

文章编号 1004-924X(2019)01-0191-10

面向深空探测 Bayer 图像的高效编码

雷 杰*, 于露露, 罗晓红, 李云松

(西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要:本文提出一种基于 JPEG2000 标准的 Bayer 图像高性能 RBCR(Remove Bayer Component Relation, RBCR)压缩算法。在 RBCR 压缩算法中,根据 Bayer 图像相关性较高的特点,对 Bayer 图像进行颜色分量分离,得到处理单元子图,对各子图进行 1×4 整型离散余弦变换,降低 Bayer 图像中各颜色分量空间域内的相关性;对变换后的各分量 DCT 系数使用标准 JPEG2000 算法独立完成小波变换、Tier1 编码、MQ 编码和率失真斜率计算等,再基于率失真斜率联合截取方法完成各个分量的码流截取,即使用相同的率失真斜率门限值,按照率失真斜率值由高到低的顺序依次完成所有分量编码码块的码流截取,最后各个分量的截取结果再进行独立的码流组织输出。在 RBCR 算法中通过加入 DCT 变换降低 Bayer 图像相关性和对各个分量码流的率失真斜率联合截取,提高恢复图像质量且精确控制了码率。实验结果表明,RBCR 算法与各个分量独立压缩方法相比,恢复图像质量得到提升,尤其在 4 倍的压缩倍数下效果最佳,峰值信噪比平均提高 1.814 dB,复杂峰值信噪比平均提高 2.414 dB。可以满足深空探测低复杂度和高质量图像的要求。

关键词:图像压缩;Bayer 图像;JPEG2000;深空探测

中图分类号:V19 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20192701.0191

Efficient coding method for deep space detection Bayer pattern image

LEI Jie*, YU Lu-lu, LUO Xiao-hong, LI Yun-song

(State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

* Corresponding author, E-mail: jielei@mail.xidian.edu.cn

Abstract: Based on the JPEG2000 compression framework, an RBCR compression algorithm for Bayer remote sensing images with high quality was proposed in this study. In this algorithm, the color components of the Bayer image were separated, and the processing unit subgraphs were obtained. Each subgraph undergoes a 1×4 integer discrete cosine transform, so the correlation of the four color component space domain in Bayer images was reduced. The JPEG2000 algorithm was used to perform the wavelet transform, Tier1 coding, MQ coding, and rate-distortion slope calculation on the transformed DCT coefficients; subsequently, the code stream interception of each component was completed based on the rate-distortion slope joint interception method. In accordance with the rate-distortion slope values arranged in descending order to complete the code stream interception of all component encoding code blocks, the interception result of each component was finally subjected to the independent stream organization output. In the RBCR algorithm, by adding the DCT transform to reduce the Bayer image

收稿日期:2018-05-08;修订日期:2018-07-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61502367, No. 61501346, No. 61701360, No. 61571345, No. 91538101);
高等学校学科创新引智基地项目资助(No. B08038);陕西省自然科学基金基础研究计划项目资助(No. 2016JQ6023, No. 2016JQ6018)

correlation and intercepting the rate-distortion slope of each component stream, the recovery image quality was improved and the code rate is accurately controlled. The experimental results show that, compared with each component independent compression method, the RBCR algorithm has improved image quality. At 4 times the compression ratio, the peak signal-to-noise ratio increased by an average of 1.814 dB, and the signal-to-noise ratio increased by an average of 2.414 dB, which meets the requirements of low computational complexity and high image quality for deep space detection.

Key words: image compression; Bayer pattern image; JPEG2000; deep space exploration

1 引言

自 1958 年美国和前苏联启动探月计划开始, 众多航天技术大国先后开展了多种类型的深空探测活动, 包括 110 多次探月活动, 40 多次探测火星活动。尤其进入 21 世纪后, 世界航天大国纷纷制定下一步火星探测计划^[1-4], 深空探测成为全球关注的焦点^[5]。对深空探测的目的主要是获取和分析探测器传回的各类信息, 以获得对未知领域的探索和求解。图像作为信息的载体之一, 在深空探测工程中有着不可或缺的作用。相比于传统的黑白图像, 彩色图像内容更丰富, 包含的信息量也更大, 对深空探测的发展有着重要的意义, 如“勇气号”(Spirit)和“机遇号”(Opportunity)携带的 Pancam 相机就是彩色立体摄像机^[6]，“火星快车”(Mars-Express)中高分辨率立体相机是一个立体彩色九线探测器扫描仪器^[7]。但相同尺寸下, 彩色图像的存储空间要 3 倍于黑白图像, 这对深空探测中有限的信道传输和存储能力都提出很大挑战。

