

文章编号: 1007-2780(2011)06-0847-06

适于航天应用的高速 SPIHT 图像压缩算法

张 宁^{1,2}, 吴银花^{1,2}, 金龙旭^{1*}, 陶宏江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, E-mail: scorode@163.com;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: SPIHT 和无链表 SPIHT (Not List SPIHT) 是高效的图像压缩算法, 但是抗误码性差、压缩速度慢等缺点限制了其在航天领域的应用。文章针对上述两个缺点对算法进行了改进, 采用 Le Gall5/3 小波对遥感图像进行小波分解, 将小波域系数分家族块进行索引、扫描和码率分配, 按照比特平面或运算进行重要性预测, 实现了 N 个位平面同时编码。改进算法与 SPIHT 相比易于硬件编程实现, 仿真结果显示, 解压后图像峰值信噪比 (PSNR) 提高了 0.2~0.6 db, 压缩速度提高了 4~6 倍。用硬件实现时如果采用并行和流水线操作, 速度还可以进一步提高。

关 键 词: 航天应用; 高速 SPIHT; 抗误码性; 比特平面并行

中图分类号: TP911 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/YJYXS20112606.0847

Image Compression Algorithm of High-Speed SPIHT for Aerial Applications

ZHANG Ning^{1,2}, WU Yin-hua^{1,2}, JIN Long-xu¹, TAO Hong-jiang¹

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

Changchun 130033, China, E-mail: scorode@163.com;

2. Graduat School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: SPIHT and NLS (Not List SPIHT) are efficient image compression algorithms, but the algorithms application is limited by the shortcomings of the poor error resistance and slow compression speed in the aviation areas. In this paper, the error resilience and the compression speed were improved. The remote sensing images were decomposed by Le Gall5/3 wavelet, and wavelet coefficients were indexed, scanned and allocated by the means of family blocks. The bit-plane importance was predicted by bitwise OR, so the N bit-planes can be encoded at the same time. Compared with the SPIHT algorithm, this modified algorithm is easy implemented by hardware. The experiments results show that the PSNR of reconstructed images was increased about 0.2 to 0.6 db and the speed was 4~6 times faster than the SPIHT encoding process. The speed can be further improved via virtue of the parallelism and pipelining, when it is implemented by the hardware.

Key words: aerial applications; high-speed SPIHT; error resistance; bit-plane parallel

收稿日期: 2011-03-30; 修订日期: 2011-05-24

作者简介: 张宁(1982-), 男, 山东邹城人, 博士研究生, 主要研究方向为图像压缩与传输。

* 通讯联系人, E-mail: jinlx@ciomp.ac.cn

1 引 言

目前国内外高分辨率遥感技术发展很快,空间相机的采样率和遥感图像的分辨率越来越高,在通信信道受限的航天应用中对图像压缩提出了更高的要求。市场上已出现的压缩芯片如 ADI 公司的 ADV202、ADV212,在不可逆模式下最大输入速度只有 65 Mpixel/s,而且像素深度不能满足所有要求。因此为适应工程要求,需要研发更为可靠、高效的压缩系统。

1996 年, Said 和 Pearlman 提出了 SPIHT (Set partitioning in hierarchical trees) 算法^[1]。SPIHT 算法采用空间方向树结构,利用图像小波域系数在同一方向不同分解子带之间存在很大相似性的特点,同时也考虑了同一尺度下小波系数的相关性,不仅能有效地提取小波域重要系数,压缩性能接近 JPEG2000 的 EBCOT,而且复杂度要比 EBCOT 低很多。SPIHT 使用 3 个链表扫描系数,分别是非显著像素链表(LIP)、显著像素链表(LSP)和非显著集合队列(LIS)。3 个链表重复性的扫描和动态更新限制了编码速度,也不利于硬件实现。之后, Frederick. W. Wheel 和 William. A. Pearlman 从硬件实现的角度提出了一种无链表 SPIHT 算法,称之为 NLS(No List SPIHT)^[2]。NLS 的扫描顺序、分集规则与 SPIHT 是一样的,压缩性能也与 SPIHT 一样。NLS 解决了硬件实现的问题,但仍然采用重复性的扫描,编码速度没有提高。

