

文章编号 1004-924X(2015)06-1783-08

多光谱遥感图像 CCSDS 动态码率控制近无损压缩

张 宁^{1*}, 冯书谊¹, 濮建福¹, 沈 霁¹, 吴红松¹, 李 贤¹, 张 雷²

(1. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109;

2. 沈阳航空航天大学, 辽宁 沈阳 110013)

摘要:基于空间数据系统咨询委员会(CCSDS-123.0-B-1)推荐的多光谱图像无损压缩算法,提出了一种前向自适应调整量化步长的码率控制方法以实现定码率近无损压缩。介绍了 CCSDS 标准的预测方法,分析了 Golomb-Rice 编码的上界与下界的范围。通过分析预测误差均值与压缩比的对应关系,建立了均值与压缩比之间近似线性映射曲线。根据预测误差均值,前向自适应估计量化步长,初步控制 Golomb-Rice 码长。考虑到星载条件下多光谱图像码率控制策略,通过压缩比反馈微调整量化步长,实现压缩码率的精确控制。最后总结了 CCSDS 多光谱近无损压缩码率控制流程。实验结果表明, k 值(Golomb 编码变量)的分布区域稳定,在 4:1 压缩时,本文方法的峰值信噪比(PSNR)平均为 60.42 dB,比单谱段 JPEG2000、差分 JPEG-LS 压缩等方法提高了 5.51 dB 和 2.89 dB。实验显示本文方法码率控制准确,易于硬件实现,适合航天工程使用。

关键词:多光谱图像;遥感图像;近无损压缩;空间数据系统咨询委员会(CCSDS)标准;码率控制

中图分类号:TP751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152306.1783

Dynamic rate control for CCSDS nearly lossless compression of multispectral remote image

ZHANG Ning^{1*}, FENG Shu-yi¹, PU Jian-fu¹, SHEN Ji¹, WU Hong-song¹, LI Xian¹, ZHANG Lei²

(1. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110013, China)

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

Abstract: On the basis of CCSDS-123.0-B-1 lossless compression algorithm of multi-spectral image recommended by the Consultative Committee for Space Data Systems(CCSDS), a rate control method of forward adaptive quantifying step size was proposed to achieve the nearly lossless compression with a fixed rate. The prediction method of CCSDS was introduced and the ranges of the upper bound and lower bound of Golomb-Rice coding were analyzed. By analyzing the relationship between prediction error and the compression rate, their approximate linear mapping curves were established. According to the mean value of prediction error, the quantization step size was adaptively estimated and the Golomb-Rice coding length was preliminarily controlled. In addition, taking the multi-spectral image rate control strategy under spaceborne conditions into account, the compression code rate was precisely controlled by fine tuning the quantization step size according to the feedback of compression

收稿日期:2014-10-28;修订日期:2014-12-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61072135)

rate. At last, the processes of CCSDS nearly lossless compression rate control method was presented. The experiment results show that distribution area of k (Golomb coding variables) is stable. At the compression rate of 4 : 1, the Peak Signal to Noise Ratio(PSNR)from the proposed method is 60.42 dB averagely, which is increased by 5.51 dB and 2.89 dB as compared with those from JPEG2000 and differential JPEG-LS methods respectively. The rate control method is accurate, easy to be implemented in hardware and suitable for aerospace engineering.

Key words: multispectral image; remote sensing image; nearly lossless compression; standard of Consultative Committee for Space Data Systems(CCSDS); code rate control

1 引言

随着成像光谱仪技术的发展,多、高光谱航天遥感的数据量增长迅速,因此对图像压缩提出了较高的要求。在星载条件下,由于图像源的特征不同,图像无损压缩的输出码率往往也不同,这样就会增加星上数据管理的难度。例如按照空间数据系统咨询委员会(Consultative Committee for Space Data Systems,CCSDS)提出的高级在轨系统(Advanced Orbit System,AOS)^[1]进行压缩数据打包下行时,由于压缩比不同,数据包个数也不同。如果压缩比大,则需要对数据包内进行无效数据填充,否则就需要在星上进行数据包缓存,造成较大的资源开销。控制压缩比时,往往采用有损压缩,以实现较为精确的码流控制。

