doi:10.11887/j.cn.201402009 http://journal.nudt.edu.cn

探空火箭图像采集与压缩系统的研究与实现*

陈 萍[1,2],王林林[1],陈志敏[1],姜秀杰[1],熊蔚明[1]
(1.中国科学院 空间科学与应用研究中心,北京 100190;2.中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:针对探空火箭的应用要求,研究并实现了一种多路实时图像采集和压缩系统,介绍了系统实现的方案以及采用的两种关键技术。系统采用了基于ARM和FPGA的嵌入式系统架构,以专用的压缩芯片作为图像处理单元,通过采用提高摄像头分时复用的可靠性和优化压缩比控制方案两条技术途径,解决了图像低功耗、实时压缩等问题。系统电路结构精简,集成度高,灵活性强。实际测试表明:系统性能可靠,具有轻小型、低成本、低功耗等特点,在空间环境垂直探测实验中,系统拍摄到火箭箭头与发动机分离、电场探测伸杆展开等重要画面,使用边缘强度评价法对所得图像进行质量评价,图像清晰度满足科学研究与工程应用的需要。

关键词:探空火箭;图像压缩;小波变换
中图分类号:TP752 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2014)02-0047-06

Study and implementation of sounding-rocket picture capture and compression system

CHEN Ping[1,2], *WANG Linlin*[1], *CHEN Zhimin*[1], *JIANG Xiujie*[1], *XIONG Weiming*[1]
(1. Center for Space Science and Applied Research of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As is required by sounding rocket utilization, a real-time multi-channel picture capture and compression system applied in sounding rocket is studied and realized in the study, which introduces two key techniques applied in the system. The system bases its architecture on ARM and FPGA, and adopts a dedicated video-compression chip as the core processing unit. By way of improving the reliability of time division multiplexing of cameras and optimizing the control schemes of compression ratio, the system satisfies the requirement of low power consumption and high compression ratio in sounding rockets. It has compact circuit framework, high integration level and great flexibility. Practical tests show that, the system has some good features, such as being light-small, low-power, and low-cost. In the experiment named Space Environment Vertical Exploration, the system shot important scenes, including the separation of rocket head and engine, as well as the deployment of electric field detection boom. By adoption of contour volume evaluation methods, it is concluded that the pictures shot during the flight have sufficient definition for scientific research and engineer application.

Key words: sounding rocket; picture compression; wavelet transform

2013年4月5日,我国空间环境垂直探测试验及首次空间科学主动试验取得圆满成功,火箭飞行的顶点高度达到191km。试验的成功,为研究空间环境主要物理参数在不同高度上的垂直分布提供原位探测数据,从而对低纬度空间环境垂直分布特征开展进一步研究。

在这次试验中,搭载了图像采集和压缩系统。它的主要任务是:

(1)拍摄飞行过程中有效载荷的关键动作;

(2)拍摄飞行过程中运载火箭的关键事件;

(3)在低码率下获取高质量图像,确保在无线信道允许带宽范围内传输图像数据。

与其他遥测信息相比,图像信息具有直观、具体、信息量大等优点而成为获取有效载荷、火箭状态信息时不可替代的手段[1]。搭载在航天飞行器上的空间图像采集设备往往采用价格昂贵的宇航级器件,特别是在特殊元件的采购上,还常常受到国外出口的限制。图像压缩方案最广泛的是采用FPGA或DSP来实现专门的算法[2-3]。但基于FPGA或DSP实现的一些空间摄像机功耗甚至达到8W[4],不适用于探空火箭低功耗的要求。而现有的图像压缩技术已经在一些专用的ASIC芯片上得到了很好的实现,而且随着微电子技术的飞速发展及空间任务对高性能需求的日益增强,

* **收稿日期**:2013-06-19
基金项目:国家863计划资助项目(2011AA7033045)
作者简介:陈萍(1983—),女,山西阳泉人,助理研究员,博士研究生,E-mail:chenping@nssc.ac.cn

