

# 基于 RS 码的某运载火箭图像测量系统设计及实现

李芳培<sup>1</sup>, 荣为君<sup>1</sup>, 袁承宗<sup>2</sup>, 庄玮<sup>2</sup>

(1. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109; 2. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

**摘要:** 为了更加直观地观察某型号运载火箭一二级级间分离、二级发动机工况、整流罩分离、星箭分离等重要动作及关键信息, 更好的掌握火箭飞行过程中产品性能, 提高产品可靠性, 给出了一种基于 RS 纠错码的图像测量系统设计方案; RS 码在信道传输过程中能有效纠正突发错误和随机错误, 提高信号增益, 改善射频信号通信质量; 文中阐述了 RS 纠错码算法理论演算过程, 根据现有遥测信道容量, 设计出 16 字节的纠错码, 除去 12 字节的子帧同步码和子帧计数, 构造出 RS 码 (184, 168); 给出实现该方案的原理架构, 详细介绍了摄像机和图像压缩编码器硬件设计工作原理及嵌入式软件设计的架构及流程图; 飞行试验结果表明, 经过 RS 编码后的图像测量系统可以有效的解决图像画面马赛克、花屏、卡顿现象, 全程画面清晰、流畅。

**关键词:** RS 码; 火箭; 图像

## Design and Implementation of a Launch Vehicle Image Measurement System Based on RS Code

Li Fangpei<sup>1</sup>, Rong Weijun<sup>1</sup>, Yuan Chengzong<sup>2</sup>, Zhuang Wei<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Aerospace System Engineering, Shanghai 201109, China; 2. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** In order to more intuitively observe the important actions and key information such as one or two stages separation of a carrier rocket, two stage engine condition, the separation of the fairing, the separation of the star and the key of the rocket, we can better master the product performance and improve the product reliability during the flight of the rocket, and give a design of the image measurement system based on the RS error correcting code. RS code can effectively correct burst errors and random errors in channel transmission, improve signal gain and improve RF signal communication quality. In this paper, the algorithm of RS error correcting code algorithm is described. According to the existing telemetry channel capacity, a 16 byte error correcting code is designed, and the RS code (184, 168) is constructed by removing 12 byte sub frame synchronization code and sub frame count. The principle architecture of the scheme is given. The principle of the hardware design of the camera and the image compression encoder, the architecture and flow chart of the embedded software design are introduced in detail. The flight test results show that the image measurement system coded by RS can effectively solve the mosaic, flower screen and carton phenomenon of the image, and the whole course picture is clear and fluent.

**Keywords:** Reed-Solomon code; launch vehicle; image

## 0 引言

近几年, 中国运载火箭迎来高密度发射期, 为更好的掌握火箭飞行试验过程的状态信息, 深入了解产品性能, 提高产品的可靠性, 丰富传统测试手段, 伴随 5 Mbps、10 Mbps 以及更高码率传输体制<sup>[1-2]</sup>的应用为基础, 图像视频测量技术越来越多的被使用。

测试场地的变化、发射卫星不同、飞行过程中火焰扰动等干扰因素的存在, 可能造成图像信道误码, 地面解调时出现马赛克、花屏、卡顿的现象。给出一种基于 RS 码的图像测量系统设计方案, 能有效改善信道误码、提高信道

增益<sup>[3-4]</sup>, 有效提高图像画质质量。

## 1 RS 码时域编码方法

对于 RS ( $n, K$ ) 码, 假定:

待编码的信息码矢  $M$  为:

$$M = [M_{k-1} M_{k-2} \cdots M_1 M_0] \quad (1)$$

即信息多项式  $M(x)$  为:

$$M(x) = M_{k-1} x^{k-1} + M_{k-2} x^{k-2} + \cdots + M_1 x + M_0 \quad (2)$$

RS 码的码组矢量  $C$  为:

$$C = [C_{k-1} C_{k-2} \cdots C_1 C_0] \quad (3)$$

即码字多项式  $C(x)$  为:

