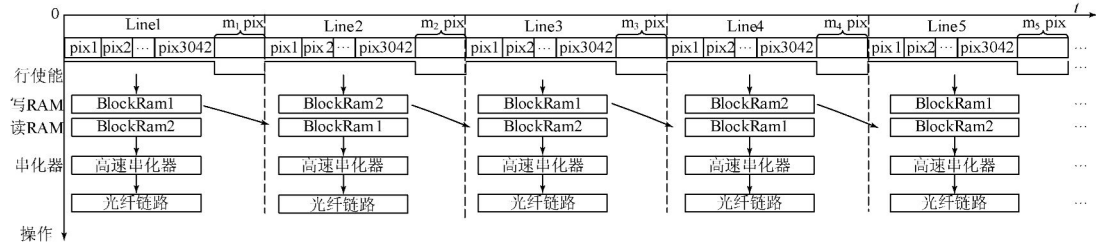


图 9 RAM 乒乓缓存

Fig. 9 RAM of ping-pang buffer

的最小值为 0.138 2 ms。消隐像素数

$$m = \frac{f_P}{f_{PL}} - \frac{N}{n}, \quad (23)$$

其中: N 为单片 CCD 总像元数, n 为 CCD 输出通道数, f_P 为像移转移速率。相机 CCD 成像单元全色通道 f_P 设计为 21 MHz, 多光谱通道设计为 5.5 MHz。全色通道和多光通道的 m 值均为: $39 \leq m \leq 3400$ 。因此, 消隐像素数需要 2 个字节表示, 即 $a=1$ 。可以求得 $T_i=0.11057$ ms, 即 $T_i \leq T_{line}$, 可见校验码加入对图像传输的实时性没有影响。

从校验码占用内存方面看, CCD 每通道的校验码仅占用 4 字节, 因此占用内存十分小。从实现速度方面看, 由式(9)~(20)可知, 计算过程没有乘法和除法运算, 均是异或运算, 这种特点非常适合 FPGA 实现, 只需采用组合逻辑电路叠加异或即可。

从上面的分析可以得出, 本文提出的(16,8)纠错编码算法在高速 CCD 图像数据光纤传输应用场合完全可行。

4 算法验证与结果分析

4.1 实验方案

为了测试(16,8)纠错编码器工作性能, 使用了主研发的地面检测设备, 实验系统如图 10 所示。系统工作过程为: 服务器向图像模拟源注入各种测试图像和相应参数, 图像模拟源对图像数据存储、调整输出行速率、调整输出大小和时间等, 最终实现模拟 CCD 成像单元的输出并发送至 CCD 图像光纤传输系统。CCD 图像光纤传输系统为图 1 所示的系统, 传输系统对测试图像进行发送、传输和接收后传输到地面相机检测设备中, 地面相机检测设备进行观察图像。

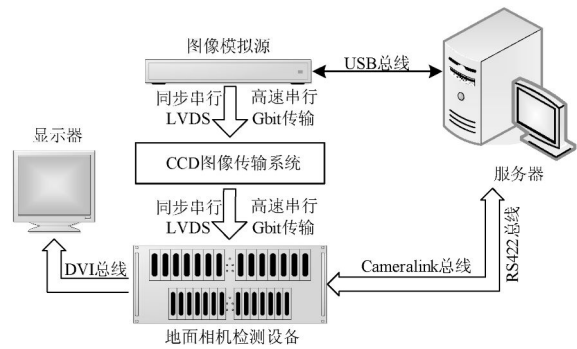


图 10 实验系统结构

Fig. 10 Structure of experiment system

4.2 (16,8)纠错算法验证

(16,8)纠错算法的校验码信息数据结构如表 1 所示, 采用 16 bit 的数据结构, 行列校验码信息共 14 bit, 其中 2~7 bit 为列校验码, 8~15 bit 为行校验码, 剩余 2 位保留, 以便扩展, 这里设置为“11”。

表 1 校验码信息数据结构

Tab. 1 Checkout code information structure

位	15	14	13	12	11	10	9	8
信息	P64	P64'	P32	P32'	P16	P16'	P8	P8'
位	7	6	5	4	3	2	1	0
信息	P4	P4'	P2	P2'	P1	P1'	保留	保留