Bayer 格式^[8]很好地解决了这个问题, 通过 Bayer 彩色滤波阵列 (Color Filter Array, CFA) 获得的图像颜色信息量只是原彩色图像的 1/3, 后续只需通过插值估计即可恢复成全彩色图像, 如美国 2011 年发射的“好奇号”(Curiosity)手持透镜成像仪 (MAHLI) 就是通过 Bayer 格式获取彩色图像^[9]。但随着图像传感器技术快速发展, 帧率高、质量好、分辨率高的图像在 Bayer 模式下传输仍超过了信道带宽, 如 Curiosity 有 17 台相机, 全部配备 $1\ 600 \times 1\ 200$ pixel CCD 传感器, Curiosity 每天只能传输 31.25 MB 的数据到地球, 一个月连 1 GB 数据都传输不到。所以必须对图像数据进行压缩, 降低功耗, 以满足图像数据的空间传输和存储要求。2003 年日本发射的

Beagle2 采用是 SPIHT 算法^[10], 一种基于小波变换的压缩算法; Curiosity 采用的是标准 JPEG 压缩算法^[9]。

现有的对 Bayer 格式图像的压缩编码很多是在各颜色分量分离后对各颜色分量数据进行独立编码^[11], 或完成颜色分量变换后统一压缩编码^[12-14], 或先完成颜色分量变换, 再分离各颜色分量后进行独立编码^[15-16], 这些研究均未考虑分量间的相关性。而相邻像素在物理空间上是具有相似性的, 这也决定了 Bayer 图像各颜色分量间存在空间相关性。文献^[17]虽然利用了各颜色分量间的相关性, 但该算法不能精确控制码率, 不适用于对压缩码率精度要求高的深空探测。且考虑到深空通信距离远, 所处环境恶劣, 因此, 所选压缩算法必须具有良好的抗误码能力。

2000 年, JPEG 图像压缩标准委员会确认了彩色静态图像的新一代编码方式 JPEG2000^[18-19] 图像压缩标准的编码算法, 相比原始的 JPEG 标准, 不仅提高了传输速度, 而且提升了图像品质, 因而在众多图像压缩领域取得了广泛应用^[20-21]。如土耳其发射的 BILSAT-1 卫星和中国发射的神州七号载人飞船的伴飞卫星均采用 JPEG2000 压缩算法。

结合深空探测对重构图像质量和算法鲁棒性的要求, 本文通过加入图像变换和在标准 JPEG2000 算法的码流率失真斜率截取基础上做改进, 提出一种适合 Bayer 遥感图像的 RBCR 压缩算法, 降低 Bayer 图像各颜色分量的相关性且提升压缩编码后的码率控制精度及压缩性能。在 4 倍的压缩倍数下, 与各个分量独立压缩方法相比, 所提出的图像压缩算法在增加很少计算复杂度前提下, 重构图像获得了平均 1.814 dB 的峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 提升和 2.414 dB 的复杂/合峰值信噪比 (Composite Peak Signal to Noise Ratio, CPSNR) 提升。

2 算法原理分析

2.1 Bayer 图像特性分析

Bayer 图像的每个像素点只采集 R、G 和 B 三基色中的一种颜色光的亮度。由于人眼对绿色更敏感,所以在 Bayer 图像中,G 分量数量是 B 和 R 的两倍。对于 2×2 的像素矩阵而言,4 个相邻像素是存在空间相关性的,即分量间存在空间相关性。为验证 Bayer 图像各分量间的相关性,先对 Bayer 图像进行颜色分量分离,如图 1 所示,看成 4 个子图像,将 4 种颜色分量记为 R、G0、G1 和 B。

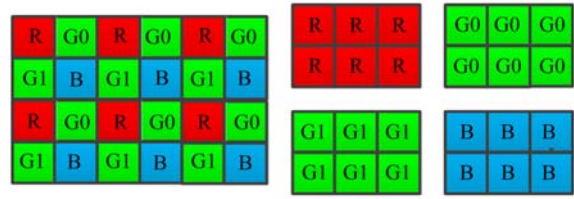


图 1 Bayer 图像颜色分离
Fig. 1 Bayer image separation

通过互相关系数 $c(f, g)$ 衡量各子图之间的相关性,定义如式(1):

$$C(f, g) = \frac{\sum_{x=0}^W \sum_{y=0}^H [f(x, y) - U_f][g(x, y) - U_g]}{\sqrt{\sum_{x=0}^W \sum_{y=0}^H [f(x, y) - U_f]^2} \times \sqrt{\sum_{x=0}^W \sum_{y=0}^H [g(x, y) - U_g]^2}}, \quad (1)$$

式中: (f, g) 是两个不同的子图像, $f(x, y)$ 是子图像 f 在空间坐标为 (x, y) 处的像素值, W 和 H 是图像的宽和高, U_a 表示图像 a 的灰度平均值,即:

$$U_a = \frac{1}{W \times H} \sum_{x=0}^W \sum_{y=0}^H a(x, y). \quad (2)$$

本文选取 5 组 Bayer 格式的遥感图,测试各分量子图之间的相关性系数,实验结果如表 1 所示。

表 1 Bayer 各子图像间的相关性

Tab. 1 Correlation between sub images of Bayer image

相关性	1	2	3	4	5
$c(G0, G1)$	0.949	0.941	0.941	0.871	0.945
$c(G0, R)$	0.953	0.949	0.950	0.891	0.935
$c(G0, B)$	0.963	0.959	0.958	0.903	0.948
$c(R, B)$	0.935	0.932	0.928	0.834	0.933
$c(G1, R)$	0.956	0.954	0.954	0.904	0.943
$c(G1, B)$	0.962	0.957	0.955	0.903	0.956
平均值	0.953	0.949	0.948	0.884	0.943