$C(x) = C_{k-1} x^{k-1} + C_{k-2} x^{k-2} + \cdots + C_1 x + C_0$  同时, 已知 RS 码的生产多项式  $g(x)$  为:

$$g(x) = \prod (x - \alpha^i) = (x - \alpha)(x - \alpha^2) \cdots (x - \alpha^{2t}) \quad (4)$$

收稿日期: 2018-04-06; 修回日期: 2018-05-07。

作者简介: 李芳培(1983-), 男, 河南信阳人, 工程师, 主要从事运载火箭遥测系统设计方向的研究。

编码时，用  $x^{n-k}M(x)$  除以  $g(x)$ ，所得余数  $r(x)$  是校验多项式，将  $r(x)$  置于信息多项式  $M(x)$  之后，就形成 RS 码，由 4 所示。

$$C(x) = x^{n-k}M(x) + r(x) = x^{n-k}M(x) + x^{n-k}M(x) \bmod(g(x)) \quad (5)$$

式中， $r(x) = x^{n-k}M(x) \bmod(g(x)) =$

$$r_{n-k-1}x^{n-k-1} + r_{n-k-2}x^{n-k-2} + \dots + r_1x + r_0$$

RS 码为：

$$C = [C_{n-1}C_{n-2} \dots C_1C_0] = [M_{k-1}M_{k-2} \dots M_0 r_{n-k-1}r_{n-k-2} \dots r_0] \quad (6)$$

其中信息位为前  $k$  位，校验位为后  $n-k$  位，这个算法为 RS 码的时域编码算法<sup>[5-8]</sup>，步骤可以归纳为：

- 1) 用  $x^{n-k}$  乘以信息多项式  $M(x)$ ，得到  $x^{n-k}M(x)$ ；
- 2) 用  $x^{n-k}M(x)$  除以生成多项式  $g(x)$ ，取其 余 式，得到校验多项式  $r(x)$ ；
- 3) 联合信息多项式  $M(x)$  和校验多项式  $r(x)$ ，得到码字多项式  $C(x)$ 。

图像测量系统码流格式除去子帧同步码和子帧计数，一个子帧有效数据为 184 byte，校验长度选择 16 byte，采用 RS (184, 168) 格式进行编码，信道利用率可达到 91%，满足图像传输要求。

## 2 图像测量系统设计

图像测量系统用于监测火箭飞行过程中的关键事件，由摄像机、图像压缩编码器、发射机、天线、电池、配电器等组成。图像压缩编码器将摄像头送入的图像数据进行数据采集压缩、RS 编码、数据综合编帧形成 PCM 码流，通过发射机调制后，由天线进行信号发射下传。图像测量系统原理框图如图 1 所示。

图像测量系统采用 S 波段点频，PCM-FM 调制体制。文中将对摄像机和图像压缩编码器设计原理进行介绍，传统遥测传输体制设计不做过多阐述。

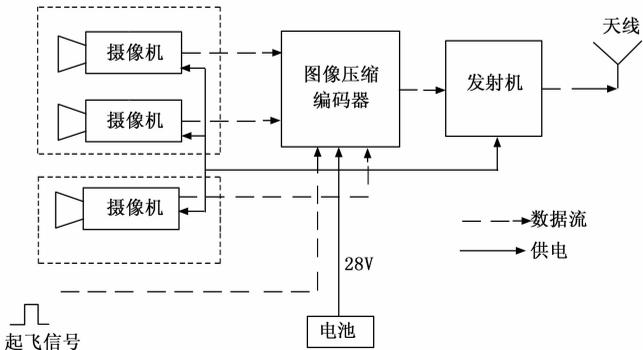


图 1 图像测量系统原理框图

### 2.1 摄像机

摄像机分为两个模块，包括光学部分和电学部分。摄像机可实现了图像采集、数据输出等功能，为了满足系统对摄像装置体积小及重量轻的要求，摄像机选用了集成度

较高且焦面尺寸较小的感光元件作为 sensor，sensor 自身集成了复合视频输出接口，其与图像编码器之间只有供电线路及复合视频接口。其原理框图如图 2 所示。