空间辐射环境中存在大量带电粒子和宇宙射线,这些带电粒子和宇宙射线会对存储设备产生辐射效应,有可能造成误码。SPIHT 和 NLS 的输出码流是按照排序扫描顺序输出的,一旦产生误码将影响整幅图像的重构。本文针对上述问题改进 SPIHT,通过比特平面重要系数预测实现比特平面并行扫描,将小波域系数按家族块分别存储编码,提高了抗误码性和编码速度,提出了适合航天应用的高速 SPIHT 压缩算法。

2 NLS 的改进与不足

2.1 NLS 的改进

NLS 仍然采用空间方向树结构,将图像小波域系数分为父亲、孩子和孙子,如图 1 所示。为了易于硬件实现, NLS 相比 SPIHT 进行了如下

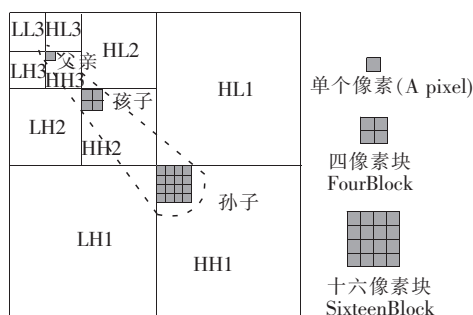


图 1 小波系数空间方向树结构

Fig. 1 Spatial orientation tree structure of wavelet coefficients

改进:

(1) 引入线性索引技术。线性索引用一个数字来代替小波域系数的横纵坐标,设 $R=C=2^N$ 表示图像的行数和列数, (r, c) 为系数的坐标,用二进制来表示 r, c ,则可把它们写成:

$$\begin{aligned} r &= [r_{N-1}, r_{N-2}, \dots, r_1, r_0] \\ c &= [c_{N-1}, c_{N-2}, \dots, c_1, c_0] \end{aligned} \quad (1)$$

可以把线性索引定义为:

$$i = [r_{N-1}, c_{N-1}, r_{N-2}, c_{N-2}, \dots, r_1, c_1, r_0, c_0] \quad (2)$$

图 2 为一个 8×8 线性索引表。

0	1	4	5	16	17	20	21
2	3	6	7	18	19	22	23
8	9	12	13	24	25	28	29
10	11	14	15	26	27	30	31
32	33	36	37	48	49	52	53
34	35	38	39	50	51	54	55
40	41	44	45	56	57	60	61
42	43	46	47	58	59	62	63

图 2 线性索引表

Fig. 2 Linear index table

(2) 用状态表 Mark 代替 SPIHT 中的 3 个链表,根据每次扫描结果更新 Mark 表,来标志每一个图像小波系数的状态。用 val 存储线性索引排序之后的小波变换系数,引入两个最大值表 $dmax[i]$ 、 $gmax[i]$, $dmax[i]$ 表示父亲节点中以系数 i 为根节点后代的最大值, $gmax$ 表示以系数 i 为根节点的孙后代的最大值。这两个最大值表求完之后在编码过程中不再更新。由式(3)、(4)可求:

$$\begin{aligned} gmax(i) &= \max[dmax(4i), dmax(4i+1), \\ & \quad dmax(4i+2), dmax(4i+3)] \end{aligned} \quad (3)$$

$$d_{\max}(i) = \max[\text{val}(4i), \text{val}(4i+1), \\ \text{val}(4i+2), \text{val}(4i+3), g_{\max}(i)] \quad (4)$$

NLS 用一维线性索引的寻址方式来代替二维寻址方式,设置 SKIP 函数跳过不重要像素块;用 Mark 状态表取代 3 个链表,引入 d_{\max} 、 g_{\max} 表每次扫描时不用重复计算子孙集合的最大值。

