

文章编号 1004-924X(2009)02-0426-07

航空视频图像实时压缩算法的优化设计

李 仕^{1,2}, 张 葆¹, 孙 辉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 研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了一种针对航空视频图像的编码优化方法,在工控计算机上实现了两路 PAL 制式彩色视频的同时实时压缩存储。选择离散余弦变换(DCT)去除图像的相关性,在比较各种 DCT 方法后,对 AAN 算法进行优化改进,并给出优化的依据,同时优化了可变长编码(VLC)中 VLC 表的检索方式。通过对视频压缩算法中运算量最大的两个算法模块进行优化改进,在 P4 3.0G 处理器上实现了 8 ms 内压缩一帧 768 × 576 的彩色图像。算法在 32 : 1 的压缩比下,峰值信噪比(PSNR)为 29.47,接近小波压缩算法在该压缩比下的 PSNR 值,确保了压缩质量。实验结果表明,优化方案在压缩速度、压缩率与压缩质量 3 者间取得了平衡,能很好地满足航空视频图像实时压缩的需求。

关键词:航空图像;实时压缩;视频编码;离散余弦变换

中图分类号:TN919.81; TN941.1 文献标识码:A

Optimized design of real-time encode for aerial-video image

LI Shi^{1,2}, ZHANG Bao¹, SUN Hui¹

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

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

Abstract: An optimized design of aerial-video encode is presented to realize simultaneously real time compression for two PAL videos on an industrial embedded computer. The design chooses Discrete Cosine Transform (DCT) to decorrelate the image data. After comparing several kinds of fast DCT algorithms, AAN algorithm is optimized and implemented, and the base of the optimization is presented. In addition, the search method of Variable-length Code (VLC) table is also optimized. By optimizing the two largest computational algorithm modules in the scheme, DCT and VLC table, a 768 × 576 color video frame can be compressed in 8 ms with P4 3.0G CPU. Under the compression ratio of 32 : 1, the Peak Ratio of Singnal to Noise(PSNR) of the design reaches 29.47, which is extremely close to the performance of the wavelet algorithms, so it guarantees the decoding quality of image. The experimental results show that the design reaches a better balance among compression speed, compression ratio and compression performance in video encoding, and it can satisfy the requirements of the aerial-video compression.

Key words: aerial image; real-time compression; video code; Discrete Cosine Transform(DCT)

收稿日期:2008-04-29;修订日期:2008-06-30.

基金项目:国防科技预研基金资助项目(No. 1040603)

1 引 言

航空视频一般采用 768 × 576 标准 PAL 制式。该规格视频图像如果不经压缩而直接存储,1 s 的视频数据量大约是 31.6 M,1 h 大约是 111.2 G。这个数据量无疑是巨大的。对图像进行压缩,首先要考虑去掉图像的相关性。由于图像像素在空域上有很强的相关性,一般需先将图像转换到频谱域进行去相关,再对图像进行压缩。常见的图像转换方法是小波变换和余弦变换(DCT)。

国内近年对图像压缩算法的研究多集中在小波变换领域^[1-4],原因是基于小波变换的压缩算法能实现图像的无损压缩。文献[1]中的小波压缩方法甚至能做到在 49.913 : 1 的压缩率下获得 46.279 PSNR 值的成绩。虽然小波图像压缩方法已经在航空图片的压缩中得到应用^[1,4],但小波变换庞大的运算量使得小波图像压缩方法目前还无法运用在航空视频图像的实时压缩上。因为航空视频的帧间间隔是固定的(40 ms),若图像无法在规定时间内完成压缩与存储,则将图像帧丢失。

航空视频除了要求高分辨率、高清晰度外,还要求在需要的时候,能够随时从视频流中提取出清晰完整的单帧图像进行其它的分析处理。这就要求视频压缩算法要尽量避免影像的帧间编码,并在保证编码质量的同时控制视频的压缩比。帧间的运动估计及补偿运算的避免,也有利于视频的实时压缩。

在实时压缩及事后单帧处理的要求下,本文重点研究视频的帧内压缩算法,针对帧内压缩算法中运算量最大的几个环节进行优化改进,在视频压缩算法的压缩速度、压缩率与压缩质量 3 者间寻找平衡点,提出了经实验验证可行的算法方案,实现了航空视频图像的实时压缩编码。

2 视频压缩编码

视频帧内压缩过程可分为 DCT、变换系数量化(Quantize)、重排序及游程编码(Zigzag Reordering & RLC)、可变长编码(VLC)等 4 个环节(如图 1 所示)。其中 DCT、Zigzag Reordering

