

文章编号 1004-924X(2015)03-0864-07

基于首 1 游程的图像位面并行编码算法

徐 勇*

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要:针对宇航应用领域对图像压缩算法计算复杂度的要求,提出一种全新的“首 1 游程”位面编码算法。该算法将离散小波系数首 1 比特及以上位面用本文提出带符号自适应二进制游程算法编码,其下位面则不编码,直接输出比特值。为兼容无损压缩,算法采用了空间数据系统咨询委员会(CCSDS)推荐的整数 97 小波变换。由于考虑了像素间、位面间的数据依赖性,该算法的数据访问次数、编码复杂度等远远低于目前算法。该算法是一种内嵌式编码算法,可通过截断码流来精确控制压缩比,支持码流的渐进性传输。试验数据显示,与 CCSDS 推荐的图像压缩算法比较,本算法计算复杂度显著降低,而压缩性能却略高,同时还支持位平面间独立并行编码,提高了压缩速度。该算法可以满足宇航应用中高速、高性能、低复杂、低功耗的要求。

关键词:首 1 游程编码;位面并行编码;内嵌式编码算法;图像压缩

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152303.0864

Bit-plane paralleled image coding algorithm based on run-length coding of first 1 bit

XU Yong*

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: andrexu@163.com

Abstract: In consideration of the demands of image compression algorithm in space application fields for computer complexity, this paper proposes a new “run-length coding of first 1 bit” algorithm. In this algorithm, the first 1 bit plane and above bit planes of Discrete Wavelet Transform (DWT) coefficients are encoded by signed adaptive binary run coding algorithm presented in this paper, and lower bitplane is directly output as it's bit value. To be compatible with a lossless compression, the algorithm uses a 97 integer wavelet transform recommended by Consultative Committee for Space Data System (CCSDS). Because the dependencies between pixels and between bitplanes are considered, the data access times and coding complexity are far lower than that of the current algorithms. Moreover, the algorithm is an embedded coding algorithm, the compression ratio could be precisely controlled by truncating the bit stream, and the progressive transmission of the code stream could be supported. The experimental data show that the complexity of the algorithm is significantly reduced, and the compression performance is slightly higher as compared with that of the image compression algorithm recommended by the CCSDS. Meanwhile, the algorithm also supports bit plane independent parallel coding and improves compression speeds. The algorithm has met the space application requirements

收稿日期:2014-11-05;修订日期:2014-12-31.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 91438102)

for the high-speeds, high performance, low complexity and the low power.

Key words: run-length coding of first 1 bit; bitplane paralleled coding; embedded coding algorithm; image compression

1 引言

深空探测通信距离长,通信路径损耗大,通信单向延迟长,因此,具有码速率低、高增益信道编码的特点^[1],其庞大的图像数据量往往会对带宽有限的深空通信信道造成极大的传输压力。图像压缩无疑是节省发射能量、提高信息回传效率的必由之路。然而,宇航级的抗辐照处理器、存储器、现场可编程门阵列(FPGA)以及深空探测器等器件对图像压缩处理器的性能都有很高的要求,因此,在宇航应用中选择图像压缩算法、处理器架构时,既要兼顾算法性能、又要考虑计算复杂度、缓存开销、体积、功耗等因素。

目前常见的图像压缩标准有 JPEG-LS、JPEG、及小波域压缩的 JPEG2000 和 SPIHT(Set Partitioning in Hierarchical Trees)算法等^[2]。其中, JPEG-LS 具有复杂度低、压缩性能好,可为无损压缩标准,但不支持有损压缩; JPEG 为最常见的压缩标准,采用 8×8 的小块独立压缩,计算复杂度适中,性能一般,低码率时性能下降快且有块效应; JPEG2000 具有极高的性能,然而复杂的 EBCOT 编码及 MQ 算术编码使得其编码复杂度极高,会占用 4 片 1300 万门 FPGA^[3],不适合宇航应用。SPIHT^[4] 算法具有略低于 JPEG2000 的压缩性能,但其内包含动态链接的链表,采用 FPGA 等硬件实现较为困难。之前研究所提出的低复杂度图像压缩算法^[5-6] 具有较高性能及速度,但是不支持渐进式传输,不太适合深空应用。为此,空间数据系统咨询委员会(Consultative Committee for Space Data System, CCSDS)标准中给出了一种适于宇航应用的图像数据压缩标准 CCSDS 120.1-B^[7], 该算法同样基于小波变换,其采用较为简单的位面图像编码算法,无需算术编码及复杂的链表操作,可兼顾算法复杂度及压缩性能。宇航用 CCD 相机的帧格式输出及推扫格式输出相兼容,在宇航应用领域具有广泛的应用前景。