工业级元器件在空间的应用成为可能。因此,本文所述的系统利用工业级元器件研制,利用FPGA现场编程的功能以及并行分布流水线处理的特点,结合ARM微处理器在控制方面的优势,采用FPGA + ARM + ASIC的实现方式,是我国首套成功应用于190km以上探空火箭飞行试验的图像采集与压缩系统。

1　Mallat分解算法

为了实现在低码率下获得高质量的图像,需要进行图像压缩,从而减小传输信道带宽,降低存储容量,减少传输时间[5]。空间数据系统咨询委员会(CCSDS)于2005年发布的星载图像压缩标准CCSDS 122.0 - B - 1中推荐采用三级二维离散小波变换,浮点和整数小波变换均采用双正交(9, 7)小波[6]。基于此,本文对图像的实时压缩采用了双正交(9, 7)小波变换方法。这是一种左右对称的小波,适合应用于快速小波算法[7]。在本系统中,小波压缩采用了专用的ASIC芯片——ADV612实现,它内部的小波变换采用双正交9 -7小波基,采用Mallat算法进行小波图像分解。

Mallat算法是一种塔式多分辨率分解和重构算法,有显著的去相关和能量集中的作用。Mallat算法对二维图像信号的分解[8]如式(1)所示。其中 H_r 和 H_c 分别代表用尺度滤波器系数对阵列 $\{C_{k,l}\}_{(k,l)\in Z^2}$ 的行和列作用的算子,G_r 和 G_c 分别表示用小波滤波器系数对行和列作用的算子。

$$\begin{cases} C_{j+1} = H_r H_c C_j \\ D^1_{j+1} = G_r H_c C_j \\ D^2_{j+1} = H_r G_c C_j \\ D^3_{j+1} = G_r G_c C_j \end{cases} \quad j = 0, 1, \cdots, J \qquad (1)$$

利用Mallat算法可以对图像进行分解。比如对一场图像的亮度分量(Y分量)进行分解,得到图1所示的结果,共有14个Mallat子块,颜色越深的块频率越高,量化程度也越高。对蓝色色度分量(Cb分量)、红色色度分量(Cr分量)分别进行5层小波滤波,则Y、Cb、Cr三个分量共得到42个不同的Mallat子块,每个块对应一个量化步长。量化根据人眼的视觉特性进行,通过对滤波后的信息进行量化,就能在不影响视觉感受的情况下,实现图像压缩。

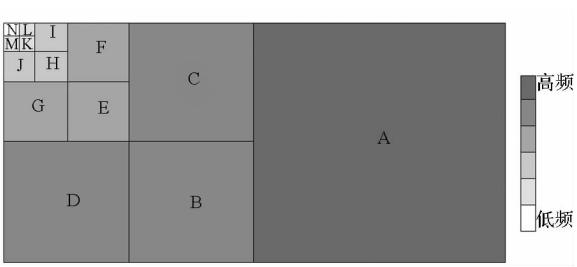


图1　Y分量的Mallat分解结果

Fig. 1　The resultant Mallat blocks of single component

2　箭载图像压缩方案设计

箭载图像实时压缩系统的FPGA选用Xilinx公司的40万门级芯片XC3S400,完成数据缓冲、传输等功能;ARM选用Philips公司的LPC2214实现外围芯片控制、处理图像数据、数据打包和通信等功能。

图像采集和压缩系统的功能框图如图2所示,包括3个箭载摄像头和1块图像处理板。其中摄像头采用低功耗摄像头,单个功耗 <1W。图像处理板包括以下4个部分,最大实时压缩和处理能力为每秒25帧图像:

(1)图像视频解码单元。采集到的视频进行预处理(滤波、增益控制、亮度、色度调整)并按照ITU - RBT.656的标准进行图像编码,该单元采用了Philips公司的工业级芯片SAF7113H。视频解码单元与图像压缩单元之间通过8位视频数据线VPO总线发送数据。