多光谱图像压缩算法多种多样,对其归纳可分为两类:一类可归纳为预测编码方法,另外一类可归纳为变换编码方法。在进行无损或近无损压缩时,采用预测编码方法的效果要明显好于采用变换编码方法^[2-5]。采用预测的多光谱压缩方法中性能较高的几种算法分别是基于查表的方法,LUT(Look-up Table)算法,及其改进 LAIS-LUT算法,基于聚类预测的方法 C-DPCM-10、C-DPCM-20。由于过于复杂或者不具有普适性等原因,上述算法并不适合在星载条件下使用^[6-8]。

B. Kiely 在 FL(Fast Lossless)算法基础上制定了 CCSDS 多光谱压缩标准^[5-6]。由于 CCSDS 多光谱压缩算法是无损压缩,并没有码率控制设计,在固定速率的数传信道中难以实现稳定可靠的传输。预测编码的有损算法由于量化的固有缺陷存在压缩码流控制的难度,较难实现精确压缩

比控制,目前预测编码主要是针对 JPEG-LS 算法的有损压缩。JPEG-LS 算法进行低压缩比有损压缩时,需固定量化值,该方法无法精确控制压缩比,但其可通过对已编码数据进行实时统计,根据反馈信息,动态调整待编码图像的量化参数^[9-10]。

本文针对多光谱图像的特点,设计了基于 CCSDS 算法的近无损压缩码率控制方法。

2 CCSDS 多光谱压缩方法简介

针对多、高光谱无损压缩,CCSDS 于 2012 年首次发布了无损压缩标准。该标准是基于预测编码方法设计的,其压缩性能较高,且适应性较强,其采用的 FL 算法思想^[7]是基于自适应预测压缩,运用符号自适应滤波及局部均值等。该方法框架如图 1 所示。



图 1 CCSDS 算法原理框图

Fig. 1 Block diagram of CCSDS algorithm

首先介绍预测器,其中预测值 d_k 用来估计输入的向量 u_k ,估计值 \hat{d}_k 是 u_k 的线性函数,定义为 $\hat{d}_k = w_k^T u_k$,此处的 w_k^T 是滤波器权系数。一般情况下,选择 $d_k = s(x, y, z)$,对应的 u_k 如式(1)所示:

$$u_k = [s(x-1, y, z), s(x, y-1, z), s(x, y, z-1)]^T. \quad (1)$$

但该方法并不理想,通过采用局部均值减法后, d_k 如下式所示:

$$d_k = s(x, y, z) - \tilde{s}(x, y, z), \quad (2)$$

$$u_k = \begin{bmatrix} s(x-1, y, z) - \tilde{s}(x, y, z) \\ s(x-1, y-1, z) - \tilde{s}(x, y, z) \\ s(x, y-1, z) - \tilde{s}(x, y, z) \\ s(x, y, z-1) - \tilde{s}(x, y, z-1) \\ s(x, y, z-2) - \tilde{s}(x, y, z-2) \\ s(x, y, z-3) - \tilde{s}(x, y, z-3) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中: $\tilde{s}(x, y, z)$ 是空间像素的局部均值, 并作为初始估计值。