为进一步提高宇航应用中图像压缩编码速

度、追求更高的压缩性能、更低的计算复杂度、更高的能源效率,本文面向宇航应用尤其是深空探测任务的图像压缩需求,提出了一种全新的计算复杂度更低、压缩性能更高,且便于位面间并行的“首1游程”位面编码算法,即对小波系数进行熵编码的位面编码算法。

2 基于首1游程的图像编码算法组成

图1为本文算法的处理流程图,其主要包括3个步骤:(1)进行图像数据的小波变换,此处采用与 CCSDS 标准推荐算法一致的 9-7 整数小波变换,具体变换方法及变换公式参见文献^[4]; (2)由于 9-7 小波的各个子带系数变换的增益不均匀,需要对小波系数子带进行加权,以使重要子带系数优先编码; (3)采用本文提出的全新“首1游程”位面编码算法对图像小波系数进行编码,获得图像压缩位流。

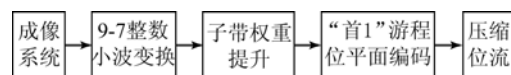


图1 基于首1游程的图像编码算法组成

Fig. 1 Algorithm based on run-length coding of first 1 bit

3 图像的整数小波变换及位面提升

3.1 图像 9-7 整数小波变换

本算法采用 CCSDS 标准推荐的 9-7M 整数小波变换对图像进行 6~9 级的小波变换。9-7M 小波变换的计算公式及实现方式参见 CCSDS 122.0-B-1^[7], 其仅需要一次提升计算即可实现正变换或反变换:

$$s_l^{(0)} = s_{2l}, \quad (1)$$

$$d_l^{(0)} = d_{2l+1}, \quad (2)$$

$$\forall l: d_l^{(1)} = d_l^{(0)} - \lfloor \frac{-1}{16}(s_{-1}^{(0)} + s_{+2}^{(0)}) + \frac{9}{16}(s_{-0}^{(0)} + s_{+1}^{(0)}) + \frac{1}{2} \rfloor, \quad (3)$$

$$\forall l: s_l^{(1)} = s_l^{(0)} - \lfloor \frac{-1}{4}(d_{l-1}^{(1)} + d_l^{(1)}) + \frac{1}{2} \rfloor. \quad (4)$$

进行 K 级小波变换,可以获得 $(3 \times K + 1)$ 个

小波子带,分别标记为 $LL_K, LH_K, HL_K, HH_K \dots LH_1, HL_1, HH_1$ 。

3.2 小波域位平面的权值提升

小波变换的变换增益导致各个子带的失真量对图像解压时的影响权重不同,因此在编码时,各个子带的编码优先级随着编码增益的提高而提高。本文使用移位进行小波域位平面的权值提升。对于每一个子带,根据其所处的小波层级及小波子带方向,确定每个子带的提升级别 N_{lift} :

$$N_{lift} = \begin{cases} k & \text{subband} \in \{LL, HL, LH\} \\ k-1 & \text{subband} \in \{HH\} \end{cases}, (5)$$