2.2 NLS 耗时及误码分析

线性索引模块以查找表的形式对小波变换后的系数重新排列。以 $512 \times 512 \times 8$ bit 图像为例,在线性索引时,存在小波系数的高频子带系数重新排序地址太分散的缺点。例如 HH1 子带最后一行第一个系数坐标为 (511, 256), 用二进制表示为 (11111, 1111, 10000, 0000), 索引值为 240 298; 最后一个系数位置为 (511, 511), 二进制表示为 (11111, 1111, 11111, 1111), 索引值为 262 143。将每个系数的索引值与存储 RAM 地址做映射,编程过程计算量大,而且存储查找表需要很大的空间,随着图像行数和列数的增大,计算量剧增。NLS 能否正确编码依赖于线性索引表能否将小波变换系数正确排列,因此需要简化线性索引过程。

建立线性索引查找表后,依次进行 IP、IS、REF 三个扫描过程,每个扫描过程都是按照位平面从最高位平面 (MSB) 到最低位平面 (LSB) 逐个扫描。如果 MSB 为 8, LSB 为 1, 则相当于扫描了 24 遍。每个位平面的扫描输出内容包括给解码器和给下一位平面扫描的信息,如果码流出错,就会影响以后的扫描及解码过程,将对整幅图像重建带来灾难性后果。扫描过程所用时间是整个压缩系统耗时的瓶颈,扫描码流能否正确输出是图像能否正确重建的关键,因此需要改进扫描过程,保证快速扫描。

3 高速 SPIHT 算法

3.1 改进 SPIHT 初始化

线性索引、求 d_{\max} 和 g_{\max} 是两个遍历所有系数的过程,可一起进行。本文采用分块处理思想,将小波域系数分为多个家族块。由 HL3、HH3、LH3 子带中的一个系数 (单个像素), HL2、HH2、LH2 中的 4 个系数 (4 像素块), 及 HL1、HH1、LH1 中的 16 个系数 (十六像素块) 组成一个家族,将多个家族组成一个家族块。本文将 32×32 个家族作为一个家族块,每个家族块占用一块

RAM, 如图 1 所示。各级小波变换的输出系数经映射地址直接存储到家族块 RAM 中,共 12 个家族块,LL3 系数单独存储。相对于整幅图像,每个家族块内小波系数很少,可以大大减少线性索引的计算复杂度;各家族块共用一个线性索引查找表,也减少了内存需求。根据硬件资源和编码需要可以调整家族块大小,如 16×16 、 64×64 等。每个家族块同时进行编码,编码后的码流也按块存储,编码过程中如果产生误码,结果只会影响本块内的系数,提高了抗误码性。各家族块内线性索引和编码过程相同,用硬件描述语言实现时,用例化语句就可以产生各块编码模块,提高了编码效率。如果使用码率控制,可以在求 d_{\max} 、 g_{\max} 的同时求每家族块各子带的估计熵 H 。初始化过程如图 3 所示。

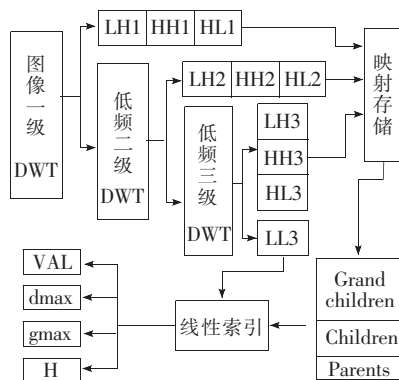


图 3 小波系数存储及初始化

Fig. 3 Wavelet coefficient stored and the initialization

3.2 SPIHT 比特平面并行扫描

NLS 中的 3 个扫描过程都是按照位平面从 MSB 到 LSB 来扫描的,因为一个位平面扫描需要前一个位平面扫描的输出信息、阈值及 Mark 状态信息,这种依赖性限制了位平面的并行编码。NLS 用 Mark 表表示每个像素位平面的状态,其实通过像素各位平面或操作就可以预测像素位平面的状态。本文不采用 Mark 表,而是对 val 、 d_{\max} 、 g_{\max} 的值按位或运算预测位平面重要性,或运算用硬件语言实现简单,这个过程耗时较少^[3]。