当计算出估计值 \hat{d}_k 后, 估计值与期望值之间的预测误差为:

$$e_k = \hat{d}_k - d_k. \quad (4)$$

该误差值可用于更新权率系数, 对于 LMS 算法有:

$$w_{k+1} = w_k - \mu \cdot u_k \cdot e_k. \quad (5)$$

对于符号自适应算法有:

$$w_{k+1} = w_k - \mu \cdot u_k \cdot \text{sgn}(e_k), \quad (6)$$

其中: μ 是一个标量值, 用于控制递归速度和误差稳定性。

经过预测器得到的预测误差还需要进行 Golomb-Rice 编码, 形成压缩码流, 对于经过误差预测后的数据, 采用与 JPEG-LS 算法中相似的 Golomb-Rice 编码方法。该算法采用的 k 值^[13] 选取方法与 JPEG-LS 不同, 其中 k 值是 Golomb 编码变量, k 值与上下文有关, JPEG-LS 算法则是通过预测后的上下文更新, CCSDS 中的 k 值是通过自适应统计选取^[11-12]。下面将分析 Golomb-Rice 编码的性能。

3 Golomb-Rice 编码方法性能分析

Golomb-Rice 编码受 k 值的影响, 其 Golomb 编码的上下界难以确定。通过测试发现, k 值变化幅度有限, 往往趋于稳定, 因此可以假设 k 值近似为固定值, 这样就可以确定 Golomb 码的上下界。

由于对预测误差进行了非负数映射, Golomb 码为非负整数。任意分布下具有有限均值的平均码长 Golomb 码的上下界及使 Golomb 码达到最低上下界的参数的计算公式如下^[13-14]:

参数 $l(l \in \mathbf{N}^+)$ 的 Golomb 码为:

$$G_l = \left\{ g_l(i); g_l(i) = \left[\left[\frac{i-1}{l} \right] + 1 \right] B_l((i-1) \bmod l), \right. \\ \left. l(l \in \mathbf{N}^+) \right\}. \quad (7)$$

对于一个给定的信源 S , 其均值 $\mu_p < \infty$, 则对于任意 $l(l \in \mathbf{N}^+)$ 有:

$$LB_G(l, \mu_p) \leq \overline{I_p(G_l)} \leq UB_G(l, \mu_p), \quad (8)$$

式中: $LB_G(l, \mu_p)$ 为码长下界, $UB_G(l, \mu_p)$ 为码长上界。

$$LB_G(l, \mu_p) = \lceil \log l \rceil + \frac{\mu_p - 2^{\lceil \log l \rceil}}{l} + 1, \quad (9)$$

$$UB_G(l, \mu_p) = \lceil \log l \rceil + \frac{\mu_p - 2^{\lceil \log l \rceil} - 1}{l} + 2. \quad (10)$$

下界 $LB_G(l, \mu_p)$ 在 $l_0 = 2^{\lfloor \log \mu_p \rfloor}$ 有最小值, 下界值:

$$LB_G(l, \mu_p) = \log \mu_p. \quad (11)$$

上界在 $l_1 = 2^{\lfloor \log \max\{\mu_p - 1, 1\} \rfloor}$ 处, 有:

$$UB_G(l, \mu_p) < \log \max\{\mu_p - 1, 1\} + 2. \quad (12)$$

同时由于 k 取值范围为 $2^k \in (\min(\mu_{p1} \cdots \mu_{pn}), \max(\mu_{p1} \cdots \mu_{pn}))$, 其中 μ_{pn} 为分段均值, 则有:

$$UB_G(l, \mu_p) < \log \max\{\mu_p - 2^k, 1\} + k + 2, \quad (13)$$

$$LB_G(l, \mu_p) > k. \quad (14)$$

4 CCSDS 的压缩控制算法

在对基于预测的近无损压缩算法进行设计时, 一般采用的方法是根据输出码流的压缩比, 调节量化步长以控制压缩比。存在的主要问题^[15] 是通过输出码流计算压缩比会造成量化调整滞后, 量化误差较大, 量化步长震荡等。本文根据 Golomb-Rice 编码器的特点, 提出一种码率控制方法, 该方法步长稳定, 控制精确。