其中: k 为小波子带所处层级。在后续介绍的算法编码时,仅对有效位面进行编码,对于权值提升造成的各子带中全 0 位面,则不进行编码。

4 基于首 1 游程的位平面编码算法

4.1 一种自适应带符号二进制游程编码

对于带符号的二进制数据精细编码,当数据为 0 时,其符号位并不重要;当数据位为 1 时,其符号位才重要。因此仅需要传输‘1’对应的符号位即可,而采用 0 游程进行二进制编码时,结束 0 游程的值必然为‘1’,因此,导致游程结束的 bit ‘1’也无需传输。

符号 011110010010101010101010
Bit数据 001100000101010000000000
编码后:00(0)100(2)001100(7)

图 2 自适应带符号二进制游程编码示例

Fig. 2 Coding example of signed adapted binary run-length coding

因此,自适应带符号二进制游程编码算法的步骤如表 1 所示。

表 1 自适应带符号二进制游程编码算法

Tab. 1 Adapted run-length coding of signed binary data

初始化:零计数 $CNT_0=0$;
编码:编码输入 bit 数据:
如果 CNT_0 大于 1,当前输入为 bit = 0,那么 CNT_0 加 1,不输出任何值;
如果 CNT_0 大于 1,当前输入为 bit = 1,那么输出 $EG(CNT_0-2)$,输出当前比特对应符号位;
如果 CNT_0 小于 2,输出当前比特,假如当前输出 bit = 1,那么再输出当前比特的符号位。

其中: $EG(*)$ 表示对整数 $*$ 进行 $k=1$ 的指数哥伦布编码(Exp-Golomb)^[8]。图 2 中 $(*)$ 表示对整数 $*$ 进行 $k=1$ 的指数哥伦布编码; $\underline{*}$ 表示符号位。

4.2 首 1 游程位平面编码算法

图像数据在进行小波变换及位面提升以后,呈现出能量集中化的效果。此时,其系数可以用带符号的二进制表示,如图 3 所示。小波系数分为 1 个符号位面及若干个数值位面。其中每个系数的最高位面值恒为‘1’,该系数高于此位面的值全为‘0’,此最高位面的‘1’就定义为此系数的从 MSB (Most Significant Bit) 到 LSB (Least Significant Bit) 数的首 1 比特。

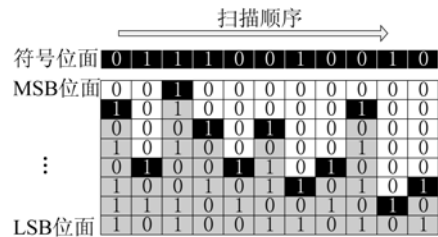


图 3 小波系数的带符号二进制表示

Fig. 3 Binary representation of signed DWT coefficients

在小波系数的带符号二进制表示的基础上,将小波系数分离为两部分:(1)首 1 及其以上位面数据,称为位置数据;(2)首 1 位面以下数据,称为精细数据。

位置数据表示了图像小波变换系数的符号、坐标及首 1 位面号。其最低位面为 1,以上位面全为零,采用本文所提出的带符号自适应二进制游程编码对该部分数据进行编码,只有位置数据正确,精细数据才有可能放到正确的位置上。

精细数据为每个系数中低于首 1 位面的所有位面,选定了小波系数的细化值。这部分数据没有统计集中的特征,对于自然图像来说,类似于随机数据。因此不对精细数据进行熵编码,仅将这些位面连接起来形成码流。