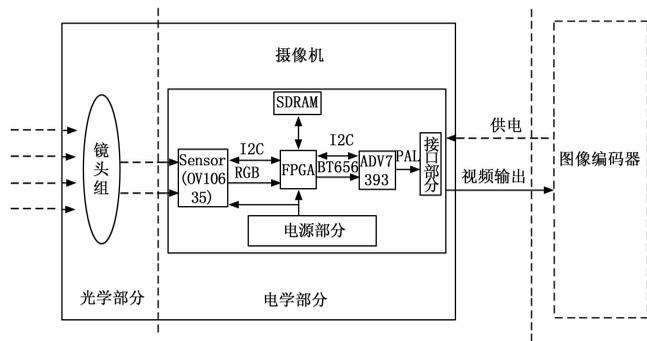


图 2 摄像机原理框图

#### 2.1.1 光学部分

光学系统共 9 片透镜，第一片透镜的通光口径最大，为  $\varphi 13.2$  mm。从镜头第一面到最后一面的长度为 42 mm，后工作距离为 2 mm，总长（第一面中心到像面）为 45 mm。单片透镜平均透过率达到 97.6%，光学系统的透过率为  $0.976^9 = 80.3\%$ 。

光学系统采用了无热设计，在  $-40 \sim 60$  °C 温度区间内全视场全波段范围内畸变  $\leq 1.2\%$ （全视场）。在  $-40 \sim 60$  °C 范围内，0.7 归一化视场与中心视场的相对照度 20 °C 时为 93.3%、 $-15$  °C 时为 93.2%、50 °C 时为 93.4%，差别很小且一致性较好；定焦面 0.2 m，0.7 视场 75 lp/mm 时传递函数值均在 0.45 以上，全视场 75 lp/mm 时传递函数值均在 0.35 以上；定焦面 0.4 m，0.7 视场 85 lp/mm 时传递函数值均在 0.5 以上，全视场 85 lp/mm 时传递函数值均在 0.38 以上；定焦面 1 m，0.7 视场 70 lp/mm 时传递函数值均在 0.5 以上，全视场 70 lp/mm 时传递函数值均在 0.28 以上；定焦面 10 m，0.7 视场 60 lp/mm 时传递函数值均在 0.5 以上，全视场 60 lp/mm 时传递函数值均在 0.38 以上；定焦面 50 m，0.7 视场 60 lp/mm 时传递函数值均在 0.5 以上，全视场 60 lp/mm 时传递函数值均在 0.38 以上。摄像机摄像距离最短可到 0.2 m，最远不小于 50 m。线对数 85 lp/mm，0.7 视场传递函数可达到  $\geq 0.4$ 、全视场传递函数  $\geq 0.3$ 。

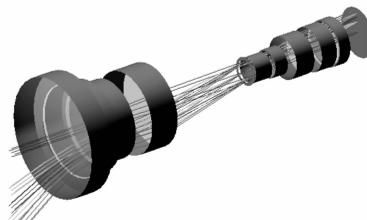


图 3 光学部分布局图

#### 2.1.2 电学部分

摄像机采用光学、电子学系统、结构一体化的设计形

式, 使用 Omnivision 公司 OV10635 的 CMOS 传感器作为感光元件, 该传感器是将图像预处理功能集成于一片 SOC 上的集成电路。摄像机电学部分由一块印制板构成, 主要包含一个 CMOS sensor、一片视频运放、晶振、一片 FPGA、一片 ADV7393 及两个 LDO 等器件组成, 它完成传感器的图像成像及输出、驱动的功能。CMOS sensor 在通过 FPGA 控制配置相应寄存器的控制下完成图像数据采集、预处理等功能, 并输出 RGB 格式的信号, FPGA 再将此 RGB 格式的信号转换成 BT656/SDI 格式的图像数据, 最终由 ADV7393/GV7600 输出标准 PAL-D 制式的图像数据。两个 LDO 则用于将输入的 +5 V 供电转换为器件工作所需的 +3.3 V 和 +1.5 V 工作电压, 通过一个一体化接插件实现对外的输入输出接口。摄像机的电原理框图如图 4 所示。