从表 1 可看出,各子图像间的互相关系数平均值都保持在 0.884 以上,存在较高的相关性。即 Bayer 图像各颜色分量之间存在高度相关性。为了解决因颜色分量间高的相关性带来的数据冗

余问题,采取去相关的分量变换,减少数据间的冗余度,从而提高压缩效率。

2.2 分量变换

由 2.1 节可知,Bayer 图像分量间存在较强的相关性,通过分量变换降低相关性使数据进一步压缩。目前,常见的变换有很多种,如哈尔(Haar)变换、离散余弦变换、离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)变换等。

Haar 是一种最简单又可以反应出时变频谱的表示方法。哈尔函数是由 Haar 提出的一种正交完备函数系,是一种既反映整体又反映局部的函数,它是小波变换中的典型小波,Haar 变换是小波变换中最简单的一种变换。通过变换之后产生的细节系数的幅度值比较小,图像变换过程中变换系数不够集中,相关性降低效果不够明显。

离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)是变换编码中最成熟和最典型的代表,作为准最优变换,已被证明是在一阶马氏过程下 K-L 变换的一种特例,因其具有很好的去相关特性和能量集中特性,且算法复杂度低、实现简单,而被应用于多种压缩标准中^[25-27]。如 JPEG^[28]、MPEG1/2/4^[29] 和 H. 261/3/4^[30-31]。

DWT 变换作为一种新的变换分析方法,继承和发展了短时傅立叶变换局部化的思想,同时

又克服了窗口大小不随频率变化等缺点。在双正交小波和完全可恢复滤波器组的理论上,采用 9/7 或 5/3 小波变换的提升实现,分解和合成滤波器计算其小波系数。而基于 Bayer 图像分离 4 个子图的特性,9/7 或 5/3 小波变换的滤波器个数不满足选择条件。

为验证图像变换降低图像相关性的性能,本文将 Haar 变换与 DCT 变换作对比,对同一组 Bayer 图像在同种压缩算法下对比两种变换下的重构图像的 PSNR 结果如表 2 所示。

表 2 基于两种变换压缩算法的 PSNR 比较

Tab. 2 PSNR of two compression algorithms

Ratio	3	4	8	12	16
DCT 变换	60.706	55.302	47.446	44.632	41.802
Haar 变换	58.762	54.128	46.468	43.822	41.642
ΔPSNR	1.944	1.174	0.978	0.810	0.160

由表 2 可知,DCT 变换后重构图像的质量高于 Haar 变换,在低压缩比下效果尤为明显。故本文采用 DCT 变换降低 Bayer 图像颜色分量间的相关性。

一维 DCT 的公式如式(3)所示:

$$F(k) = 2 \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos \left[\frac{\pi(2n+1)k}{2N} \right], 0 \leq k \leq N-1, \quad (3)$$

其中: $x(n)$ 是输入的数据序列,序列长度为 N 。

由式(3)可知 DCT 变换后的结果是浮点数,会对计算结果产生不可逆误差。因此本文采用易于硬件实现且无损的 1×4 整型 DCT 变换降低 Bayer 图像 4 个子图像之间的相关性。 1×4 整型 DCT 结构框架^[32]如图 2。

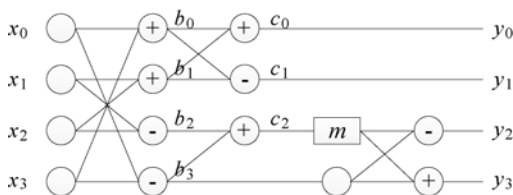


图 2 1×4 整型 DCT 示意图

Fig. 2 1×4 integer DCT

图 2 中 $\{x_i\}$ 是输入数据, $\{b_i\}$ 和 $\{c_i\}$ 是变换过程中的中间值, $\{y_i\}$ 是变换结果, m 是修正因子。

对分量图使用 DCT 变换,将空间的图像数据变换到变换域中,从而降低空间相关性,同时对变换域系数采用适当的编码方式,完成图像数据压缩。

2.3 压缩算法分析

由于深空探测在信道传输和存储上有一定的限制,需要对图像进行压缩、降低功耗,同时考虑到深空通信的距离较长,所选压缩算法必须具备良好的抗误码能力。

在编码算法选择上,SPIHT 算法在静止图像压缩编码领域,是公认的编码效率相对较高的算法之一,能够在较低的比率下实现较好的压缩效果,但有时会丢失一些细节信息,重构图像质量效果不够理想,在码流传输出现误差时,效果会下滑的更加明显,抗误码性能设计的鲁棒性相对不理想。