4.1 预测误差均值与压缩比映射分析

选择大量多光谱图像进行测试, 图像源为 4 个谱段 14 bit 的图像, 经过预测器后, 预测误差映射值与压缩比之间的对应关系如表 1 所示。

从表 1 可以看出, 输出预测均值与压缩比之间满足式(13)、式(14), 且有近似线性的对应关系, 图 2 为预测误差均值和压缩比的拟合曲线。

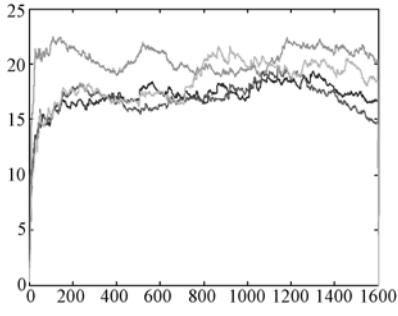
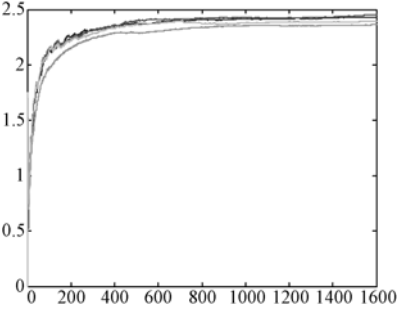
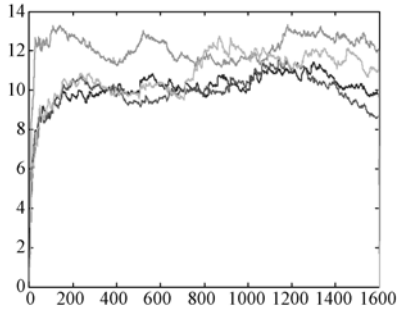
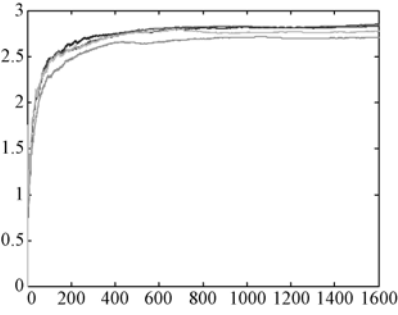
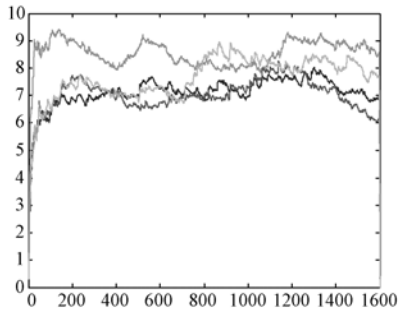
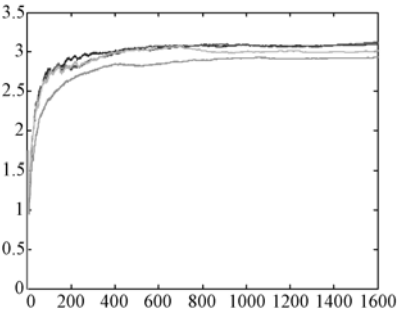
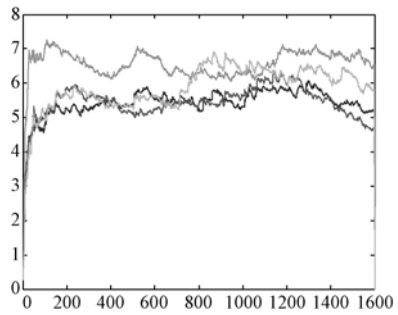
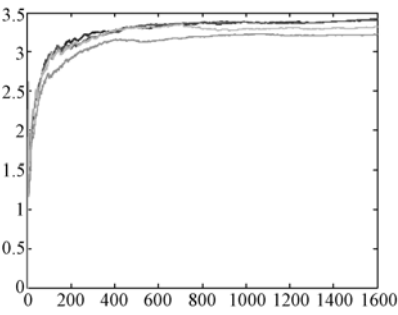
4.2 通过预测误差均值进行自适应量化