错误比特位置偏移量信息数据结构如表 2 所示, 采用 7 bit 的数据结构, 其中 0~2 bit 为发生单粒子翻转的数据位在所处的字节中的位偏移量, 3~6 bit 为发生单粒子翻转的数据位在数据组中的字节偏移量。

表 2 错误比特位置偏移量信息数据结构

Tab. 2 Fail bit location information structure

位	6	5	4	3	2	1	0
信息	P64	P32	P16	P8	P4	P2	P1

为了测试(16,8)纠错算法性能,图像自校发生器定时向 CCD 成像系统发送测试数据 01,02,...,15,16,当加入单粒翻转事件使 06 变为 07 后。原始数据流以及单粒子翻转后数据流的编码模块生成校验码时序仿真波形如图 11 所示。

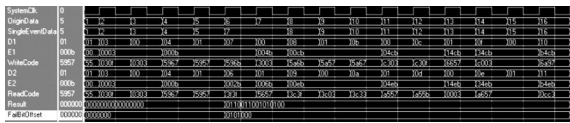


图 11 (16,8)纠错算法仿真波形

Fig. 11 Time sequence simulation waveform of (16,8) algorithm

由图 11 知,16 个数据发送完,生成的写校验码为“01101010_10010111”,单粒子翻转事件发生生成的读校验码为“00001100_11000011”,读写校验码异或后得到的结果为“01100110_01010100”。异或结果中有 7 个 1,说明读出的数据中出现了一位的翻转。由读写校验码进行异或结果后,得出错误比特位置偏移量为“0101_000”。由字节偏移量可知数据组中的第 6 字节出现错误,由位偏移量可知错误字节的第‘0’位发生翻转,得出结果与假设相符合。根据错误位置纠正错误,输出正确的数据。

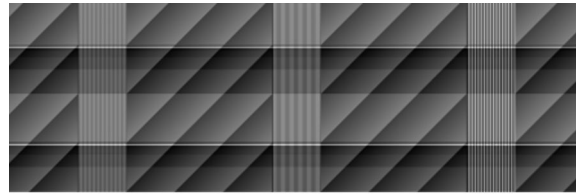
4.3 纠错编码算法编码器实验结果与分析

为了验证加入纠错编码算法后传输系统整体工作性能,图像模拟源向 CCD 成像系统发送自校测试图形,测试自校图形经编码、串化、光纤发送、光纤接收、解串、纠错后通过 Camera Link 传到 PC 机上,得到的结果如图 12(b)所示,测试自校图形不经过缓存,直接传到 PC 机上得到的结果如图 12(a)所示。

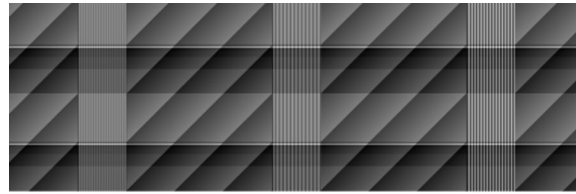
取 20 组如图 12 所示的图像,并对各组图像的数码值进行比较。计算方法借鉴数学上衡量保真度的均方根误差公式:

$$e_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (p(x,y) - q(x,y))^2}{MN}}, \quad (24)$$

其中: $p(x,y)$ 为图 12(a) 数码值, $q(x,y)$ 为图 12(b) 数码值, M 为 CCD 像元数, N 为扫描行数。由



(a)直接传输
(a) Direct transmission



(b) (16,8) 算法
(b) (16,8) method

图 12 系统实验结果

Fig. 12 Experiment result of system

式(24)算得 20 组图像的均方根误差 e_{rms} 均等于 0,可见 SDRAM 控制器可以稳定可靠的工作。另外,笔者为了测试纠错算法性能加入了不同错误数的单粒子翻转事件,并采用式(24)计算得到图像数码值错误数小于等于 191 bit 时,两种纠错算法的 e_{rms} 均为 0;错误数等于 191 bit 时,(16,8)纠错编码算法的平均 e_{rms} 为 5.34×10^{-6} ;错误数大于 191 bit 时,随着错误数增多 e_{rms} 逐渐增大。可见。本文提出的(16,8)纠错算法可以大幅度地提高光纤传输系统的可靠性。