JPEG2000 标准提供了一个新的特征,在编码时采用了 EBCOT 算法,该算法是一种非常有效的小波系数位平面编码方法。EBCOT 算法没有使用 SPIHT 中的零树结构(EZW)编码而使用编码块,这种方式使块内的错误不会扩展到其他块中,能够防止误差扩散;同时加入“压缩后率失真优化”,使码率控制的更加精准,对误码的鲁棒性是很合理的。为验证该算法的抗误码性能,本文将 SPIHT 算法与 JPEG2000 算法做对比,对同一组 Bayer 遥感图的压缩码流做误码处理后再解压缩,重构图像的 PSNR 结果如表 3 所示。

表 3 两种压缩算法的 PSNR 比较

Tab. 3 PSNR of two compression algorithms

Ratio	3	4	8	12	16
JPEG2000	58.960	53.478	45.800	43.214	41.704
SPIHT	48.658	46.830	43.048	41.246	39.744
ΔPSNR	10.302	6.648	2.752	1.968	1.960

从表 3 可知,当传输码流出现误码时,尤其是在高码率传输的情况下,JPEG2000 的重构图像质量明显比 SPIHT 高。故选择 JPEG2000 压缩算法更适用于深空探测中图像的压缩。

2.4 JPEG2000 算法简介

JPEG2000 编码器结构如下图 3 所示。

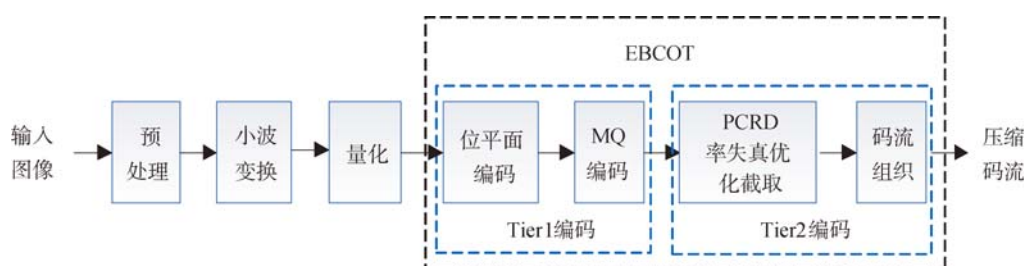


图 3 JPEG2000 编码器结构

Fig. 3 Structure of JPEG2000 encoder

其中关键模块有:

(a) 图像预处理

图像预处理包括图像分片处理、电平移位和颜色分量的变换。其中图像分片是将输入图像分割成互不重叠大小相等的矩形块;电平移位是将无符号值变为关于零点对称的有符号值;

(b) 离散小波变换

采用提升小波快速算法对每个 Tile 进行离散小波变换,从而产生一个低频带系数 LL 和多个高频带系数 HL、LH 和 HH,这种方法具有速度快、运算复杂度低,所需的存储空间少的特点,同时得到的小波系数与使用传统小波变换结果相同。

(c) 量化

量化是有损压缩中重要的一个环节,每个 Tile 经过 N 级小波分解后得到 $(3N+1)$ 个子带,对每个子带的小波系数采用不同的量化步长进行量化,进一步提高图像压缩效率。

(d) 熵编码

JPEG2000 标准采用改进的 EBCOT 算法(带有最优截断的嵌入式块编码)进一步消除数据间的统计相关性。该算法包括两部分: Tier1 编码和 Tier2 编码,其中 Tier1 编码将量化小波系数划分为小的码块,以码块为单位完成内嵌比特平面编码和基于上下文的 MQ 编码,生成各码块的嵌入式码流; Tier2 编码主要完成码流的率失真优化截取、分层、打包和组织生成 JPEG2000 标准码流。

(e) 率失真优化截取

率失真优化的目的是管理比特率。若目标码流比特率确定,率失真优化保证最大化重构图像质量;若重构图像质量确定,率失真优化保证最小化码流比特率。JPEG2000 标准算法中 Tier2 编码使用的压缩后率失真优化(Post Compression

Rate Distortion Optimization, PCRD)^[10] 是进行这种优化过程中最常见的方法,该算法通过率失真斜率进行优化截取,从而保证每个截取点恢复的图像的 PSNR 在该点对应的码率是最佳的。

图像经 DCT 变换去除各颜色分量相关性,进而经过 JPEG2000 算法有效压缩。JPEG2000 采用的码率控制算法能精确控制码率的一个重要前提是目标码率已经限定,而经变换及压缩后各子图像所含信息量不均等,使 Tier2 编码中所需利用的重要性信息不明确影响率失真斜率截取导致码率控制不准确。本文针对上述问题改进 PCRD 方法提出压缩后联合率失真优化(Post Compression Joint Rate Distortion Optimization, PCJRD)方法来提升码率控制精度。

本文在 JPEG2000 框架基础上加入 DCT 变换,同时改进 Tier2 编码中码流率失真斜率截取方式,提出基于 JPEG2000 标准的 Bayer 图像高性能 RBCR(Remove Bayer Component Relation, RBCR)压缩算法,提高压缩性能。