(2)图像压缩单元。对收到的图像数据以场为单位进行小波变换和滤波、自适应量化和熵编码,该部分采用专用图像压缩芯片ADV612,理论上,它支持4:1 ~7500:1的压缩比,结合实际需要,把范围限制在10:1 ~200:1。

(3)中央控制单元。完成对视频解码单元、压缩单元的初始化,读取压缩后的图像数据,按照协议格式打包并发送至FPGA,控制图像采集模块进行摄像头的切换。

中央控制单元采用LPC2214,这是一款基于32位ARM7TDMI - S™CPU的微控制器,在其上移植了嵌入式实时操作系统μC/OS - II,以保证对图像数据的实时处理。μC/OS - II操作系统在2000年得到了美国航空航天管理局(FAA)的对用于商用飞机的、符合RTCA DO - 178B标准的认证,表明μC/OS - II具有足够的安全性和稳定性,可以用于航空航天设备[9]。

(4)数据传输单元。对获得的压缩图像数据缓存,转换成同步422总线数据进行传输,数据在时钟的上升沿串行地发送出去。数据传输单元还将喂狗信号发送给看门狗,其中,喂狗信号为每秒钟翻转一次的方波信号。

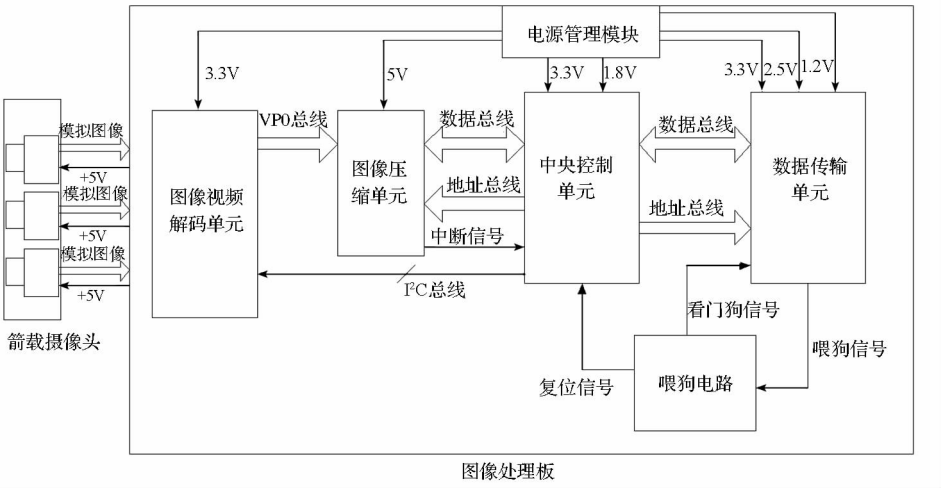


图 2　图像采集和压缩系统功能框图

Fig. 2　Function block diagram of video acquisition and compression system

3　关键技术

探空火箭图像实时压缩的主要技术难点是在低功耗、小型化的前提下,满足实时性和高可靠要求。因此,图像采集和压缩系统不能按照一般的方法在通用设备上设计实现,必须进行适应性改进,本文采取提高摄像头分时复用的可靠性和优化压缩比控制方案两条技术途径,解决了图像低功耗、高可靠、实时压缩的问题。

3.1　多个摄像头分时复用方案

在以往的设计中,一个摄像头对应一个专用的采集和压缩板,这样摄像头拍摄到的图像连续不断地进入采集单元、压缩单元,不需要频繁地中断采集和压缩的过程[10]。而在此次探空火箭试验任务中,一套图像采集和压缩系统包括三个摄像头,分别对应三个输入通道,如何设计出可靠的分时复用方案是要解决的关键问题之一。