结合以上分析,给出一种首 1 游程位平面编码算法,如图 4 及表 2 所示。

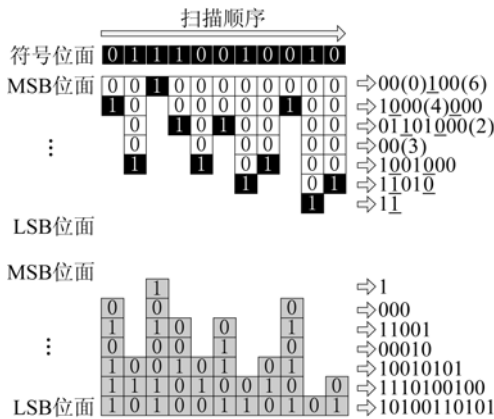


图 4 小波系数的分离及独立编码

Fig. 4 Splitting and independent coding of DWT coefficients

表 2 基于首 1 游程的位平面编码算法

Tab. 2 Bit-plane coding based on run-length of first 1 bit

- 1) 按照 3.1 节所述对图像进行 6 级以上 9-7 整数小波变换;
- 2) 按照 3.2 节所述对小波变换系数进行权值提升;
- 3) 针对权值提升有各子带有效位平面,从小波系数 MSB 到 LSB 循环,将图像数据按照位平面分离为位置数据+精细数据两部分,对于第 i 位面的每个系数遍历执行:
 - a) 如果当前位平面 i 高于或等于当前系数首 1 位平面,那么就是位置数据,利用 4.1 节介绍编码进行该系数 i 位面位置数据编码;输出码流 P_i ;
 - b) 如果当前位平面 i 低于当前系数首 1 位平面,那么就是位置数据,直接将该系数第 i 位面精细数据 bit 输出码流 F_i ;
 - c) 将 P_i 和 F_i 按顺序连接到上一位面编码码流之后。
- 4) 完成编码。

假设小波系数占用 16 个位平面,则上述串行编码方法仅需要对小波系数执行 16 次扫描,即可完成图像数据的编码。

4.3 首 1 游程位平面编码算法的并行化

分析上述给出的基于首 1 游程的位平面编码算法可知,当每个系数在其所在位平面编码时,完全与其它位平面、其它位置系数的数据内容无关,这就是本文算法最大的优势所在。由此不仅大大简化了数据上下文方式,减少了数据访问量,并且使并

行算法的设计非常简单,而且各个位平面并行编码时,还不影响最终码流的渐进式传输特性。这对于追求低功耗、低系统开销、高速高压缩性能的航天应用来说非常可贵。基于串行编码算法中各像素、各位面的无关性,本节给出该算法的位平面间并行编码方法,如图 5 和表 3 所示。

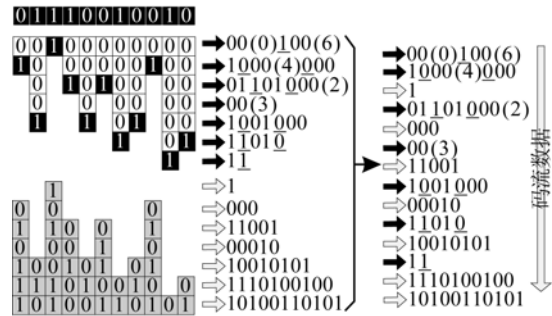


图 5 本文算法位平面间并行编码方式

Fig. 5 Paralleled bit-plane coding mode of proposed algorithm

表 3 基于首 1 游程的位平面间并行编码算法

Tab. 3 Paralleled bit-plane algorithm based on run-length coding of first 1 bit

- 1) 按照 3.1 节所述对图像进行 6 级以上 9-7 整数小波变换;
- 2) 按照 3.2 节所述对小波变换系数进行权值提升;
- 3) 假设小波系数共为 N 个位平面,那么设计 N 个编码器并行,仅对小波系数扫描 1 次,每个编码器并行执行以下操作:
 - a) 第 i 个编码器根据当前输入的小波系数判断:
 - 如果位平面 i 高于或等于当前系数首 1 位平面,那么就是位置数据,利用 4.1 节介绍编码进行该系数 i 位面位置数据编码;输出码流 P_i ;
 - 如果位平面 i 低于当前系数首 1 位平面,那么就是位置数据,直接将该系数第 i 位面精细数据 bit 输出码流 F_i ;
- 4) 完成编码,将 N 个编码器的 $2N$ 个数据码流按照 $P_N \rightarrow F_N \rightarrow P_{N-1} \rightarrow F_{N-1} \rightarrow \dots \rightarrow P_1 \rightarrow F_1$ 的顺序进行传输即可。