定义: PixelOR 表示 val 单个像素 (A pixel) 前 $n-1$ 位或操作, PixelOR 初值为 0。如果 PixelOR 为 1, 则说明该系数前 $n-1$ 个位平面至少有一个位平面为 1; 如果 PixelOR 为 0, 则说明该系数前 $n-1$ 个位平面全是 0, 这个系数是不重要的。

PixelBit 表示 val 单个像素(A pixel)第 n 位的值。如果该系数是不重要的,则 PixelBit 用来预测这个系数在第 n 位扫描时是否重要。为 1,则 val 值大于等于阈值,该系数重要;为 0,则 val 值小于阈值,该系数不重要。

DmaxOR 表示每个四像素块(FourBlock)的 Dmax 前 $n-1$ 位或操作,DmaxOR 初值为 0。Dmax OR 用来判断四像素块(FourBlock)是否分为 4 个系数,如果 DmaxOR 为 1,则四像素块(FourBlock)分为 4 个系数;为 0,则不分。

DmaxBit 表示每个四像素块(FourBlock)的 Dmax 第 n 位的值。如果四像素块(FourBlock)没有被分解,则 DmaxBit 用来判断其在第 n 位平面扫描时是否被分解。为 1,则分为 4 个系数;为 0,则不分。

MGpredict 表示 HL2、HH2、LH2 子带中每四像素块(FourBlock)的 Dmax 前 n 位或操作。MGpredict 用来判断十六像素块(SixteenBlock)是否被标记为 MG,(MG 是 NLS 中孙子 Grandchildren 的状态,相当于 SPIHT 中的 L 型表项)。

GmaxOR 表示每个十六像素块(SixteenBlock)的 gmax 前 $n-1$ 位或操作,GmaxOR 初值为 0。如果十六像素块(SixteenBlock)被标记为 MG,则 GmaxOR 用来判断十六像素块(SixteenBlock)是

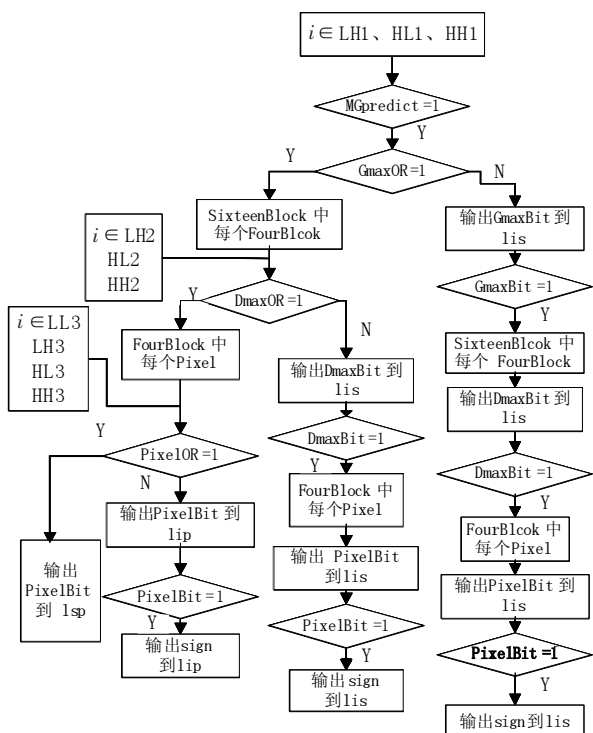


图 4 子带系数扫描流程图

Fig. 4 Scanning flowchart of sub-bands coefficients

否被分为 4 个四像素块(FourBlock)。为 1,则分为 4 个块;为 0,则不分。

GmaxBit 表示每个十六像素块(SixteenBlock)的 gmax 第 n 位的值。如果十六像素块(SixteenBlock)没有被分为 4 个四像素块(FourBlock)块,则 GmaxBit 用来判断其在第 n 位平面扫描时是否被分解。为 1,则分为 4 块;为 0,则不分。