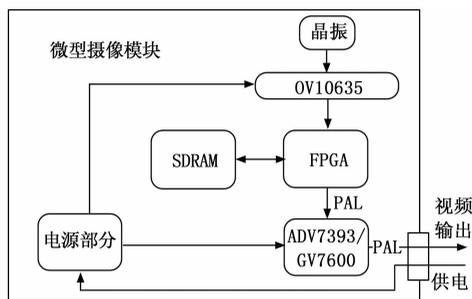


图 4 摄像机电原理框图

CMOS sensor 选择 OminiVision 公司的 OV10635 芯片, 这是一款像元尺寸 6  $\mu\text{m}$ , 像元数 1 280 $\times$ 720 的 CMOS 图像传感器作为光电转换芯片。该 CMOS 图像传感器将图像的成像、预处理、3A 控制等功能整合在一个片上系统中, 这样可以极大地减小单机尺寸、功耗及 sensor 外围信号处理电路设计的复杂度; 并且该芯片动态范围宽、灵敏度高、工作方式灵活, 可直接输出 PAL 制复合视频信号。该芯片集成了 CMOS sensor、微处理器, 用于实现自动曝光、自动增益控制、自动白平衡等算法, 具备图像自动修正、降噪和增强功能。快门类型为电子卷帘快门, 数据输出采用 SCCB (兼容 I2C 总线) 串行总线接口, 通过改变 CMOS 传感器内部寄存器的设定值可以对传感器的电子增益、像素积分时间、传感器曝光时间、输出图像大小、输出图像位置和图像输出帧率分别进行控制。

## 2.2 图像压缩编码器

图像压缩编码器接收摄像机输出的标清 PAL 制或高清 SDI 视频信号, 对该信号进行 AD 转换后以一定格式的数字信号输出, DSP 完成图像数据的编码及输出, FPGA 完成 RS 编码和图像数据组帧, 由此实现动态视频的纠错压缩编码功能。图像压缩编码器原理框图如图 5 所示。

### 2.2.1 信号处理硬件

图像压缩编码器主要完成复合视频选通及 A/D 变换、动态视频的 H. 264 编码、RS 编码、数据组帧等功能。其数

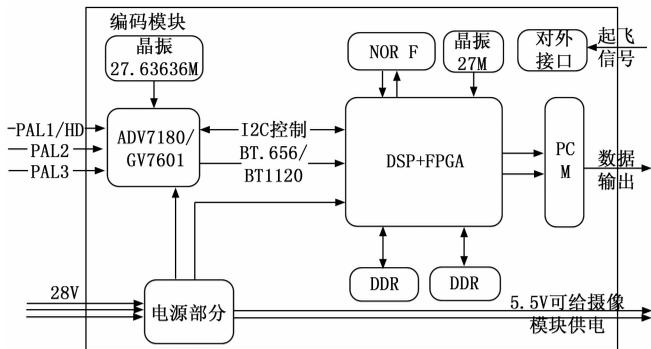


图 5 图像压缩编码器原理框图

据流图如图 6 所示。

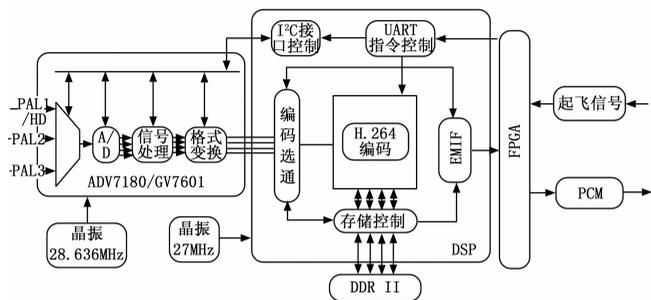


图 6 图像压缩编码器数据流图

图像压缩编码器接收摄像机输出的复合视频模拟信号, 在进入 DSP 编码前需要对该模拟信号进行 A/D 转换。同时转换后的数字信号必须是 H. 264 压缩编码所规定数字视频码流, 所以对于 A/D 后的数据还需要进行相应数字视频帧格式化处理。