4.4 首 1 游程位平面编码算法的计算复杂度分析

相对于 SPIHT、JPEG2000 及 CCSDS 标准算法,本文算法在编码复杂度方面有较大优势。

首先,本文算法仅需对小波系数每个位平面扫描一次,且各个系数、各个位平面间的编码无关,故在硬件实现时,可以很容易地进行位平面间并行编码,达到高速编码,且每个小波系数只扫描 1 遍。

JPEG2000 的位平面编码由 Tier-1 编码及 Tier-2 编码组成。Tier-1 编码阶段建模时需要对小波系数的每个位面进行 3 个通道的扫描(S 通道、M 通道、C 通道),通道扫描时需要访问当前位的周围位,另外 MQ 编码器具有较高计算量,且编码过程是严格串行的,难以实现并行化。

SPIHT 利用小波系数的树结构和链表分类排序原理使得编码逐渐从重要系数到不重要系数、从重要位面向不重要位面进行,其链表操作使得在 FPGA 或 DSP 实现时困难重重或速度较慢^[9],同时低位面的编码是依赖于高位面的编码,较难实现位平面的并行编码。

CCSDS 编码算法需要对位平面进行 5 个 Stage 的编码,因此对每个位平面的每个位进行 5 次扫描建模编码,还利用到子孙节点的数据信息,因此对数据的访问及编码计算量也不小。

表 4 本文算法与其它算法的复杂度比较

Tab. 4 Complexity comparison between proposed algorithm and other mainstream algorithms

算法	本文算法		CCSDS	SPIHT	JPEG2000
	并行	串行			
每像素扫描数	1	16	5×16	4×16	24×16
熵编码	Exp-Golomb	RICE	链表	MQ	

因此,综合来看本文算法在计算量及并行度方面远小于 JPEG2000、SPIHT 及 CCSDS 120.1-B 标准算法。

5 实验与结果

为了验证本文算法的编码性能,采用具有不同复杂度的 6 幅图像进行测试,图像大小为 512×512,8 bpp 灰度图像,如图 6 所示。

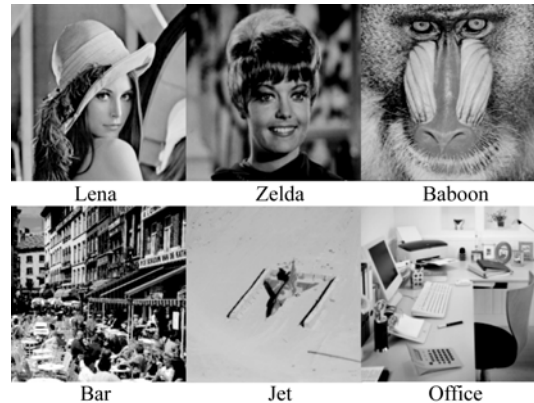


图 6 标准测试图例

Fig. 6 Standard test legends

表 5 无损压缩码率比较

Tab. 5 Comparison of lossless compression bitrate

(bpp)

算法	本文算法	CCSDS	JPEG2000
Lena	4.444	4.404	4.160
Zelda	4.148	4.154	4.009
Baboon	6.177	6.128	6.131
Bar	7.334	7.160	7.126
Jet	3.960	3.909	3.748
Office	3.527	3.442	3.269

从无损压缩性能比较表可以看出,本文算法的无损压缩码率与 CCSDS 算法仅相差 1%,某些图像上无损压缩性能高于 CCSDS;与 JPEG2000 差 6%左右。这是由于 CCSDS 算法采用小波树结构进行编码,有效利用了小波系数的结构关联性;而 JPEG2000 使用了复杂的 EBCOT 位平面+QM 算术编码算法,复杂的上下文建模信息及复杂的 QM 算术编码器,从而达到了较高的压缩性能。

表 6 列出了本文算法与其他优秀算法的比较试验数据,表 6 表明,本文算法具有优于 CCSDS 标准算法的压缩性能,与 JPEG2000 及 SPIHT 算法差距较小。考虑到本文算法的计算复杂度仅为其十几分之一,并且容易实现位平面间的并行化编码,故还是具有明显优势。