& RLC 及 VLC 熵编码均是可逆的,算法中不可逆的操作是 Quantize 环节,图像信息的丢失也发生在该环节。当 Quantize 环节的量化精度高时图像丢失的信息少,恢复质量好,压缩比低;当量化的精度低时,则图像丢失的信息多,恢复质量差,压缩比高。

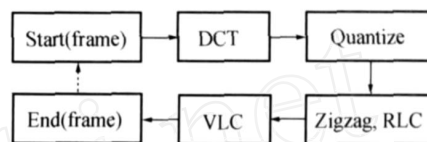


图 1 视频压缩算法框架图

Fig. 1 Illustration of intra-frame encode

尽管 Quantize 过程在很大程度上影响图像压缩的质量及压缩比,但 Quantize 本身的计算量并不大。Zigzag Reordering & RLC 过程的运算量在整个算法运算过程中所占的比例也很有限^[5-6]。压缩算法的运算量主要来自对图像去相关性的 DCT 和对 RLC 结果再进一步压缩的 VLC 编码。为提高压缩算法的速度,下文重点阐述在 DCT 和 VLC 上所做的优化改进。

3 DCT 编码

图像压缩算法中使用的 8 × 8 二维 DCT 数学表达式如下所示:

$$F(u, v) = \frac{C_u C_v}{4} \cdot \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 f(x, y) \cos \frac{(2x+1)u}{16} \cos \frac{(2y+1)v}{16} \quad (1)$$

如果直接用式(1)计算 8 × 8 2D-DCT,共需要 64 × 64 = 4 096 个乘法运算。若根据性质将 2D-DCT 分解成式(2)、(3)所示的一维 DCT 来计算,将 8 × 8 二维 DCT 分解成水平、竖直方向共 16 个 8 点一维 DCT,则共需要 2 × 8 × 64 = 1 024 个乘法运算。

$$F(u) = \frac{C_u}{2} \cdot \sum_{x=0}^7 f(x) \cos \frac{(2x+1)u}{16} \quad (2)$$

$$F(u, v) = \frac{C_v}{2} \cdot \sum_{y=0}^7 F(u) \cos \frac{(2y+1)v}{16} \quad (3)$$

将 2D-DCT 分解成 1D-DCT 计算可以大幅减少运算量,但 DCT 的快速运算还远不止于此。如 Chen^[7]运用余弦函数的对称性,将一维 DCT 的运算量由原先的 64 个乘法、64 个加法缩减到

16 个乘法、26 个加法。有关一维 DCT 快速算法的对比参见表 1。

表 1 一维 DCT 算法对比(8 点 DCT)

Tab. 1 Comparison of 1D-DCT algorithms (8-point DCT)

算法	乘法次数	加法次数
直接计算	64	64
Chen	16	26
Lee ^[8]	12	29
Loeffler ^[9]	11	29
AAN ^[10]	5	29

3.1 AAN 快速算法

DCT 系数可以通过双倍数据量的 DFT 系数的实部计算出来^[11], Arai 等人据此给出由 8 个数据求取 8 个 DFT 系数实部的快速算法(如图 2 所示), 解决一维 DCT 的快速计算^[10]。AAN 算法在求取 DFT 系数后还需对系数进行缩放补偿, 才能获得最终的 DCT 系数。这里将系数的缩放补偿与 DCT 步骤后面的 Quantize 过程的量化系数整合在一起, 来减少算法的运算量。

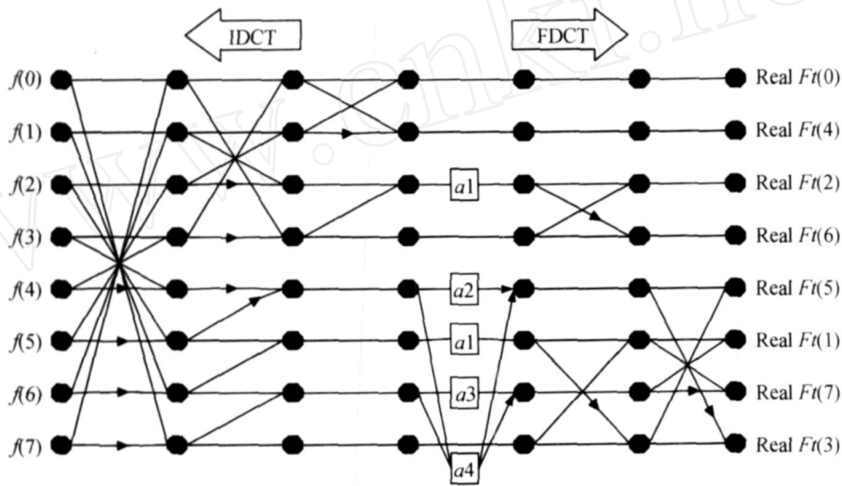


图 2 AAN 8 点 DFT 实系数算法流程图

Fig. 2 Flow chart for 8 points real parts of DFT by AAN

3.2 AAN 算法的优化

为进步提高 AAN 算法的效率, 实现 AAN 算法单指令多数数据流 (SIMD) 工作。本文根据 MMX 优化方法, 以矩阵形式(如(3)式所示)表述 AAN 算法。

