

# IRST 系统中图像实时 JPEG 压缩技术的实现

祁海军, 凌清, 刘鑫, 岳元  
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要:**针对现有红外搜索跟踪系统数据量大、传输带宽高的问题,结合实际应用背景,提出了有效降低图像传输带宽的方法——JPEG 图像压缩。深入研究了 JPEG 算法,并且详细描述了各个模块的实现方法。进而在 System Generator 中通过图形化语言对 FPGA 进行编程、仿真及实现。该方法在现有的红外系统中得到了实际应用,完成了在有限传输带宽内将系统前端红外图像传输到后端指挥中心的任务。

**关键词:**JPEG;FPGA;System Generator;红外图像

**中图分类号:**TP391.41 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.11.020

## Implementation of real-time JPEG compression in IRST system

QI Hai-jun, LING Qing, LIU Xin, YUE Yuan

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Aiming at the huge amount of data and the need for high transmission bandwidth in infrared search and track system, the JPEG compression algorithm is introduced into the system. The JPEG algorithm and its various modules are discussed in detail. The approaches to realize the function of the modules are described. The test results are given out by programming and simulating with graphical language in System Generator software. Finally, the method is applied in the practical infrared search and track system developed recently. In the practical system, the infrared images collected by the front units can be transmitted to the command and control center smoothly with a limited bandwidth.

**Key words:** JPEG;FPGA;System Generator;infrared image

### 1 引言

红外搜索与跟踪系统(IRST)在防空、反导、反隐形等领域中发挥着重要的作用,特别是针对低空慢速小目标的探测可以弥补雷达探测的盲区。并且它属于被动探测,不易被发现,因此非常适合应用于边境及城市安防等领域。IRST 系统分为前端和后端,随着前端设备规模的不断扩大,人员设备需求的不断增加,“前端无人值守”的概念被提出。由于地域和网络的限制,传输带宽有限,这就对图像传输提出了很高要求,既要能够满足传输带宽,又要保证图

像质量,同时不能丢失小目标。怎样在有限传输带宽内完成红外图像数据的传输成为了关键问题。

红外原始图像的数据量大,以分辨率为  $640 \times 512$  的中波热像仪为例,每个像素 14 bit,帧频 50 Hz (下文提到的图像一般指灰度图像),则带宽大约为 220 Mbps。

为了在有限带宽系统中传输,这就需要对图像

---

作者简介:祁海军(1984-),男,硕士,工程师,主要从事信号及图像处理相关工作。E-mail:qhq5607@163.com

收稿日期:2012-02-16;修订日期:2012-03-17

进行压缩。目前广泛使用的方法是图像压缩或视频压缩。考虑到实际系统是周视扫描运行的,帧与帧之间不具有相关性,因此不具备视频压缩的条件,只能选择图像压缩算法。

## 2 JPEG 压缩的实现

联合图像专家组 JPEG(joint photographic expert group)是基于 DCT 变换的压缩方式属于有损压缩,它通过变换量化后将大部分高频信息衰减。之后再熵编码进一步缩减数据,所以它能达到很高的压缩比。

如图 1 所示为 JPEG 压缩算法流程框图,虚线框内是 JPEG 算法的 3 个主要步骤。原始图像被分割成  $n$  个子块,每个子块分别经过 DCT 变换、数据量化与 Z 扫描、熵编码操作,形成输出数据流。

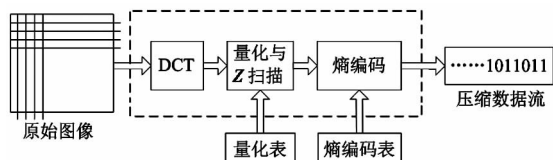


图 1 JPEG 压缩算法流程框图

Fig. 1 flow diagram of JPEG compress algorithmic

下面将结合红外图像特点详细介绍各模块的原理及在 FPGA 中实现过程。

### 2.1 二维 DCT 变换

离散余变换(discrete cosine transform, DCT)是一种经典的谱分析方法,属于离散傅里叶变换的一种特殊情况。DCT 是正交变换,因此它能在不同程度上减少随机向量的相关性。自从提出 DCT 概念以来,已经被大量应用到数字信号处理领域,特别是图像压缩领域,而且已被证实是非常有效地压缩技术之一。