表6 有损压缩性能 PSNR 比较

Tab. 6 Comparison of PSNRs of lossy compression performance (dB)

码率/bpp	0.1	0.2	0.4	0.8	1	2
本文算法浮点 97 小波	28.485 1	31.448 7	34.716 6	38.117 4	39.149 6	43.478 5
本文算法整数 97 小波	28.688 2	31.701 2	34.672 6	37.701 5	38.869 2	43.036 0
CCSDS 整数 97 小波	27.161 1	31.578 9	34.589 3	37.533 5	38.319 3	42.546 7
SPIHT 浮点 97 小波	29.32	32.25	35.48	38.71	39.85	44.29
JPEG2000 浮点 97 小波	29.679 0	32.824 1	36.068 7	39.235 1	40.352 8	44.773 8

6 结 论

由于工艺及容错设计的特殊要求,使航天器中的抗辐照处理器、FPGA 的开发在性能、资源及功耗方面受到了极大的约束。针对宇航应用领域对图像压缩算法计算复杂度的敏感性,本文提出一种新颖的基于首1游程的图像位面并行编码算法。该算法创新性地将图像小波系数位面分离为以首1位面为界的包括位置数据及细化数据两部分的系数,位置数据采用一种极简单的自适应带符号二进制游程编码;根据理论分析,细化数据位

间无统计相关性,其无需编码可直接输出原始位。由于剔除了像素间、位面间的数据依赖性,其数据访问次数、编码复杂度方面远远低于目前算法,还具有位面间并行优点可支持高速图像压缩。本文算法是一种内嵌式编码算法,可以截断码流来精确控制压缩比,支持无损及有损压缩,支持码流的渐进性传输。试验表明,该算法无损压缩性能等同于 CCSDS 标准推荐算法,无损压缩性能优于后者。而相比于 CCSDS 推荐算法,本算法具有更精简的计算复杂度、更高的并行度、更好的压缩性能,可以更好地满足宇航应用中高速、高性能、低复杂度、低功耗的要求。

参考文献:

- [1] 吴伟仁. 深空测控通信系统工程与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
WU W R. *Engineering and Technology of Deep Space TT&C System* [M]. Beijing: Publishing House of Science, 2013. (in Chinese)
- [2] 王墨林, 莽思淋, 桑爱军, 等. 彩色图像三维六边形离散余弦变换编码[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 217-223.
WANG M L, MANG S L, SANG A J, *et al.*. Three dimensional hexagonal discrete cosine transform for color image coding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 217-223. (in Chinese)
- [3] 顾晓波. 基于 FPGA 的 JPEG2000 图像压缩芯片测试平台设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
GU X B. *Design and implementation of FPGA based test platform for JPEG2000 image compression chip* [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
- [4] SAID A, PEARLMAN W A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 1995, 41(3): 613-627.
- [5] 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.
XU Y, XU ZH Y, ZHANG Q H, *et al.*. Low complexity image compression scheme for hardware implementation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2262-2268. (in Chinese)
- [6] 孙健, 任国强, 吴钦章. 基于自适应指数哥伦布编码的图像压缩算法[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2973-2979.
SUN J, REN G Q, WU Q ZH. Image compression algorithm based on adaptive exp-Golomb coding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2973-2979. (in Chinese)
- [7] Image Data Compression. Recommendation for Space Data System Standards, CCSDS 122. 0-B-1 [R].

Washington, D. C; CCSDS, 2005.

- [8] 吴乐南. 数据压缩[M]. 第 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2005.

WU L N. *Data Compression* [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in

Chinese)

- [9] CORSONELLO P, PERRI S, ZICARI P. Micro-processor-based FPGA implementation of SPIHT image compression subsystems [J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2005, 29(6): 299-305

作者简介:



徐 勇(1984—),男,云南红河人,博士,工程师,2006年于中国科学技术大学获得学士学位,2011年于中国科学院获得博士学位,主要从事星载硬件设计、图像处理、星载图像压缩及传输算法研究。E-mail: andrexu@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)