$$F = C \times f \times H, \quad (3)$$

其中, $F = [F(0), F(1), F(2), F(3), F(4), F(5), F(6), F(7)]$, $f = [f(0), f(1), f(2), f(3), f(4), f(5), f(6), f(7)]$, H 为变换矩阵, C 为针对 DFT 实部系数进行缩放的缩放系数矩阵,

$$C = \begin{pmatrix} c_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_7 \end{pmatrix}.$$

C 矩阵中 $c_0 = \sqrt{2}/8, c_n = (8\cos \frac{n\pi}{16})^{-1}, n \in [1, 7]$ 。

该矩阵可以与 Quantize 过程的量化系数矩阵进行合并计算, 所以这里不考虑缩放系数矩阵 C 所引入的计算量。

式(3)中的变换矩阵 H 是由图 2 流程图推导所得, 它的矩阵表达式如式(4)所示:

$$H = S_1 \times S_2 \times S_3 \times S_4 \times S_5 \times S_6 \times S_7. \quad (4)$$

式(4)中 $S_1 \sim S_6$ 矩阵分别表示图 2 流程图的 6 个运算过程, S_7 矩阵为最后 DFT 输出系数的重排序矩阵, 分别如下所示:

$$S_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

$$S_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix},$$

$$S_7 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

$$S_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

矩阵 S_4 中变量 $a_1 = \cos \frac{4}{16}$, $a_2 = \sqrt{2} \cdot \cos \frac{6}{16}$, $a_3 = \sqrt{2} \cdot \cos \frac{2}{16}$, $a_4 = \cos \frac{6}{16}$; S_7 矩阵本身不带计算量,矩阵 $S_1 \sim S_6$ 中的元素特点很容易写出整齐规范的代码。将规范代码转换成 MMX 代码的步骤可以参见文献 [12]。从矩阵 $S_1 \sim S_6$ 可以清晰看出 AAN 算法在不考虑 C 矩阵运算的情况下,只需要 5 次乘法运算,30 次加法运算,实际上 S_4 与 S_6 矩阵中的个别运算可以合并,因此可将算法的加法次数缩减到 29 次。

$$S_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -a2 - a4 & 0 & -a4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -a4 & 0 & a3 - a4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

4 VLC 编码

4.1 变换系数(TCOEF)编码

变换系数编码是一种预计算的哈夫曼编码,在视频压缩算法中被广泛应用。它的工作原理同哈夫曼编码一样,是用较短的二进制码代替频繁使用的数据,用较长的二进制码代替较少使用的数据,每个数据的码字各不相同,且每个码字和其它码字的前几位不相同。

$$S_5 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

变换系数编码与一般哈夫曼编码的区别是:它使用量化系数的三维编码,编码的每个码字表示一个(run, level, last)组合。共有 102 个特定的(last, run, level)组合有指定的 VLC 值与之对应。RLE 码的 last 位是 s', 用来标示是否是块中最后一个(run, level)对。如果是,则告知解码器块中后续的数据置零。

$$S_6 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

4.2 VLC 表检索的优化

VLC 表中只有指定的 102 个 (Last, Run, Level) 组合有 VLC 值,其它的 (Last, Run, Level) 组合都将转化为转义序列 (Escape Sequence)。但 (Last, Run, Level) 组合中 Run 的取值范围为 0 ~ 62, Level 的取值范围为 1 ~ 128, Last 取值为 0 或 1,这样共存在 16 128 种 (Last, Run, Level) 组

合。要在 16 128 种组合中匹配检索 102 种指定组合,这个运算量还是比较大。

通过对 VLC 表上数据的分析,发现 Run 的取值范围为 0~40,Level 的取值范围为 1~12,在匹配检索时对 Run 及 Level 值进行限定,(Last, Run,Level)组合将由 16 128 种缩小到 984 种,大大减少编码时查表检索的时间。图 3 为 VLC 表检索方式优化后的流程图。