Golomb-Rice 是对估计值与期望值之间的预测误差 e_k 进行编码, 先计算 k 值, 再将误差进行 k 值移位, 再计算移位后的平均值。然后按照平均值与 Golomb 编码长度的对应关系设置量化值。例如对 14 bit 光谱数据进行 2:1 压缩时, 即要求输出平均码长为 7 bit。当光谱数据经过预测器后, 输出的预测误差经过非负值映射, 根据式(8)、

(14)可知, 编码下界 $LB_G(l, \mu_p)$ 小于等于 7, 即 $k = 64$ 。当均值 $\mu_p = 64$ 时, 根据式(13)知, 编码上界为 $UB_G(l, \mu_p) = 0 + k + 2 = 8$, 即上界码长为 8。

表 1 预测误差与压缩比曲线

Tab.1 Curves of prediction error and compression ratio

序号	预测误差输出曲线	预测误差均值	四谱段压缩比变化曲线	4 个谱段的压缩比
1		21.1 19.8 17.9 17.2		2.36 2.39 2.43 2.45
2		12.4 11.5 10.1 9.7		2.70 2.77 2.82 2.84
3		8.8 8.1 7.2 7.0		2.92 3.00 3.09 3.11
4		6.7 6.1 5.2 4.8		3.22 3.31 3.41 3.42

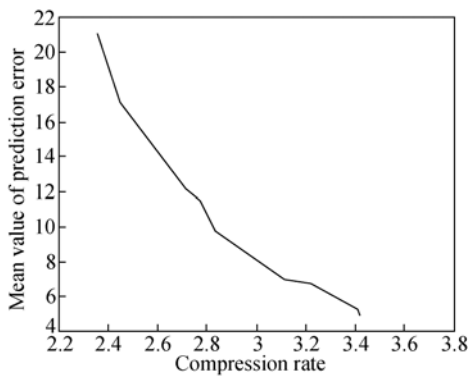


图 2 预测误差均值与压缩比映射曲线

Fig. 2 Mapping curve of mean value of prediction error and compression ratio

通过分析可知,只要对预测误差的平均值进行量化控制,就基本控制了输出码长,进而避免了以往通过负反馈控制压缩比的过程^[15],从而能有效控制压缩比及输出后的码流量化误差的分布。

由于上述步骤中仅能实现压缩比的粗略控制,需要进一步通过压缩比对量化步长进行微调,即依据失真控制参数-压缩比函数的近似线性关系,向靠近目标压缩比的方向增加或减小一个固定的步长 step,也就是相应地增大或减小量化值,本文算法选取 step=1。若当前压缩比的平均值距目标压缩比偏离相对较小时,调节步长 step 可以设置的相应小一些,此时,实际码率曲线前端收敛速度较慢,但量化波动较小。第一帧微调步长 step=0。

4.3 不同谱段压缩比控制

4.3.1 不同谱段的压缩比控制

由于 CCSDS 是对多光谱进行压缩的,不同谱段的图像熵不同,其均值也不同。这样就会存在如下解决方案:一是要求各个谱段压缩比相同,即要求各个谱段均输出相同压缩比的码流;二是要各个谱段输出的量化范围一定,总的压缩比固定,这样就会使各个谱段输出压缩比不同。

星载条件下,压缩算法应考虑到光谱仪载荷的研制,即考虑光谱仪载荷的暗电流噪声及动态非线性影响,在进行近无损压缩时,策略二的方式更可取。

4.3.2 压缩比范围的限制

变换编码方式能够实现较大的压缩比控制,而预测编码方式的压缩比范围有限。通过对

CCSDS 编码的压缩比进行控制的式(13)、(14)可以推出压缩比有极限范围,如 14 bit 图像,压缩比极限约为码长的 14/3,即压缩比不大于 4.6。因此在用 CCSDS 算法进行大压缩比压缩时(一般超过 4.5 : 1),算法性能会下降,本文算法适用于近无损压缩。