摄像头分时复用方案要求每次视频通道切换后,每场图像必须稳定,不能出现丢帧,而且应当具有一定的容错能力,假如当一个摄像头发生故障时,能适应性地调整切换机制,不会发生“死等”现象。摄像头切换的条件是计时时间到或者同一个摄像头连续读取的图像帧数符合预期。每次切换通道,需要完成如图 3 所示流程。首先判断切换条件是否满足,如果条件满足,中央控制单元软复位图像压缩芯片 ADV612,清空其内部的压缩单元缓冲 FIFO,通过 I^2C 总线发送控制指令关掉 VPO 总线,此时图像压缩进程被中断,中央控制单元进行参数配置,更新数据包的摄像头号、摄像头的帧序号等,参数配置完成后,重新使能图像压缩单元,等待输入视频信号锁定后打开 VPO 总线,完成一次摄像头切换。

上述过程中的关键有两点:第一,切换过程中的中断处理;第二,确定合理的切换顺序,特别是设置合理的锁定时间。当一场图像的数据进入 ADV612,状态数据有效后,状态中断(STATSR 中断)由高电平变为低电平,并保持 45 个时钟周期。设计中采用 STATSR 中断的下降沿触发中断,该中断发生后中央控制单元针对当前场计算压缩系数,并写入到 ADV612 的相应寄存器中。ADV612 利用压缩系数对图像数据进行压缩,当它内部的 FIFO 缓冲半满时触发 FIFO 读中断(FIFO_SRQ 中断),中央控制单元读出压缩后的数据。当一场数据中的最后一个将要从 ADV612 中读出时触发场中断(LCODE 中断)。根据 LCODE 中断次数,中央控制单元决定是否进行摄像头切换。中断的处理过程如图 4 所示。

在图 3 所示的流程中,如果在关闭 VPO 总线之前,先对通道进行切换,则很容易出现图像失步。发生图像失步时,有效图像的起始标志(SAV)和有效图像的结束标志(EAV),没有被 ADV612 从 ITU-R BT. 656 格式的码流中正确的提取和识别出来,造成图像没有按照正确顺序排列,出现错位的现象。另外,SAF7113H 对输入视频信号需要一定的锁定时间,信号源强度不同,锁定时间也不同,锁定时间过长会延长整个系统的处理时间,过短则会影响系统的稳定、可靠运行,应当根据信号源设置恰当的锁定时间。