4.4 纠错编码算法编码器性能分析

本文提出的(16,8)纠错编码算法与目前最常用的光纤通信的 FEC 纠错方法^[12-14]的纠错能力比较如表 3 所示。

表 3 纠错能力比较

Tab. 3 Comparison of error correction

范围	RS(255,239)	BCH(4359,4320)	本文方法
3043B	104b	21b	191b

本文设计的(16,8)纠错编码器占用资源如表 4 所示,其远小于常用纠错算法的编码器如 RS、BCH、Turb、LDPC 以及级联码等^[15-17]。

表 4 纠错能力比较

Tab. 4 Comparison of error correction

方法	占用 LUT	占用 BRAM
(16,8)编码器	320/38 784(1%)	1/192 (1%)

由表 3 和表 4 可知文本提出的(16,8)纠错编码算法不仅纠错能力强,且编码器占用资源少。另外 RS 码和 BCH 码纠错算法的译码器远比编码器复杂^[15-19],硬件实现复杂且占用资源较大,而本文不需要译码器,在接收端只需生成新的校验码,然后将发送校验码和接收校验码异或运算即可检测和纠正错误,硬件实现简单、占用资源小、速度快,非常适合大视场空间相机的应用。

5 结 论

本文针对目前高速图像最新传输方法-G 比特光纤传输中缺少纠错算法导致图像数据传输不可靠问题,提出了一种适合于空间高速多通道 CCD 图像传

输纠错编码算法和实现该算法的编码器电路。该纠错算法不需复杂的译码单元,采用一种分别计算发送和接收校验码,通过运算两种校验码来进行检测错误和纠正错误,使得编码器实现简单、占用资源少、纠错能力强,同时没有增加空间相机其他模块的设计难度,解决了传统纠错算法实现的复杂问题。最后,该算法在一空间多光谱相机样机的成像系统平台进行了试验验证。结果表明,(16,8)纠错编码控制器工作时钟能够达到串化器并行工作时钟 122 MHz,纠错算法在 3 043 Byte 内可以纠正的错误数达到 191 bit,当错误数为 191 bit 时,均方根误差很低,为 5.34×10^{-6} 。该算法提高了空间相机中的图像数据光纤传输的可靠性,为空间相机的图像数据可靠传输提供了一种很好的解决方案。

参考文献:

- [1] 贾福娟,吴雁林,黄颖,等. 环境减灾-1A、1B 卫星宽覆盖多光谱 CCD 相机技术[J]. 航天器工程, 2009, 18(6): 37-42.
JIA F J, WU Y L, HUANG Y, *et al.*. Design and on-orbit application of CCD camera on HJ-1A/1B satellites[J]. *Spacecraft Engineering*, 2009, 18(6): 37-42. (in Chinese)
- [2] 田宝凤,徐抒岩,孙荣春,等. 一种适合星上应用的遥感图像有损压缩算法[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 725-730.
TIAN B F, XU SH Y, SUN R CH, *et al.*. A lossy compression algorithm of remote sensing image suited to space borne application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 725-730. (in Chinese)
- [3] 王磊,吴家骥,白静. 基于整型可逆时域交叠变换的遥感图像压缩[J]. 光子学报, 2010, 39(12): 2251-2256.
WANG L, WU J J, BAI J. Remote sensing image compression based on reversible integer time domain lapped transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(12): 2251-2256. (in Chinese)
- [4] 薛旭成,石俊霞,吕恒毅,等. 空间遥感相机 TDICCD 积分级数和增益的优化设置[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 857-863.
XUE X C, SHI J X, LU H Y, *et al.*. Optimal set of TDI CCD integration stages and gains of space remote sensing cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 857-863. (in Chinese)
- [5] 张达,徐抒岩. 高速 CCD 图像数据光纤传输系统[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 669-675.
ZHANG D, XU SH Y. High-speed CCD image data fiber transmission system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 669-675. (in Chinese)
- [6] 韩红霞,司国良,曹立华,等. 光电跟踪设备数字视频图像信息光纤传输系统设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1219-1225.
HAN H X, SI G L, CAO L H, *et al.*. Design of digital video signal fiber transmission system in optic-electronic tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1219-1225. (in Chinese)
- [7] 王洋,郑斌. 基于光纤的红外图像高速远距离传输[J]. 激光与红外, 2011, 41(4): 462-465.
WANG Y, ZHENG B. Research on high-speed and far-distance transmission of infrared image based on fiber[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(4): 462-465. (in Chinese)
- [8] 黄新栋,赵佳. 大视场线扫红外图像的高速传输系统[J]. 红外技术, 2010, 431(1): 37-40.
HUANG X D, ZHAO J. High-speed transmission system of wide-field-of-view IR Image [J]. *Infrared Technology*, 2010, 431(1): 37-40. (in Chinese)
- [9] MELLO D, OFFER E, EICHERT J. Error arrival statistics for FEC design in four-wave mixing limited systems [C]. *Optical Fiber Communications Conference*, 2003: 529-530.
- [10] AGRAWAL G P. *Fiber-Optical Communication Systems* [M]. 2nd ed. John Wiley & sons, Inc., 1997.
- [11] CAI Y, PILIPETSKIIA, LUCERO A, *et al.*. On channel models for predicting soft-decision error-correction performance in optically amplified systems [C]. *Optical Fiber Communications Conference*, 2003: 532-533.