4.4 CCSDS 压缩码率控制流程

在 CCSDS-123.0-B-1 规范中,多光谱图像压缩首先进行谱内谱间联合预测,计算预测值,然后预测符号映射、k 值估计以及预测误差 k 值移位,最后进行 Golomb-Rice 编码输出。码率控制流程图如图 3 所示。

本文通过分析 Golomb-Rice 编码器特点,根据 CCSDS 预测误差值和输出码流的联合控制压缩比,针对 CCSDS 的近无损压缩过程,实现码率精确可控。在进行压缩比控制时,根据预测误差均值和 Golomb 编码长度,在编码前初步估计量化步长。若压缩比偏离设定值,再对量化步长进行微调,然后输出量化步长和 Golomb-Rice 编码。具体的调节方法如图 3 所示。需要强调的是:编码过程是可逆的,不需要增加额外的辅助数据开销。

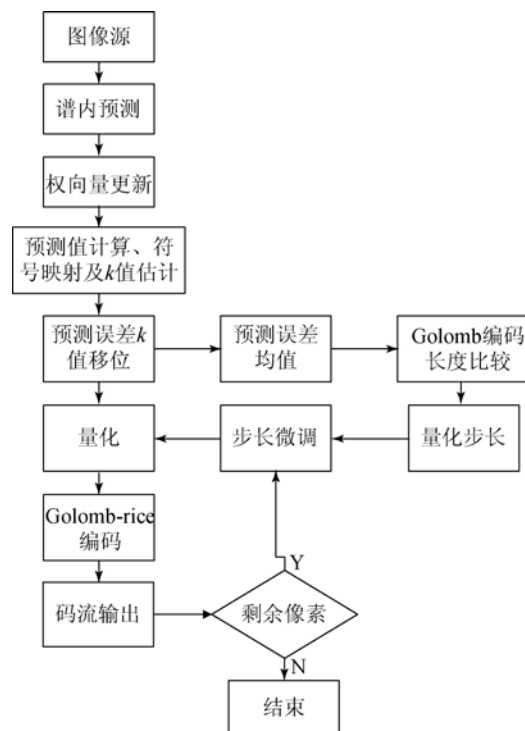


图 3 CCSDS 压缩码率控制流程

Fig. 3 Control procedures of CCSDS compression rate

5 实验与结论

5.1 k 值变化情况实验

在分析 Golomb-Rice 编码方法性能分析时,是在 k 值稳定的条件下进行的,图 4 是对 k 值的取值进行统计的结果。可知, 2^k 的范围为 16~32,从而求出 k 为 4,且无变化。因此满足 k 值趋于稳定的假设结论。

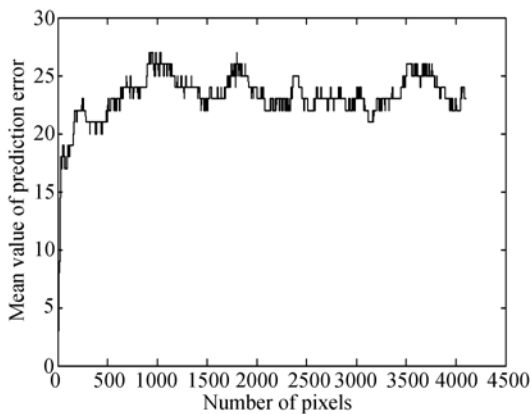


图 4 k 值变化情况
Fig. 4 Changes of k value

5.2 4 : 1 压缩比测试实验

选取 EO-1 的 ALI 光谱 12 bit 的图像,这里仅选取 ALI 图像中的 4 个谱段,分别是 B、G、R 和可见近红外谱段(NIR)进行测试。对图像进行 4 : 1

压缩,首先利用式(13)、式(14)确定均值范围,选取预测误差均值与微调压缩比,最终使量化步长稳定,并按照各个谱段采用相同的量化步长,使总的压缩比控制为 4 : 1。各谱段压缩比控制变化过程如图 5 所示。