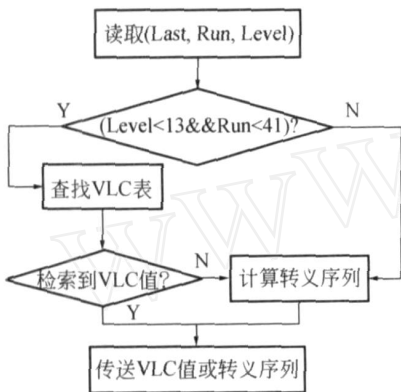


图 3 VLC 表检索流程图

Fig. 3 Flow chart of searching VLC

5 实验及结果

本文的压缩算法是为航空视频图像的实时压缩而设计,算法的设计目标是能在一台 CPU 为 P4 3.0G 的工控计算机上实现两路 768 × 576 PAL 制式彩色视频的同时实时压缩存储。实验内容分视频编码时间测试与图像质量评价两部分进行。

5.1 视频编码时间测试

实验所测时间如无特别说明均为图像从开始编码压缩到编码数据全部写入硬盘这整个过程的时间。实验中编码方案针对单帧 768 × 576 彩色视频图像的压缩时间为 7.5 ms/frame,上下误差为 0.5 ms,即能在 8 ms 内实现单帧 768 × 576 彩色视频图像的压缩存储。算法的视频码率稳定在 8 000 kb/s 左右,平均单帧图像大小为 40.3 K,压缩比为 32 : 1。对 AAN 算法进行了 MMX 优化,将 AAN 算法的执行效率提升了将近 50%。图 4 为航拍实验中的视频解码图样。



图 4 航空视频的解码图像

Fig. 4 Decoded image from aerial-video

5.2 图像质量评价

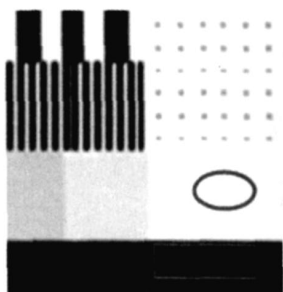
为能客观地评价本文算法的压缩质量,采用每间隔 40 ms 读入一次图 5 所示的灰阶图,完成帧率为 25 frames/s 的视频压缩实验。实际解码显示的图像灰阶还原得较理想(PSNR 为 30.18),图像中间的 Lena 头像基本看不出有像质损失,但经认真对比,在 16 级梯度灰阶区,左右各自边缘最外 2 阶区域之间的梯度界线已经模糊不清;在 32 阶梯度灰阶区对应的左右各自边缘最外 4 阶区域也无法区分。图 6(a)、6(b)分别为解码图像及原图像在如图 5 所示区域处的截图的放大图像。图 6(a)中椭圆标示的 2 阶白色灰阶已经无法区分,图 6(a)中矩形标示的 4 阶黑色区域也同样无法区分,而图 6(b)原图相应位置上 2 处均有灰阶梯度。



图 5 灰阶分辨图

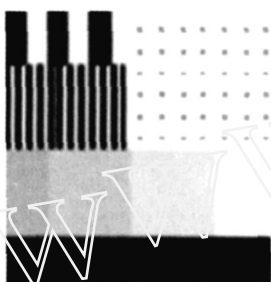
Fig. 5 Grayscale image

单从灰阶评价看,本文算法在 Quantize 过程中对量化系数矩阵的处理还有待优化;但实验评测所得的 PSNR(见表 2)值显示,本文算法的图像压缩质量已经很接近基于小波的压缩算法所取得的结果,甚至在相同压缩比下已经超过个别小波压缩算法。



(a)解码图像的截图

(a)Section of decode image



(b)原始图像的截图

(b)Section of original image

图 6 截图的放大图像

Fig. 6 Image sections

表 2 PSNR 评测值对比

Tab.2 Comparison of PSNR

算法	实验图像	压缩比	PSNR
本文算法	Lena		29.47
双正交小波算法 ^[2]	Lena		23.07
本文算法	Cameraman	32 1	29.17
CL 平衡多小波算法 ^[4]	Cameraman		31.342
GHM 平衡多小波算法 ^[4]	Cameraman		21.712

为更全面地评价压缩编码的压缩质量,我们用标准测试序列 Tempete 做进一步的压缩评价。图 7 为视频序列 Tempete 的原始视频截图,图 8 为压缩视频的解码图像。图 7、图 8 在视频序列中均为第 210 帧。从图 8 中可以看出,经压缩后视频图像的质量几乎没有受损,只是图像的灰阶梯度减少,整体画面比原始图像显得要亮一点。所得评测数据参见表 3。