通过采用多个摄像头切换方案,避免使用多个电路板处理多个摄像头,整个系统的功耗减少 2/3,重量减轻 1/3,实现了轻小型、低功耗的需求。

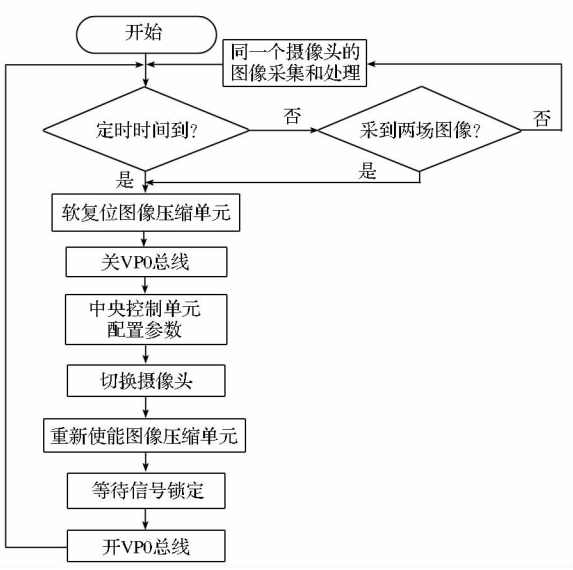


图 3 摄像头切换流程图

Fig. 3 Flow diagram of camera switch

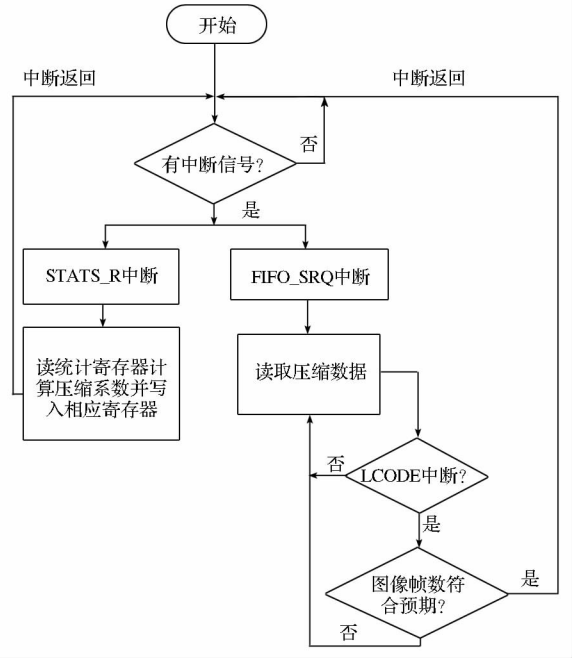


图 4 中断的处理过程

Fig. 4 Interrupt process

3.2 图像压缩比控制方案

在实际应用中,图像数据的内容是不可预测的。导致其压缩倍率很难控制。例如,若一段时间内获取图像的纹理极其复杂,使图像数据的无损压缩倍率很低,则压缩后的数据很可能会超过遥测下行链路带宽,不能准确无误地通过无线信道实时传输。因此,对于图像压缩倍率的控制是一件既困难又十分重要的事情。

ADV612 采用的是标量量化,针对 42 个 Mallat 子块分别进行编码和压缩,这就要求对每个块设置合适的压缩系数,从而使整幅图像对应的比特率 BR(单位:bpp,bit per pixel)与预设值一致,系统中采用了参数反馈压缩比控制方法。根据 ADV612 对每场图像的统计数据,计算出最大、最小的压缩系数,作为迭代计算的初始条件。依据压缩系数计算比特率 BR,如果 BR 不满足要求,则重新计算反馈系数,直到 BR 最终符合预期,这相当于一个搜索长度逐次减半的搜索过程[12]。实现步骤如下:

(1)设期望的比特率 BR 满足:rate0 ≤ BR ≤ rate1;

(2)建立数组 bw_min[42] 和 bw_max[42],分别是 42 个 Mallat 子块的最小和最大压缩系数;

(3)设 tau 代表对图像的压缩程度,tau = 1,压缩程度最高,tau = 0,压缩程度最低;根据公式[11]:bw[bn] = (1.0 − tau) × bw_min[bn] + tau × bw_max[bn]计算 bw[42],即得到 42 个块的初始压缩系数;

(4)compute_bpp(bw)函数是根据压缩系数 bw 和统计数据计算每幅图像比特率的函数;

(5)设 tau_low ≤ tau ≤ tau_high,一般的有,0 ≤ tau ≤ 1,令 tau = tau_high,计算 bw,如果 compute_bpp(bw) < rate0,说明压缩程度过高,令 tau = tau_low,重新计算 bw,如果 compute_bpp(bw) > rate1,说明 tau 值太小,压缩程度不够,

令 tau_mid = (tau_low + tau_high)/2, tau = tau_mid,再次计算 bw,如果 compute_bpp(bw) < rate0, 则 tau_high = tau_mid;如果 compute_bpp(bw) > rate1,则 tau_low = tau_mid。通过迭代运算,找到使 rate0 < compute_bpp(bw) < rate1 的 tau 值及对应的 bw 值,即为所求。

实际运行测试结果为平均每幅图像的 BR 计算时间小于 800μs,较小的 BR 计算时间提高了整个系统压缩的实时性。在计算压缩比时,该方法不需要利用每场图像之间的关系,只根据当前场的图像计算,因而能比较好地实现压缩比的控制,对各种类型的图像也具有普遍通用性。