由于二维 DCT 具有行列可分解性,因此具体实现过程中可以将其分解为两步的一维 DCT 操作,另外中间还需要进行一步  $8 \times 8$  矩阵的转置。

二维 DCT 的实现框图如图 2 所示。



图 2 二维 DCT 的实现框图

Fig. 2 diagram of two-dimension DCT realization

如图 3 所示是在 System Generator 中利用图形化语言编写的一维 DCT 实现程序的源代码。

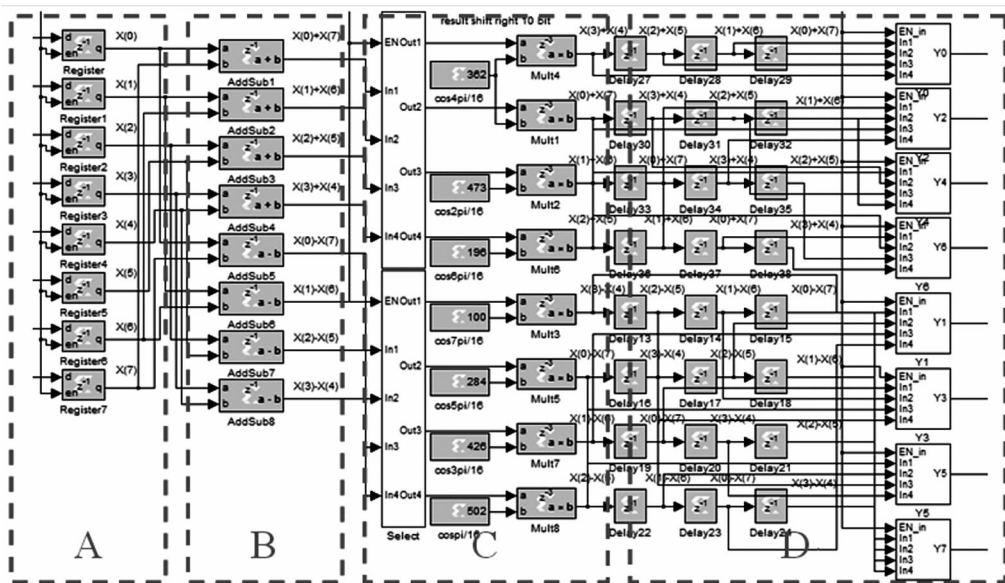


图 3 一维 DCT 程序源代码

Fig. 3 source code of one-dimensional DCT program

从图 3 可以看出一维 DCT 算法分成四个部分:

- A. 数据输入与锁存,同时完成串并转换功能。
- B. 相加运算,同步求出  $X(0) + X(7), X(1) + X(6), X(2) + X(5), X(3) + X(4), X(0) - X(7), X(1) - X(6), X(2) - X(5), X(3) - X(4)$ 。
- C. 数据旋转并乘以相对应系数,因为是定点运算,所有系数扩大了 1024 倍,输出结果右移 10 位即可。

D. 乘以系数后的结果求和,得到  $Y(0)$  至  $Y(7)$  并输出。

至此完成了一维 DCT 的运算,为了得到二维 DCT 还必须要对此结果进行一次转置操作,然后再经过一次相同的一维 DCT 便完成了二维 DCT 的运算。

### 2.2 量化与 Z 扫描

DCT 变换并没有缩减数据量,它只是把信息从

时域形式映射到频域而已。真正缩减数据量是从量化开始的,它根据不同的频率选择不同的量化截距,越往高频截距越大,因此使高频部分大大衰减。

为了节省资源,尽量不要用除法器,可以把除法转换成乘法和移位,将原始量化表取倒数并扩大 1024 倍得到的新量化表图 4,经 DCT 变换后的数据与新的量化表中对应数据相乘,结果向右移 10 位即可。

64	93	102	64	43	26	20	17
85	85	73	54	39	18	17	19
73	79	64	43	26	18	15	18
73	60	47	35	20	12	13	17
57	47	28	18	15	9	10	13
43	29	19	16	13	10	9	11
21	16	13	12	10	8	9	10
14	11	11	10	9	10	10	10

图 4 新量化表

Fig.4 new quantization table

为了进一步缩减数据量,还要进行熵编码,这其中包括游程编码(出现相同字符的个数),所以对量化后的系数重新排序,目的是增加系数中连续“0”的个数。

量化与 Z 扫描的实现方法相似,都是通过查表实现的。将量化系数存储在 ROM 中,ROM 是由 System Generator 中的 ROM 模块调用 IP 实现的。同样将 Z 扫描的顺序系数也存储在 ROM 中。二维 DCT 运算结束后数据是按列串行输出的,所以 Z 扫描 ROM 按列编址。数据到来后按照顺序读取 Z 扫描 ROM 中的顺序系数,以它作为地址提取量化表系数,用量化表系数乘以输入数据。得到的结果还按照 Z 扫描 ROM 输出的顺序系数作为地址存储到临时 RAM 中,然后再按正常顺序读出,即可完成量化和 Z 扫描操作。