表 3 Tempete 视频的 MSE 值及 PSNR 值

Tab.3 MSE & PSNR of Tempete video

图像	评测参数	R	G	B	平均
彩色 Tempete	MSE	86.95	70.09	99.42	85.49
	PSNR	28.74	29.68	28.16	28.86



图 7 Tempete 视频截图

Fig.7 Tempete video



图 8 压缩视频解码后图像

Fig. 8 Decoded image from encoded Tempete video

6 结 论

在对一维 DCT 算法及可变长编码(VLC)进行优化后,压缩算法能达到在 8 ms 内压缩一帧 768 pixels ×576 pixels ×24 bits 的图像,完全满足在工控计算机上同时压缩两路 PAL 制式视频的应用需求。32 1 的压缩比可在 1 s 内大约生成 768 ×576 ×3 ×25/32 = 1 M 的视频数据,1 h 内的视频数据约为 3.48 G。这样的视频数据量,在航空摄影上是可以接受的。在 PSNR 值比较中,本文压缩算法与基于小波变换的压缩算法的评测结果相接近,甚至优于部分小波压缩算法。说明在 32 1 的压缩比下,本文算法所取得的图像压缩质量可以满足航空视频压缩的应用^[13]。以上实验结论说明本文所做的算法改进在保证压缩率及压缩质量的同时有效地减少了算法的压缩时间,具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] 赵秀影,翟林培,商玉凤,等. 航空图像压缩中双正交小波提升设计[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(9): 1445-1450.
ZHAO X Y, ZHAIL P, SHANG Y F, *et al.*. Lifting scheme design of biorthogonal wavelet for aviation image compression [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1445-1450. (in Chinese)
- [2] 赵峰,袁东风,张海霞,等. 多 DSP 图像压缩实时并行处理系统[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(9): 1451-1455.
ZHAO F, YUAN D F, ZHANG H X, *et al.*. Multi-DSP real-time parallel processing system for image compress [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1451-1455. (in Chinese)
- [3] 苏令华,李纲,衣同胜,等. 一种稳健的高光谱图像压缩方法[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(10): 1609-1615.
SU L H, LI G, YI T SH, *et al.*. A robust hyperspectral image compression method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1609-1615. (in Chinese)
- [4] 赵秀影,商玉凤,翟林培,等. 基于 EBCOT 的平衡多小波航空图像压缩编码[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(11): 1796-1801.
ZHAO X Y, SHANG Y F, ZHAIL P, *et al.*. Balanced multiwavelet aviation image compression coding based on EBCOT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1796-1801. (in Chinese)
- [5] RICHARDSON I E G. *Video Codec Design: Developing Image and Video Compression Systems* [M]. John Wiley & Sons LTD, 2002.
- [6] RICHARDSON I E G H. *264 and MPEG-4 Video Compression* [M]. John Wiley & Sons LTD, 2003.
- [7] CHEN W H, SMITH C H, FRALICK S C. A fast computational algorithm for the discrete cosine transform[J]. *IEEE Trans.*, 1977, 25(9): 1004-1009.
- [8] LEE B. A new algorithm to compute the discrete cosine transform [J]. *IEEE Trans. ASSP*, 1984, 32(6): 1243-1245.
- [9] LOEFFLER C, LIGTENBERG A, MOSCHYTZ G S. Practical fast 1-D DCT algorithms with 11 multiplications [J]. *Proc. Icassp89*, 1989, 2: 988-991.
- [10] ARAI Y, AGUI T, NAKAJIMA M. A fast DCT-SQ scheme for images[J]. *Trans. of the IEICE*, 1988, 71(11): 1095-1097.
- [11] TSENG B D, MILLER W C. On computing the discrete cosine transform[J]. *IEEE Trans. Comput.*, 1978(10): 966-968.
- [12] TUNG Y SH, HO C C, WU J L. MMX-based DCT and MC algorithms for real-time pure software MPEG decoding[J]. *IEEE ICMCS '99*, 1999(1): 357-362.
- [13] BERG D V, KRUEER M. Image compression for airborne reconnaissance[J]. *SPIE*, 1998, 3431: 2-13.

作者简介:



李仕(1984 -),男,浙江苍南人,博士研究生,主要研究方向为航空成像的补偿算法及视频压缩算法。E-mail: brightlishi@gmail.com



孙辉(1963 -),男,吉林柳河人,研究员,主要研究方向为数字图像处理与分析、计算机仿真技术等。E-mail: sunh@ciomp.ac.cn

导师简介:



张葆(1966 -),男,吉林盘石人,研究员,工学博士,博士生导师,主要从事航空光电成像技术的研究。E-mail: cleresky@vip.sina.com