Sign 表示每个像素的符号,lip、lis、lsp 是 SPIHT 中的 3 个链表,分别对应 NLS 中的 3 个 IP、IS、REF 扫描过程。图 4 所示为比特平面并行 SPIHT 扫描流程图。

4 码率控制

码率控制是为了在已定码率的前提下寻求各编码块的截断点,使得由量化和截断引入的误差达到最小,这是一个反馈过程。SPIHT 和 NLS 是按照位平面从高到低扫描的,当传输带宽受限时编码进行位平面截断,相当于对小波域系数整体做同一步长量化。当低码率压缩时,量化步长增大,图像产生严重失真,出现伪轮廓现象。文献[4]中根据每个子带变换增益取不同量化步长,效果相当于在不同子带进行不同位平面截断。根据 JPEG-LS 标准中的预测算法^[5],在线性索引的同时估计各家族块子带的熵值,根据压缩码率要求分配各家族块子带输出码流数,各家族块子带按位平面从高到低截断,实现码率控制。预测模板如图 5 所示。

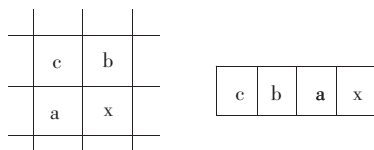


图 5 预测模板及线性索引的顺序

Fig. 5 Forecast template and linear index order

系数预测公式为:

$$\hat{x} = \begin{cases} \min(a, b), c \geq \max(a, b) \\ \max(a, b), c \leq \min(a, b) \\ a + b - c, \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

一个家族块(FamilyBlock)由 3 个子带(SubBand)组成。一个家族块子带(SubBand)预测熵为: $H_s = \sum_i |\hat{x}_i - x_i|, i \in \text{SubBand}, s=1, 2, 3,$

x_i 为真实值, \hat{x}_i 为预测值。一个家族块预测熵为 $H_f = \sum_S H_{f,S}$, H_{LL3} 为 LL3 子带预测熵, 全部小波系数预测熵为: $H = H_{LL3} + \sum_f H_f$ 。 f 为家族块个数, $f=1, 2, \dots, 12$ 。 W_f 为各家族块预分配权值, $W_f = H_f/H$, W_{fs} 为 f 家族块 s 子带预分配权值。 $W_{fs} = H_{fs}/H$, H_{fs} 表示 f 家族块 s 子带预测熵。 W_{LL3} 为 LL3 子带预分配权值, $W_{LL3} = H_{LL3}/H$, $W_{LL3} + \sum_f W_f = 1$ 。 设 ν 为码率, 图像大小为 $R \times C$, 则各块预分配码流数为:

$$B_{fs} = \text{Rate} \times R \times C \times W_{fs}$$

$$B_{LL3} = \text{Rate} \times R \times C \times W_{LL3}$$

根据信道带宽受限情况, 由码率值计算分配各家族块子带传输码流进行码率控制。

5 实验结果

在 PC 机上使用 MATLAB2008 进行仿真 (CPU: Intel Pentium Dual E2160 1.8 GHz, 内存为 1GByte), 选用 Le Gall5/3 整数提升小波, 对 $512 \times 512 \times 8$ bit 的 Lena 和 Boston 遥感图像进行三级小波分解。 分别使用 JPEG2000、本文算