表 1 交流系数变长编码表

Tab.1 coding table of AC with changeable length

SSSS	交流系数	VLI 编码
1	-1,1	0,1
2	-3,-2,2,3	00...01,10...11
3	-7...-4,4...7	000...011,100...111
4	-15...-8,8...15	0000...0111,1000...1111
5	-31...-16,16...31	00000...01111,10000...11111
6	-63...-32,32...63	000000...011111,100000...111111
7	-127...-64,64...127	0000000...0111111,1000000...1111111
8	-255...-128,128...255	00000000...01111111,10000000...11111111
9	-511...-256,256...511	000000000...011111111,100000000...111111111
10	-1023...-512,512...1023	0000000000...0111111111,1000000000...1111111111

实现代码如图 5 所示,从左至右可以看到 Z 扫描 ROM,输出顺序系数作为地址送给量化 ROM,同时经过延时后作为地址送给临时存储 RAM。

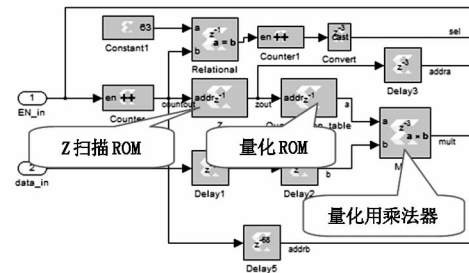


图 5 量化和 Z 扫描程序

Fig.5 quantization and Z scanning code

### 2.3 熵编码

熵编码包括直流系数编码和交流系数编码。Z 扫描中左上角编址为 0 的系数为直流系数,其他 63 个系数为交流系数。直流系数编码中还应用了差分编码,这主要是因为一般图像中大部分能量集中在直流部分,并且相邻数据块的直流分量变化不大,所以采用差值代替绝对值可以大大降低数据量。出于篇幅限制这里只介绍比较复杂的交流系数编码。

交流系数编码中,首先要进行游程编码,将连续“0”的个数(RRRR)找出来,例如 63 个交流系数如下所示:

32,15,0,0,-16,0,0,0,0,0,8,0,0,0,-5,0, ...,0;

经过游程编码后的数据为:

(0,32);(0,15);(2,-16);(5,8);(3,-5);

EOB;

如果连续“0”的个数大于 15 个时,用(15,0)来表示 16 个连续的“0”。

然后对非零系数进行变长编码(VLI),表 1 给出了交流系数变长编码表。

交流系数经过变长编码后的数据为:

[0, (6, 100000)]; [0, (4, 1111)]; [2, (5, 01111)]; [5, (4, 1000)]; [3, (3, 0110)]; EOB;

最后将 RRRR, SSSS 合成一个字节, 查找 Huffman 编码表(略)得到 Huffman 编码, 编码后的数据为:

1111000 100000 1011 1111  
111111110001001 01111 111111110011111  
1000 11111110101 0110

至此编码完成。

### 3 研究特点及实验结果

在 Matlab 下读取红外图像文件, 生成 Simulink 下可用的测试激励向量, 图 6(a) 所示的就是测试图像, 选择固定量化表。从图中看出上面是天空, 灰度是渐暗的, 表示温度逐渐降低。对此图像进行 JPEG 压缩, 压缩后的图像如图 6(b) 所示, 对比两幅图像基本看不出差别, 此时的压缩比大致为 25:1, 这主要是因为图像基本上都是直流量, 高频细节很少, 这也符合了红外图像的特点。

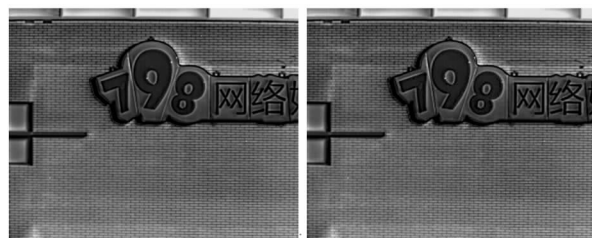


(a) 原始图像 (b) 压缩后图像  
(a) original image (b) compressed image

图 6 细节少的原始图像与压缩后图像

Fig. 6 simple original image and its compressed version

下面选择一幅细节丰富的图像作对比, 图 7(a) 是原始图像, 图 7(b) 是压缩后图像。此时的压缩比大致为 11:1。经过试验验证周视红外图像的压缩比大部分会介于在 10~25 之间。