4 试验结果

4.1 性能测试结果

实际测试表明,整个系统(含 3 个摄像头)的功耗为 4.45W,其中每个摄像头功耗为 0.75W。整个图像采集和压缩系统(含 3 个摄像头)的重量为 740g,实现了轻小型化和低功耗设计。此外,系统全部采用工业级元器件实现,在满足探空火箭工作环境的前提下,有效降低了成本,利于其应用在探空火箭上。

4.2　飞行试验结果

在空间环境垂直探测实验中,图像采集与压缩系统拍摄到了火箭箭头与发动机分离、电场探测伸杆展开等重要画面,如图 5 ~ 8 所示。图 5、图 6 是在不同光照条件下,位于火箭箭头与发动机分离面上的摄像头朝箭头尾部方向的拍摄结果。图 7、图 8 是箭载摄像头在不同光照条件下拍到的电场探测伸杆展开的结果。飞行过程中拍摄图像主观视觉感觉良好,每次摄像头切换时图像质量保持一致,较好地保留了环境纹理和细节,没有出现“块效应”,达到了预期的试验目的,多个摄像头切换方案和图像压缩比控制方案得到了很好的验证。



图 5　火箭头体分离面拍摄情况 1

Fig. 5　Photograph 1 of rocket head and engine separation face



图 6　火箭头体分离面拍摄情况 2

Fig. 6　Photograph 2 of rocket head and engine separation face

为了进一步检验图像压缩质量,需要进行质量评价。由于在飞行环境下,只得到压缩图像,没有原始图像做对比,而且在实际应用中最关心的是图像的清晰度,因此采用了无参考图像的质量评价因子——边缘强度评价因子作为评价依据。边缘强度(Contour Volume,CV)是一幅图像清晰度的测量指标,能够反映图像的清晰程度,该值越



图 7　电场探测伸杆展开拍摄情况 1

Fig. 7　Photograph 1 of the deployment of electric field detection boom



图 8　电场探测伸杆展开拍摄情况 2

Fig. 8　Photograph 2 of the deployment of electric field detection boom

大,说明图像越清晰,反之图像模糊。边缘强度值由式(2)和式(3)得到,使用 3 × 3 的拉普拉斯窗口提取图像边缘,统计图像边缘,求得边缘像素值并对像素值进行绝对值叠加得到边缘强度。其中,N 为图像的像素数。

$$Ft_{cv} = \frac{1}{N}\sum_{over_all_m1}\sum_{over_all_m2} | G(m_1,m_2) | \quad (2)$$

$$G(m_1,m_2) = \sum_{over_all_n_1}\sum_{ver_all_n_2} F(n_1,n_2) \cdot H(m_1 - n_1 + 1, m_2 - n_2 + 1) \quad (3)$$

其中,使用的拉普拉斯算子为:

$$H = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

依据边缘强度的计算方法,文献[13]中得到的结果如图 9 所示,可见,清楚的图像对应的边缘强度值大,模糊的图像的该值较小。通过计算边缘强度,量化了图像的清晰度指标,对图像评价提供了量化的依据。



$Ft_{cv}=53.9$ $Ft_{cv}=24.0$ $Ft_{cv}=16.9$

图9 边缘强度计算示例

Fig. 9 Examples of CV computation

使用边缘强度评价法对图5～图8进行评价，截取图像中感兴趣区域进行计算，结果如表1所示。计算结果体现了图像压缩结果清晰，达到了设计的预期，满足科学研究和工程应用的需要。

表1 边缘强度计算结果(图5～图8)

Tab. 1 Results of CV(Fig. 5 ~ Fig. 8)

序号	边缘强度	评价结果
图5	40.90	好
图6	33.45	好
图7	23.61	良
图8	42.20	好

5 结论

针对探空火箭图像压缩和传输的特点，本文设计了一套完整的方案，解决了传统方法在探空火箭中应用的关键问题，设计实现了探空火箭图像采集和压缩系统，并在空间环境垂直探测试验项目中成功应用。试验结果表明，该系统性能稳定可靠，图像质量符合预期，系统具备高压缩比和实时处理能力，满足箭上设备轻小型化、低功耗的要求。