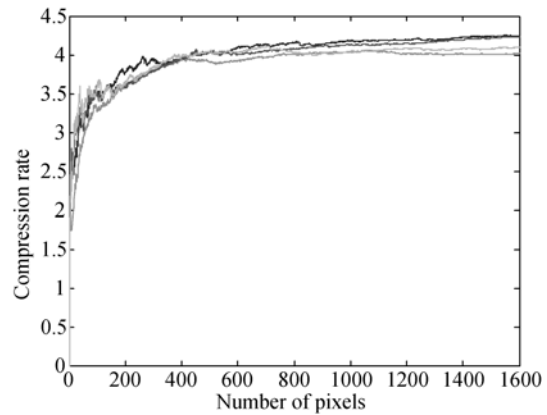


图 5 平均压缩比为 4 : 1 时各谱段压缩比控制情况
Fig. 5 Compression ratio of each spectral at average compression ratio of 4 : 1

目前多光谱图像近无损压缩常用方法为单谱段 JPEG2000、差分 JPEG-LS。本文采用它们与本文所提算法进行比较。其中差分 JPEG-LS 采用谱间自适应差分,谱内编码采用 JPEG-LS,量化过程采用反馈控制压缩比^[15]。表 2 中分别是原始图像(a)、JPEG2000 压缩图像(b)、差分 JPEG-LS 压缩图像(c)、CCSDS 压缩图像(d)。

表 2 本文方法、差分 JPEG-LS、JPEG2000 的 4 : 1 压缩结果对比

Tab. 2 Result comparison of proposed method, Differential JPEG-LS and JPEG2000 at compression ratio of 4 : 1

	原始图像(a)	JPEG2000(b)	差分 JPEG-LS(c)	本文方法(d)
NIR				
RGB				

由于压缩比较小,在进行4:1压缩时,图像的视觉效果很接近,难以区分。几种方法的峰值信噪比(PSNR)如表3所示。由表3可知,在进行4:1压缩时,本文算法性能明显高于JPEG2000和差分JPEG-LS算法。

表3 本文方法与JPEG2000、差分JPEG-LS的PSNR对比

Tab. 3. Comparison of PSNRs for JPEG2000, Differential JPEG-LS and proposed method (dB)

Methods	B	G	R	NIR	Average
JPEG2000	55.47	54.22	54.76	55.19	54.91
差分 JPEG-LS	57.98	56.84	57.48	57.80	57.53
本文方法	61.05	60.24	60.16	60.21	60.42

参考文献:

- [1] CCSDS. *Lossless Multispectral & Hyperspectral Image Compression, Recommendation for Space Data Systems Standards* [S]. CCSDS 123. 0-B-1, Blue Book, Issue 1, Washington DC, 2012.
- [2] 王军. 基于谱间和帧内差分脉冲编码调制的超光谱图像无损压缩[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 863-867. WANG J. Hyper-spectral image lossless compression based in spectral DPCM and intra-DPCM [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 863-867. (in Chinese)
- [3] 杜小平, 刘明, 夏鲁瑞, 等. 基于光谱角累加的高光谱图像异常检测算法[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 325-331. DU X P, LIU M, XIA L R, *et al.*. Anomaly detection algorithm for hyperspectral imagery based on summation of spectral angles [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 325-331. (in Chinese)
- [4] 尹传历, 李嘉全. 基于位平面的嵌入式超光谱图像压缩系统[J]. 液晶与显示, 2013, 27(2): 245-249. YIN CH L, LI J Q. Embedded hyper-spectral image compression system based on bit-plane [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 27(2): 245-249. (in Chinese)
- [5] 殷亚男, 王晓东, 李丙玉. 基于预测和JPEG2000的MODIS红外辐射多光谱图像无损压缩算法研究[J]. 液晶与显示, 2013, 28(6): 922-926. YIN Y N, WANG X D, LI B Y. Lossless compression method based on prediction and JPEG2000 for MODIS emissive IR bands multispectral image [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(6): 922-926. (in Chinese)
- [6] 宋金伟, 张忠伟, 陈晓敏. 利用线性预测与查表法的高光谱图像压缩[J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 2201-2208. SONG J W, ZHANG ZH W, CHEN X M. Hyper-spectral imagery compression via linear prediction and lookup tables [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8): 2201-2208. (in Chinese)
- [7] 汤毅, 辛勤, 李纲, 等. 基于内容的高光谱图像无损压缩[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 668-674. TANG Y, XIN Q, LI G, *et al.*. Lossless compression of hyperspectral images based on contents [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 668-674. (in Chinese)
- [8] 刘春香, 郭永飞, 李宁, 等. 星上多通道遥感图像的实时合成压缩[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 445-453. LIU CH X, GUO Y F, LI N, *et al.*. Composition and compression of satellite multi-channel remote sensing images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 445-453. (in Chinese)
- [9] RANES D, SAPIRO G. Evaluation of JPEG-LS, the new lossless and controlled-lossy still image compression standard, for compression of high-resolution elevation data [J]. *IEEE Trans. On Geosci. Remote Sens.*, 2001, 39(10): 2298-2306.
- [10] Technology-Lossless and near-lossless compression