(a) 原始图像 (b) 压缩后图像  
(a) original image (b) compressed image

图 7 细节丰富的原始图像与压缩后图像

Fig. 7 complex original image and its compressed version

此程序的编写主要是应对多路红外视频的实时压缩, 程序主要采用流水线结构, 从视频输入到编码数据流的输出延迟在微秒级。当多路视频压缩时, 可以采用整体复用技术。从仿真结果计算, 8 行数据缓冲后开始编码的时刻为 39475, 编码结束时刻为 44595, 也就是编码所需要的时间为 5120 个时钟, 下一个 8 行数据缓冲结束并且开始编码的时刻为 74508, 由此可以计算出单路图像压缩的编码器时间占用率为:

$$\frac{44595 - 39475}{74508 - 39475} \times 100\% = 14.6\%$$

在不优化的情况下, 这段程序至少可以同时完成 6 路视频的实时压缩。以 Virtex5 系列器件 XC5v1x110t 为例, 其逻辑资源消耗量仅为 7% 左右。

表 2 给出了与 DSP 实现时的速度、资源消耗对比。从表中可以看出 FPGA 实现的巨大优势。

表 2 速度与资源消耗对比

Tab. 2 comparison of speed and resource consumption

	FPGA	DSP
器件	Virtex5 XC5v1x110t	TMS320C6455
资源消耗	7%	满负荷运行
延时	固定 6 $\mu$ m	不定 10~40 ms

### 4 总结和展望

经过对 JPEG 压缩算法的研究和分析, 成功的将其应用于红外图像的实时传输上, 同时取得了良好的压缩效果和较高的压缩比。软件实现是在 System Generator 下通过图形化语言完成的, 工作效率及代码稳定性很高。最终解决了红外搜索跟踪系统在有限传输带宽下将实时视频传输到指挥中心的问题。

随着对红外图像理解的不断深入, 后续还可以针对红外图像特点进行优化, 可以改进现有量化表和 Huffman 编码表, 使此压缩算法更适合红外图像, 从而提高压缩率和图像压缩质量。

### 参考文献:

- [1] Xuhui Gao, Dong Yi, Qi Meng. Infrared image compression quality evaluation [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(10):1063-1065. (in Chinese)  
高旭辉, 董怡, 祁蒙. 红外图像压缩质量评价研究[J].

- 激光与红外,2008,38(10):1063-1065.
- [2] Mengyu Zhu, Yuliang Yang. Real-time infrared images compression system design based on JPEG2000 [J]. Laser & Infrared, 2005, 35(4): 285-286. (in Chinese)  
朱梦宇, 杨裕亮. 基于 JPEG2000 的实时红外图像压缩系统设计[J]. 激光与红外, 2005, 35(4): 285-286.
- [3] Feng Liu. Coding technology and international standard of video image [M]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunication Press, 2005. (in Chinese)  
刘峰. 视频图像编码技术及国际标准 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005.
- [4] Agostini L V, Silva I S, Bampi S. Pipelined fast 2D DCT architecture for JPEG image compression [J]. Integrated Circuits and Systems Design, 2001, (14): 226-231.
- [5] G K Wallace. The JPEG still picture compression standard [J]. Commun. ACM, 1991, (34): 30-44.
- [6] Yufei Wang. Design and optimize of high speed JPEG coding chip [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)  
汪宇飞. JPEG 高速编码芯片的设计及其性能优化 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [7] Jihua Wu. Application of low cost FPGA in video and image processing [J]. Electronic Design and Application, 2007, (1): 27-30. (in Chinese)  
吴继华. 将低成本 FPGA 用于视频和图像处理 [J]. 电子设计应用, 2007, (1): 27-30.
- [8] Houjie Bi, Jian Wang, et al. New generation of video compress coding principle: H. 264/AVC [M]. 2ed. Beijing: Posts & Telecom Press, 2009. (in Chinese)  
毕厚杰, 王健, 等. 新一代视频压缩编码标准: H. 264/AVC [M]. 2 版, 北京: 人民邮电出版社, 2009.
-