参考文献(References)

[1] 谌德荣，包国兴，胡宏华，等. 运载火箭飞行状态图像箭上实时压缩技术研究[J]. 系统工程与电子技术，2008，30(11)：2058－2059.
CHEN Derong, BAO Guoxing, HU Honghua, et al. Onboard real-time compression of launch vehicle telemetry images[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(11): 2058－2059. (in Chinese)

[2] 郭永彩，苏渝维，高潮. 基于FPGA的红外图像实时采集系统设计与实现[J]. 仪器仪表学报，2011，32(3)：514－519.
GUO Yongcai, SU Yuwei, GAO Chao. Design and implementation of real time infrared image collection system based on FPGA[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(3): 514－519. (in Chinese)

[3] 杜列波，肖学敏，罗武胜，等. JPEG2000遥感图像实时压缩系统中基于并行机制的“零时间”数据搬移策略[J]. 国防科技大学学报，2008，30(4)：88－93. (in Chinese)
DU Liebo, XIAO Xuemin, LUO Wusheng, et al. No-time spending data moving strategy based on parallel mechanism in JPEG2000 remote sensing image real-time compression system[J]. Journal of National University if Defense Technology, 2008, 30(4): 88－93. (in Chinese)

[4] 程子敬，周孝宽. 星载高速图像数据压缩原理样机的研制[J]. 北京航空航天大学学报，1999，25(6)：743－746.
CHENG Zijing, ZHOU Xiaokuan. Development of the prototype of high speed image compression device for satellite[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999, 25(6): 743－746. (in Chinese)

[5] 刘波，姜宏旭，练有品，等. 机载图像无损/近无损压缩方案及其FPGA实现[J]. 北京航空航天大学学报，2006，32(12)：1443－1446.
LIU Bo, JIANG Hongxu, LIAN Youpin, et al. Scheme design and FPGA implementation of airborne image lossless and near-lossless compression [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(12): 1443－1446. (in Chinese)

[6] CCSDS Recommended Standard for Image Data Compression CCSDS 122.0－B－1[S]. Recommended Standard, Issue 1. Washington, DC, USA, November 2005.

[7] 熊箭. 视频实时小波编码和解码系统的研究[D]. 成都：电子科技大学，2002.
XIONG Jian. Study on real-time video encoding and decoding system based on wavelets [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2002. (in Chinese)

[8] 柯丽. 基于小波变换的空间遥感图像实时压缩方法研究[D]. 长春：中科院长春光机所，2005.
KE Li. Research on remote sensing image real-time compression based on wavelet transform [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2005. (in Chinese)

[9] 拉伯罗斯. 嵌入式实时操作系统 μC/OS－II[M]. 邵贝贝译，2版. 北京：北京航空航天大学出版社，2003：1.
Labrosse J J. MicroC/OS-II the real-time kernel[M]. 2nd ed. Beijing: Beihang University Press, 2003: 1.

[10] 唐垚，曹剑中，李变侠，等. 高分辨率图像采集与压缩系统的设计实现[J]. 科学技术与工程，2005，5(20)：1510－1513.
TANG Yao, CAO Jianzhong, LI Bianxia, et al. The design and realization of still image collection and compression system in high resolution aviatic digital camera[J]. Science Technology and Engineering, 2005, 5(20): 1510－1513. (in Chinese)

[11] Starr D. ADV601 bin width calculation in ADSP－21xx DSP[R]. Analog Devices Application Note 524.

[12] 耿树巧. 雷达视频窄带传输方法研究[D]. 南京：南京信息工程大学，2011.
GENG Shuqiao. Research on transmission of Radar video based on narrow-band method [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2011. (in Chinese)

[13] Yao H Y, Huseh M Y, Yao G L, et al. Image evaluation factors[G]. Image Analysis and Recognition, LNCS 3656, 2005: 255－262.