复合视频 A/D 转换及数字视频帧格式处理选用 ADV7180 芯片实现。对于外部输入的模拟视频, 可以自动识别 NTSC 制式、PAL 制式, 并将此标准的模拟基带视频信号转换成符合 ITU-R BT656 接口标准的 4: 2: 2 的分量视频数字信号。主要由前端数据选通和 A/D 转换部分、数据处理部分及数据输出部分组成, DSP 通过 I2C 接口实现对 ADV7180 的寄存器控制。模拟信号通过滤波器后进行选通, 将选通后的模拟视频信号送入 ADC, 再由 ADC 将模拟视频信号转换成数字信号; 该数字信号进入信号处理部分, 自动进行色调、色饱和度和亮度调整并进行亮色分离; 最后通过数据输出部分将经过处理的数字信号进行相应的格式变换, 产生符合 BT. 656 格式的视频数据。通过缓冲区后在 P7-P0 口进行输出。

图像数据编码由 DSP 完成, 选用 TI 公司 C6000 系列的 DSP6467。该 DSP 可以完成对 ADV7180 的寄存器访问控制、图像数据编码及数据输出等一系列功能。带有视频处理子系统 Video Processing Subsystem (VPSS), 包括两路用于视频采集的 VPIF 输入。图像数据编码采用 H. 264 编码算法, H. 264 具有比以前各种标准更好的压缩效率, 可使传输带宽降低到原来的 1/4。H. 264 编码在帧内预测编

码、帧间预测编码、隔行编码、变换编码、去块效应滤波、系数扫描方式、熵编码、差错恢复工具等方面都进行极大改进，有效提高编码效率。H.264 支持 YUV 4:2:0 格式、YUV 4:2:2 格式的数据输入。设计中采用 YUV 4:2:2 格式图像输入格式。

DSP 实现动态图像压缩功能，通过调用 FPGA 内的各子模块完成与外部信号的接口连接，读取压缩图像数据，进行 RS 编码，完成图像数据组帧的功能，输出 PCM 流到发射机。

### 2.2.2 软件设计

软件结构图如图 7~8 所示。

图像压缩编码器中 DSP 软件主要完成视频 AD 转换芯片 ADV7180 送出的 BT656 格式的视频输出，调用 H.264 视频编码库完成视频压缩编码，完成后送 FPGA。另外接收遥控指令，进行动态压缩编码切换。主要包括复合视频 AD 转换模块、初始化控制程序模块、视频编码模块。