(a) Boston 遥感图像



(b) Rate 为 1, PSNR 为 35.65 db



(c) Rate 为 0.125, PSNR 为 24.73 db

图 8 Boston 遥感图像以及码率为 1 和 0.125 时的解压图像

Fig. 8 Boston remote sensing image and the decompressed images when rate are 0.125 and 1

法、SPIHT、NLS 在不同码率下进行压缩编码。 如图 6 所示, 本文算法压缩效果优于 SPIHT 和 NLS, 略低于 JPEG2000, 与 SPIHT 相比 PSNR 提高了 0.2~0.6 db。 在相同码率下, 本文算法压缩耗时是 SPIHT 耗时的 1/4~1/6, 编码速度提高了 4~6 倍, 如图 7 所示。 用硬件实现时如果采用并行和流水线操作, 速度还可以进一步提高。 图 8 为码率为 1 及 0.125 时的 Boston 解压缩图像, 按原始图像一定比例缩小显示。

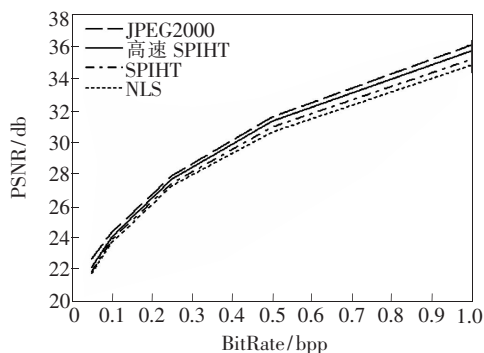


图 6 Boston 图像解压后 PSNR

Fig. 6 PSNR of the decompressed Boston image

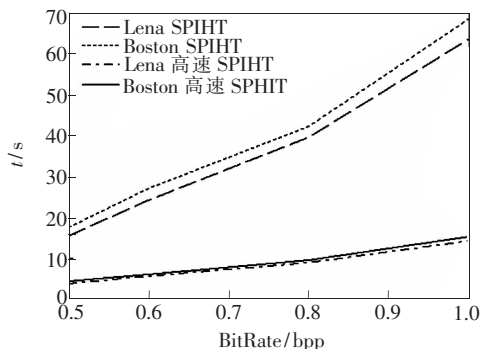


图 7 SPIHT 和高速 SPIHT 压缩耗时

Fig. 7 Time cost of SPIHT and high-speed SPIHT

6 结 论

针对航天应用图像压缩系统高速稳定的要求,在 SPIHT 和无链表 SPIHT 的基础上改进了算法。在线性索引的同时求 d_{\max} 、 g_{\max} 及各子

带的估计熵值,将小波域系数按家族块存储编码,减少了算法的计算量,将误码的干扰性限制在本家族块子带内。同时提出了位平面重要性预测的概念,位平面 MSB 到 LSB 并行扫描,提高了编码速度。本算法能够满足航天应用要求。

参 考 文 献:

- [1] Said A, Pearlman W. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 1996, 6(6): 243-250.
- [2] Wheeler F W, Pearlman W A. SPIHT image compression without lists [C]//*IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP2000)*, Istanbul: IEEE, 2000, 2047-2050.
- [3] Wu Yinhua, Jin Longxu, Tao Hongjiang. An improved fast parallel SPIHT algorithm and its FPGA implementation [C]//*The 2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication, Wuhan: IEEE*, 2010, 1: 191-195.
- [4] 徐勇, 徐智勇, 张启衡, 等. 适于硬件实现的低复杂度图像压缩[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9): 2262-2268
- [5] 孔繁镛, 李云松, 王柯俨, 等. 基于码率预分配的 JPEG2000 自适应率控制算法 [J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(1): 66-70.
- [6] 何伟, 俞立, 董辉. 基于 IWT 图像压缩技术的 LED 同步显示系统设计[J]. *液晶与显示*, 2009, 24(2): 262-267
- [7] 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.
- [8] 赵洁红, 孙文军, 孟忠, 等. CCD 遥感图像的小波分解特性及编码压缩[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(2): 205-210.