3 RBCR 压缩算法

针对 Bayer 图像颜色分量间存在较强相关性的特点,本文首先对输入 Bayer 图像做预处理,包括将各颜色分量分离为 4 个子图像、图像分片和电平移位,进而利用 1×4 整型 DCT 变换降低 4 个子图像间的相关性,对变换后的各分量量子图的 DCT 系数使用标准 JPEG2000 算法独立完成小波变换、Tier1 编码、MQ 编码和率失真斜率计算等,再基于 PCJRD 方法完成各个分量的码流截取,即使用相同的率失真斜率门限值,按照率失真斜率值由高到低的顺序依次完成所有分量编码码块的码流截取,最后各个分量的截取结果再进行独立的码流组织输出。RBCR 压缩算法结构图如图 4 所示。

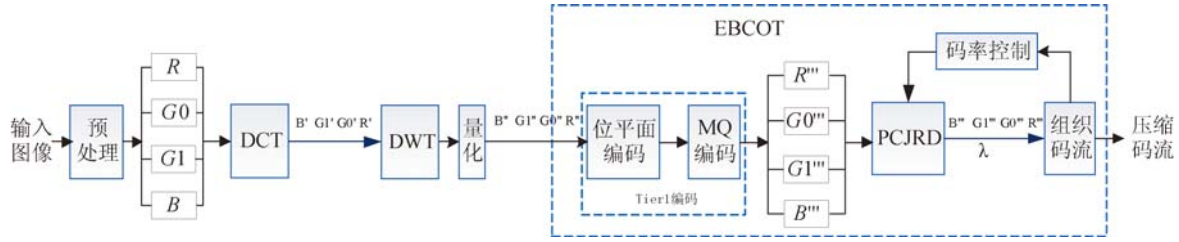


图 4 RBCR 压缩算法的结构框图

Fig. 4 Structure of RBCR compression algorithm

RBCR 压缩算法具体描述如下:

步骤 1: 图像预处理, 首先对输入 Bayer 图像完成电平移位和图像分片 (Tiling) 处理, 并记图像分片后的矩形块为 Tile, 然后分离 Tile 的颜色分量 R, G0, G1 和 B 为 4 个子图像。

步骤 2: 对 R, G0, G1 和 B 4 个子图像统一进行整型离散余弦变换, 具体而言, 即采用一维整型快速 DCT 变换。抽取 4 个子图像在相同位置上的像素点, 组成 1×4 的像素块, 记为 $\{x(0), x(1), x(2), x(3)\}$, 对该像素块进行一维整型 DCT 变换。记 $\{y_i(0), y_i(1), y_i(2), y_i(3)\}$ 为第 i 步变换后得到的中间值, 将变换结果 $\{y(0), y(1), y(2), y(3)\}$ 放回每个子图像抽取时的原位置。变换过程可以用式 (4) 和式 (5) 来表示:

$$\begin{cases} y_0(0) = x(0) + x(3) \\ y_0(1) = x(1) + x(2) \\ y_0(2) = x(0) - x(3) \\ y_0(3) = x(1) - x(2) \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} y(0) = y_0(0) + y_0(1) \\ y(1) = y_0(0) - y_0(1) \\ y(2) = (ay_0(2) + by_0(3))/c \\ y(3) = (by_0(2) - ay_0(3))/c \end{cases}, \quad (5)$$

其中 a/c 和 b/c 是旋转因子, 本文选值分别为 $5/4$ 和 $2/4$ 。

经过整型 DCT 后, 4 个子图像的重要性信息都被集中到了 R' 子图像中, 实现重要性信息的分离。

步骤 3: 对 $R', G0', G1'$ 和 B' 依次进行 $9/7$ 小波变换和量化, 量化后的子图像分别记为 $R'', G0'', G1''$ 和 B'' 。

步骤 4: Tier1 编码, 依次对 $R'', G0'', G1''$ 和 B''

这 4 个子图像进行 Tier1 编码, 并记录 Tier2 编码所需的相关参数。

步骤 5: PCJRD 优化方法, 因经 DCT 变换后各子图像所含信息量不均等, 通过提出的压缩后联合率失真 (PCJRD) 方法优化, 即 4 个子图像做完 Tier1 编码后, 对每个子图像编码后的码流, 不是以单个子图像为单位进行率失真优化, 而是以 4 个子图像为单位, 联合进行率失真优化获得最佳 λ_{opt} 。具体而言, 设 4 个子图像总的目标码率为 R_{max} , 第 m 个子图像的 B_i 码块在 Tier1 编码产生的内嵌比特流的码率截止到图像的总码率 R 和总失真度 D 的计算公式如式 (6) 和式 (7):

$$R = \sum_{m=1}^4 \sum_i R_{m_i}^{m_i}, \quad (6)$$

$$D = \sum_{m=1}^4 \sum_i D_{m_i}^{m_i}. \quad (7)$$

率失真优化的目标是在 $R \leq R_{max}$ 的限制条件下, 找到 4 组截取点 m_{n_i} 使 D 最小, 可以通过 Lagrange 算法解决该条件极值问题:

$$L = D + \lambda R = \sum_{m=1}^4 \sum_i (D_{m_i}^{m_i} + \lambda R_{m_i}^{m_i}). \quad (8)$$