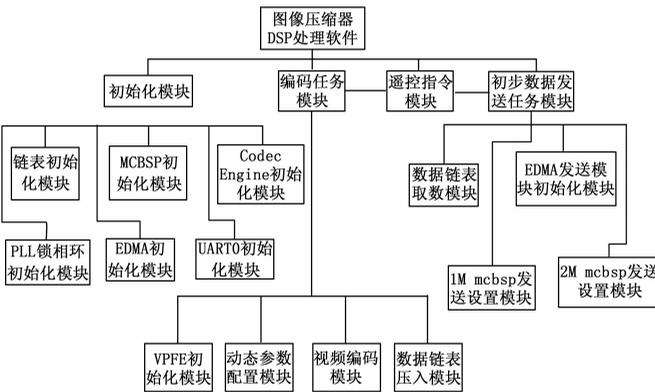


图 7 图像压缩编码器 DSP 软件结构图

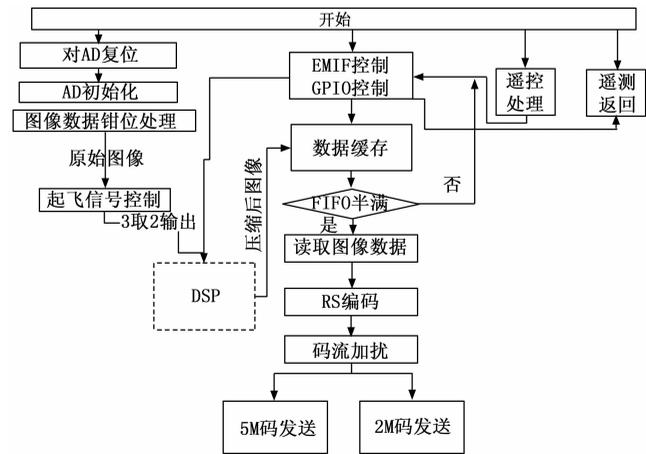


图 8 图像压缩编码器 FPGA 软件流程图

图像压缩编码器 FPGA 软件主要完成整个系统与外部信号的接口控制、RS 编码、数据编帧。FPGA 作为系统的协处理器，对 DSP 和其他器件进行复位，对 DSP 程序进行控制，按照传输协议对 DSP 编码数据进行采集，按照中心程序单元时钟要求对图像编码数据进行传输。

### 3 试验结果与分析

图像测量系统参加运载火箭总装总测厂房某型号 Y47 火箭全箭集成综合试验以验证系统的有效性。集成综合试验是运载火箭出厂前箭上和地面各个电气系统的一次大型匹配试验。地面采用一体化测发控系统进行测试，箭上参试系统包括控制、推进剂利用、遥测（含图像测量系统）、外测安全和动力（姿控发动机）系统。图像测量系统参加此试验，可验证图像测量系统与遥测系统等箭上产品之间工作的正确性、协调性和匹配性；验证图像测量系统箭上设备工作的正确性、协调性和匹配性；验证图像地面解码设备软解及硬解解调画面的正确性和有效性；检查图像测量系统与其他系统的同时工作的干扰情况。

图像系统箭上设备：摄像机、图像压缩编码器、发射机、天线及设备间的连接电缆，按照箭上设备安装要求安装到箭体各个舱段。图像地面测试设备：接收天线、低噪声功率放大器、天线驱动机构、接收机、遥测解码计算机、以太网交换机、图像地面解码设备、视频显示器，固定摆放在厂房设备测试间。图像测量系统的加电时间、顺序依据电气系统总测试流程进行，按照控制系统、推进剂利用系统、外侧安全系统、遥测系统（含图像测量系统）依次加电，进行模拟发射程序验证。图像测量系统加电后，地面接收天线接收箭上射频设备下传的无线信号，经馈源、低噪声功率放大器、功分器、自动增益控制、接收机、视频综合处理单元、遥测地面处理软件，将图像全帧数据挑好后通过以太网交换机以 UDP 方式传送给图像地面解码设备。图像地面解码设备有两种解码方式，分别为软件解码和硬件解码。图像地面解码设备接收到遥测地面处理软件转发的全帧数据，一部分送到硬件解调卡，解调出 2 路 PAL 制式信号，传送到支持 PAL-D 格式的标清显示器实时显示采集图像，未启动前显示标准彩条自检信号；一部分通过软件进行解码，利用 H.264 图像压缩编码算法以及 RS 交错码原理进行解调处理，实时显示采集画面。

图 9 显示解码画面为未进行 RS 编码的测试画面，左边为硬件解码显示器显示画面、右边为软件解码显示画面。整个试验期间，硬件解码画面多次出现花屏、软件解码画面多次出现马赛克、卡顿现象，监测图像点频数据无线信号频谱特性，信号增益较差，调整天线方位无改善，查看源码数据，帧同步错位较多，导致图像压缩编码算法帧内预



图 9 无 RS 编码的集成综合试验测试画面