- [12] 夏杨. 光纤通信系统中的前向纠错技术[J]. 山东通信技术, 2005, 25(1): 30-32.
XIA Y. Forward error-correction coding techniques in fiber optical communication [J]. *Shandong Communication Technology*, 2005, 25(1): 30-32. (in Chinese)
- [13] 梁钊. 长距离高速光纤通信系统中的前向纠错技术[J]. 光纤传输, 2004, 11(1): 50-53.
LIANG Z. Forward error-correction coding techniques in high speed long haul fiber optical communication [J]. *Fiber Communication*, 2004, 11(1): 50-53. (in Chinese)
- [14] 许勃, 邱昆. 光纤通信中序列估计与纠错译码的级联的研究[J]. 光子·激光, 2009, 20(2): 187-192.
XU B, QIU K. Study on concatenation of sequence estimation and error correction in fiber optic communication [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, 20(2): 187-192. (in Chinese)
- [15] 赵景琰, 金鹰翰, 赵培, 等. 并行化的 BCH 编解码器设计[J]. 微处理机, 2010, 4(2): 42-48.
ZHAO J Y, JIN Y H, ZHAO P, *et al.*. The design of parallelized BCH codec [J]. *Microprocessors*, 2010, 4(2): 42-48. (in Chinese)
- [16] 袁建国, 王望, 梁天宇, 等. 光通信系统中一种新颖 LDPC 码构造方法的研究[J]. 半导体光电, 2011, 32(4): 543-546.
YUAN J G, WANG W, LIANG T Y, *et al.*. Novel construction method of LDPC codes in optical communication system [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2011, 32(4): 543-546. (in Chinese)
- [17] 胡立明, 张沁, 胡庆生. 光通信用高速级联码编码器的设计[J]. 光器件, 2010, 32(5): 543-546.
HU L M, ZHANG Q, HU Q SH. Design of high-speed concatenated codec for fiber communication [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2011, 32(4): 543-546. (in Chinese)
- [18] HU Q SH, WANG ZH G, ZHANG J, *et al.*. Area optimization of parallel Chien search architecture for Reed-Solomon(255, 239) decoder [J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2006, 22(1): 5-10.
- [19] 李霞, 王正彦. 基于 FPGA 的 Turbo 码译码器的设计[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(2): 201-206.
LI X, WANG ZH Y. Design of the turbo decoder with FPGA [J]. *Information and electronic engineering*, 2010, 8(2): 201-206. (in Chinese)

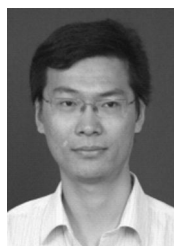
作者简介:



李进(1984—),男,内蒙包头人,2008年于中国地质大学(武汉)获得工学学士学位,主要从事光电成像和图像压缩存储技术方面的研究。E-mail: 664910699@qq.com



吕增明(1978—),男,吉林长春人,助理研究员,2001年于吉林大学获得学士学位,主要从事空间相机方面的研究。E-mail: lzm232@163.com



陶宏江(1981—),男,黑龙江哈尔滨人,助理研究员,2003年、2005年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事嵌入式及图像压缩,数字图像处理方面的研究。E-mail: hjtao_ogg@yahoo.com.cn



李新娥(1976—),女,河南南阳人,博士研究生,助理研究员,主要从事遥感图像处理方面的研究。E-mail: amylxe@sohu.com

导师简介:



金龙旭(1965—),男,吉林延吉人,研究员,博士生导师,2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事为空间相机智能控制技术方面的研究。E-mail: jinlx@ciomp.ac.cn