对式 (8) 最小化的问题, 可以归结为单个码块的最小化问题, 即对于第 m 个子图像的 B_i 找到截取点 m_{n_i} , 使得 $(D_{m_i}^{m_i} + \lambda R_{m_i}^{m_i})$ 最小, 在 m_{n_i} 点处, 率失真的斜率为:

$$S_{m_i}^{m_i} = \frac{\Delta D_{m_i}^{m_i}}{\Delta R_{m_i}^{m_i}} = \frac{D_{m_i}^{m_i-1} - D_{m_i}^{m_i}}{R_{m_i}^{m_i} - R_{m_i}^{m_i-1}}. \quad (9)$$

由式 (9) 可知, $S_{m_i}^{m_i}$ 应该是随 $\Delta D_{m_i}^{m_i}$ 的减小严格单调递减的。通过调整 λ 值, 使得 $\frac{1}{\lambda} < (S_{m_i}^{m_i})$, 此时 λ 即最优的 λ_{opt} 。其中 $(S_{m_i}^{m_i})_{max}$ 是 4 个子图像所有码块 $S_{m_i}^{m_i}$ 的最大值。

根据得到的 λ_{opt} , 选取每个子图像对应的截取点 m_{n_i} 。

步骤 6: 按照 JPEG2000 标准的码流组织, 根据步骤 5 得到的截取点 m_{n_i} , 完成 m 子图像的压缩码流打包和组织, 并输出压缩码流。

步骤 7: 输出所有 Tile 的最终压缩码流。

本文算法利用 DCT 对图像的能量聚集的特性, 降低 Bayer 图 4 个子图像间的相关性, 更有利于后续的熵编码; 在 Tier2 编码中使用 PCJRD 方法实现 4 个子图像的率失真统一优化。在压缩码流长度保持在一定范围内时, 可更大程度地提高压缩效率。

4 性能测试与结果分析

本文选取了 5 组比特深度为 12 bit 的 Bayer 遥感图像作为测试图像, 分辨率为 3072×3072 。在不同压缩比下, 分别对单分量独立进行 JPEG2000 压缩(这里记为算法 1)和本文提出的 RBCR 压缩算法进行了实验, 检验改进算法的有效性。

本文采用峰值信噪比 N_{PSNR} 反映重构 Bayer 图与原 Bayer 图的差异, 计算公式如式(10)所示, 其中 $I_{in}(i, j)$ 是 (i, j) 处的输入图像值, $I_{out}(i, j)$ 是

对应的重构图像值:

$$N_{PSNR} = 10 \lg \left[\frac{4 \cdot 095^2}{WH \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H [I_{in}(i, j) - I_{out}(i, j)]^2} \right] \quad (10)$$

用 Bilinear Interpolation 内插算法实现彩色复原, 选用复合峰值信噪比 N_{CPSNR} 反映最终观测图像(彩色图像)质量^[19], 公式如式图像的总码率 R 和总失真度 D 的计算公式如式(11)和(12)所示。其中 $I_{in}(i, j, k)$ 是 k 分量在 (i, j) 处的输入图像值, $I_{out}(i, j, k)$ 是对应重构图像的值:

$$N_{CPSNR} = 10 \lg \left[\frac{4 \cdot 095^2}{CMSE} \right], \quad (11)$$

其中:

$$CMSE = \frac{1}{3WH} \sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H [I_{in}(i, j, k) - I_{out}(i, j, k)]^2 \quad (12)$$

选用压缩率 CR 反映压缩算法的码率控制精度, 计算公式如式(13), 其中 bpp 是每个像素所用的位数, $Rate$ 是实际压缩码流的字节数。

$$CR = 1 - \frac{8 \times Rate}{WH \times bpp} \quad (13)$$

实验结果如表 4~表 6。

表 4 两种压缩算法的 PSNR 比较

Tab. 4 Comparison of PSNR with two compression algorithms

Ratio	3	4	6	8	12	14	16
RBCR 算法	60.706	55.302	50.042	47.446	44.632	43.318	41.802
算法 1	59.008	53.488	48.258	45.804	43.208	42.422	41.742
$\Delta PSNR/dB$	1.698	1.814	1.784	1.642 0	1.424	0.896	0.060

表 5 两种压缩算法的 CPSNR 比较

Tab. 5 Comparison of CPSNR with two compression algorithms

Ratio	3	4	6	8	12	14	16
RBCR 算法	57.409	52.103	46.946	44.285	41.335	39.794	38.252
算法 1	54.990	49.689	44.563	42.006	39.336	38.494	37.767
$\Delta CPSNR/dB$	2.419	2.414	2.383	2.279	1.999	1.300	0.485

表 6 两种压缩算法的 CR 比较

Tab. 6 Comparison of CR with two compression algorithms

(%)