6 结 论

本文在CCSDS多光谱图像无损压缩算法的基础上,结合多光谱图像的特点,提出了一种前向自适应调整量化步长的码率控制方法。该方法可实现定码率近无损压缩,码率控制精准,易于硬件实现。文中首先分析了Golomb-Rice编码的上界与下界的范围,通过分析预测误差均值与压缩比的对应关系,建立起均值与压缩比之间近似线性映射关系;然后根据预测误差均值,前向自适应估计量化步长,初步控制Golomb-Rice码长;最后通过压缩比反馈对量化步长进行微调,实现压缩码率的精确控制。实验结果表明,在进行4:1压缩时,本文方法的峰值信噪比(PSNR)平均为60.42 dB,与单谱段JPEG2000、差分JPEG-LS压缩相比,PSNR分别提高了5.51和2.89 dB。

- of continuous-tone still images-Baseline [S]. ISO/IEC International Standard, 1999.
- [11] KIELY A B. Exploiting calibration-induced artifacts in lossless compression of hyperspectral imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8).
- [12] KIELY AB, XU M S, SONG W ZH, *et al.*. Adaptive linear filtering compression on realtime sensor networks [C]. *Seventh Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, Percom*, 2009.
- [13] KLIMESH M. Low-complexity lossless compression of hyperspectral imagery via adaptive filtering [J]. *IPN Progress Report*, 2005; 42-163 November 15, 2005.
- [14] 杨胜天, 仇佩亮. 任意概率分布下 Golomb 码和扩展 Gamma 码的性能分析 [J]. *电子与信息学报*, 2005, 27(4): 514-518.
YANG SH T, QIU P L. Performance analysis of Golomb codes and extended Gamma codes for arbitrary probability distributions [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(4): 514-518. (in Chinese)
- [15] 徐燕凌, 刘 蓓. JPEG-LS 图像压缩动态码率控制策略 [J]. *计算机工程*, 2008, 34(7): 238-239.
XU Y L, LIU B. Dynamic rate control scheme for JPEG-LS image compression [J]. *Computer Engineering*, 2008, 34(7): 238-239. (in Chinese)

作者简介:



张 宁(1982—),男,山东济宁人,高级工程师,工学博士,2006 年于吉林大学获得学士学位,2012 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要研究方向为图像处理、星载电子学等领域。E-mail: dzs_zhangning@163.com



冯书谊(1984—),男,湖南岳阳人,高级工程师,2009 于上海交通大学获得硕士学位,主要研究方向为星载图像压缩、基带数字信号处理领域。E-mail: feng_shu_yi@aliyun.com

(版权所有 未经许可 不得转载)