Ratio	3	4	6	8	12	14	16
RBCR 算法	65.79	74.33	82.84	87.10	91.40	92.62	93.53
算法 1	65.86	74.24	82.81	87.09	91.38	92.61	93.52
Δ CR	-0.09	0.09	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01

由表 4、表 5 的数据可以看出,在实验的各压缩倍数下,与单分量独立编码相比,本文设计的 RBCR 压缩算法在保证精确控制码率的同时,PSNR 值平均提高了 1.3 dB,CPSNR 平均提高了 1.9 dB。尤其是在高码率传输情况下,RBCR 压缩方法能获得更好的图像质量。

由表 6 的数据可以看出,无论在低码率和高码率下,RBCR 算法 Tier2 模块中的联合率失真优化方法均比码率平均分配效果好,CR 平均提高 0.015%。在压缩倍数确定情况下,提高编码性能。

综上实验结果表明,本文所提出的 RBCR 算法符合深空探测对图像压缩的要求,充分体现了本文提出算法的意义。

5 结 论

本文在 JPEG2000 压缩框架上,提出一种旨在提高 Bayer 遥感图像质量的 RBCR 压缩算法。首先,Bayer 格式遥感图像各颜色分量间存在较强的相关性,为获得良好的压缩效果,必须降低颜

色分量间相关性。针对特定的序列长度为 4 的输入信号,可以利用易于硬件实现的 DCT 变换,在空间域减少 Bayer 格式图像颜色分量间的冗余信息。其次,当传输码流出现误码时,尤其是在高码率传输的情况下,JPEG2000 可以获得较高的有损压缩性能,具有良好的抗误码能力,适用于深空探测的有限带宽及远距离传输。因此,使用基于 JPEG2000 改进的 RBCR 算法进行压缩编码是十分可行的。最后,针对 DCT 变换后 Bayer 图像颜色分量间信息量不均等问题,提出的 RBCR 算法在 Tier2 编码中利用联合率失真优化截取输出 4 个分量的压缩码流,提升恢复图像质量且更加精准控制码率。基于实验结果表明,本文提出的 RBCR 压缩算法,与各个分量独立压缩方法相比,在各压缩倍数下对重构的 Bayer 图像质量有可观提升,尤其在 4 倍的压缩倍数情况下,峰值信噪比平均提高 1.814 dB,复杂峰值信噪比平均提高 2.414 dB,满足深空探测的要求。进一步优化算法中的 MQ 编码器的编码方式,将网络结构与图像编码方法结合,获取更高的图像编码效率及图像质量是本文进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] KAWAGUCHI J, LAURINI K C, HUFENBACH B, *et al.*. Global space exploration policies and plans: insights from developing the isecg global exploration roadmap[C]. *International Astronautical Congress*, 2011:237-240.
- [2] KATHLEEN C. LAURINI, WILLIAM H. GERSTENMAIER. *The Global Exploration Roadmap and its significance for NASA*[M]. *Space Policy* 2014,30(3): 149-155.
- [3] *Vision and Voyages for Planetary Science in the Decade 2013-2022*[M]. Committee on the Planetary Science Decadal Survey, Space Studies Board, Division on Engineering and Physical Sciences, National Research Council, 2011.
- [4] YU D Y, SUN Z Z, MENG L Z, *et al.*. The development process and prospects for Mars exploration [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, 3 (2): 108-113.
- [5] WU WEIREN, YU DENG YUN. Development of deep space exploration and its future key technologies [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, 1(3):5-13.
- [6] BELL J F, SQUYRES S W, HERKENHOFF K E, *et al.*. Mars exploration rover athena panoramic camera (pancam) investigation[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2003, 108 (12)

- 433-439.
- [7] GWINNER K, SCHOLTEN F, PREUSKER F, *et al.*. Topography of Mars from global mapping by HRSC high-resolution digital terrain models and orthoimages: Characteristics and performance [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2010, 294(3): 506-519.
- [8] PENG WANG, RAJESH MENON. Ultra-high-sensitivity color imaging via a transparent diffractive-filter array and computational optics [J]. 2015, 2(11): 933-939.
- [9] MALIN MC, RAVINE MA, CAPLINGER MA, *et al.*. The Mars Science Laboratory (MSL) mast cameras and descent imager: investigation and instrument descriptions[J]. *Earth Space Sci*, 2017, 4(8): 506-539.
- [10] RUEFFER P, BORRMANN A. Versatile image data compression for the Beagle 2 probe[C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2003. IGARSS '03. *Proceedings*. 2003 IEEE International. IEEE, 2003:1823-1825.
- [11] YAQIONG Y, RUIBIN Z, CAICHENG S. JPEG2000 compression and decompression system based on Bayer image[J]. 2013 IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2013, 2: 938-942.
- [12] 贾松敏, 李柏杨, 张国梁. 采用混合回环检测与闭环优化的 TSDF 地图创建[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(6): 1497-1506.
- JIA S M, LI B Y, ZHANG G L. TSDF map building based on hybrid loopback detection and closed-loop optimization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(6): 1497-1506. (in Chinese)
- [13] XIE S Z, WANG C Y, YANG Z Q. Image compression using wavelet transform with lifting scheme and SPIHT in digital cameras for Bayer CFA[C]. *International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*. IEEE, 2013: 163-167.
- [14] LARABI M C. A JPEG-like algorithm for compression of single-sensor camera image[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2011, 7876(3): 298-306.
- [15] 张宁, 冯书谊, 濮建福, 等. 多光谱遥感图像 CCSDS 动态码率控制无损压缩[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6): 1783-1790.
- ZHANG N, FENG SH W, PU J F, *et al.*. Dynamic rate control for CCSDS nearly lossless compression of multispectral remote image[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1783-1790. (in Chinese)
- [16] XIE S, WANG C, YANG Z. Bayer patterned image compression based on APIDCBT-JPEG and all phase IDCT interpolation[J]. 2013 IEEE Third International Conference on Information Science and Technology (ICIST), 2013, 3: 23-25.
- [17] GU Y, JIANG H, XIE X, *et al.*. An image compression algorithm for wireless endoscopy and its ASIC implementation[J]. 2016 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS), 2016, 10: 103-106.
- [18] TAUBMAN D. High performance scalable image compression with EBCOT[J]. *IEEE Trans Image Process*, 2000, 9(7): 1158-1170.
- [19] TAUBMAN D S, MARCELLIN M W. JPEG2000: Image compression fundamentals, standards and practice [J]. *Springer International*, 2002, 11(2): 286.
- [20] TRENSCHEL T, BRETSCHNEIDER T, LEEDHAM G. Using JPEG2000 on-board mini-satellites for image-driven compression[C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2003. IGARSS '03. *Proceedings*. 2003 IEEE International. IEEE, 2003: 2033-2035.
- [21] 张红颖, 李灿锋. 结合特征在线选择与协方差矩阵的压缩跟踪算法[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4): 1051-1059.
- ZHANG H Y, LI C F. Compressive tracking algorithm combining online feature selection with covariance matrix[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 1051-1059. (in Chinese)
- [22] 王敏敏, 孙胜利. 并行压缩成像系统的压缩域小目标检测[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10): 2549-2556.
- WANG M M, SUN SH L. Small target detection in compressed domain for parallel compression imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 2549-2556. (in Chinese)
- [23] BISIO I, LAVAGETTO F, MARCHESE M. *Comparative Analysis of Image Compression Algorithms for Deep Space Communications Systems* [M]. Berlin: Personal Satellite Services. Springer Berlin Heidelberg, 2010: 63-73.
- [24] FISCHER C E, MULLER D, MOORTEL I D.

- JPEG2000 image compression on solar EUV images[J]. *Solar Physics*, 2017, 292(1):16.
- [25] XIE S, WANG C, YANG Z. Bayer patterned image compression based on APIDCBT-JPEG and all phase IDCT interpolation[J]. *2013 IEEE Third International Conference on Information Science and Technology (ICIST)*, 2013.
- [26] BOUGUEZEL S, AHMAD M O, SWAMY M N S. A low-complexity parametric transform for image compression[C]. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. IEEE, 2011:2145-2148.
- [27] CINTRA R J, BAYER F M. A DCT approximation for image compression[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2011, 18(10):579-582.
- [28] ROMA N, SOUSA L. Efficient hybrid DCT-domain algorithm for video spatial downscaling[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2007, 2007(1): 57291-57307.
- [29] LIU G, YAN G, ZHAO S, *et al.*. A complexity-efficient and one-pass image compression algorithm for wireless capsule endoscopy [J]. *Technol Health Care*, 2015, 23(2): 239-247.
- [30] RIJKSE K. H. 263: video coding for low-bit-rate communication[J]. *IEEE Communications Magazine*, 1996, 34(12):42-45.
- [31] JV TEAM. Draft ITU-T Recommendation and Final draft international standard of joint video specification[J]. ITU-T Rec. H. 264 and ISO/IEC 14496-10 AVC, 2003.
- [32] ARAI Y, AGUI T, NAKAJIMA M. A fast DCT-SQ scheme for images[C]. *Trans. IEICE*, 1988: 1095-1097.
- [33] SWELDENS W. The Lifting Scheme: A custom-design construction of biorthogonal wavelets[J]. *Applied & Computational Harmonic Analysis*, 1996, 3(2):186-200.

作者简介:



雷杰(1981—),男,陕西渭南人,副教授,分别于2003年、2006年和2010年在西安电子科技大学获得电子信息工程专业学士学位、通信与信息系统专业硕士学位和信号与信息处理专业博士学位。主要研究方向是图像视频处理、传输与编码。E-mail: jielei@mail.xidian.edu.cn



于露露(1992—),女,黑龙江绥化,硕士,硕士研究生,2016年于西安电子科技大学获得学士学位,现为西安电子科技大学通信工程学院硕士研究生,主要从事图像编码方面的研究。E-mail: 1012861865@qq.com