

文章编号:1007-2780(2013)06-0922-05

基于预测和 JPEG2000 的 MODIS 红外辐射多光谱图像无损压缩算法

殷亚男^{1,2}, 王晓东^{1*}, 李丙玉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 ynyin@mail.ustc.edu.cn;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了能够有效地对 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectral Radiometer)红外辐射多光谱图像进行压缩, 提出了一种基于预测和 JPEG2000 的无损压缩算法。首先计算 MODIS 数据的谱间 Pearson 相关系数, 根据得到的相关系数构造出相关系数图。根据谱间相关系数的大小设定阈值以确定图像是直接压缩还是预测后再压缩。根据得到的阈值及对预测起始波段的要求修改相关系数图。然后使用 Prim 算法计算修改后相关系数图的最小生成树, 据此对各波段进行一阶线性预测。最后使用 JPEG2000 算法对残差图像和未预测图像进行压缩。对 MODIS 红外辐射多光谱图像进行了实验, 并与线性序列的算法进行比较。结果显示, 提出的算法压缩比相对线性预测序列有了显著提高, 说明该算法对 MODIS 红外辐射多光谱图像是有效的。

关 键 词: MODIS 数据; 最小生成树; 一阶线性预测; JPEG2000; 无损压缩

中图分类号: TN919.81

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20132806.0922

Lossless Compression Method Based on Prediction and JPEG2000 for MODIS Emissive IR Bands Multispectral Image

YIN Ya-nan^{1,2}, WANG Xiao-dong^{1*}, LI Bing-yu¹

(1. Changchun Institute of Optical, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China, E-mail ynyin@mail.ustc.edu.cn;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to effectively compressive MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectral Radiometer) emissive IR bands multispectral image, a lossless compression method based on prediction and JPEG2000 was proposed in this paper. Firstly, the Pearson correlation between spectrums in MODIS data was calculated, and then a graph was built according to the coefficient acquired. Whether the current band was compressed directly or not was determined by the threshold setting according to the correlation coefficient. The threshold and requirements to the starting band was used to modify the graph. The MST was established with Prim algorithm, and all bands were predicted with first-order linear predictor and the tree. The residual errors of predicted bands and those compressed directly were all encoded by JPEG2000. Experiments were performed for the MODIS emissive IR bands multispectral image. The experimental results shows that the compression ratio of the proposed algorithm can be significantly improved compared with algorithms with linear sequence.

Key words: MODIS data; MST; first-order linear predictor; JPEG2000; lossless compression

收稿日期: 2013-06-28; 修订日期: 2013-08-08

作者简介: 殷亚男(1987—), 男, 江苏南通人, 硕士, 研究方向为空间光学传感器成像技术与图像处理。

* 通信联系人, E-mail: wangxd@ciomp.ac.cn

1 引 言

多光谱成像对地球遥感和地理信息系统等领域具有重要作用。随着技术的发展,多光谱图像谱间和空间分辨能力快速提高。大量的多光谱图像数据给传输和存储带来了不小的困难,因此对多光谱图像数据进行有效的压缩变得越来越迫切。获取多光谱图像通常需要昂贵的代价,而且图像还要用来进一步分析处理研究,所以我们使用无损压缩技术对图像进行压缩,以确保在压缩的过程中不丢失任何的有用信息。

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectral Radiometer)是新一代的极地卫星多光谱成像传感器,它通过 Terra 和 Aqua 两颗卫星提供包括可见光和红外在内的 36 个波段的多光谱图像。其中红外辐射波段谱结构的复杂性对当今的无损数据压缩提出了挑战,因为他们在相关程度上比反射波段要低。比如对 AIRS(Atmospheric Infrared Sounder)等高光谱探测器来说,大量的通道是产生大量数据的主要原因。使用聚类^[1]等方法在特定的波段可以进行有效的无损压缩。可是当辐射通道的数目相对空间解析度较小的时候,比如 MODIS 的 16 个红外辐射通道,这个技术就显得没那么有效了^[2]。

为了在先进的压缩算法上有效地削减谱间冗余信息,本文提出了一种基于线性预测和 JPEG2000^[3]的无损压缩算法。该算法首先计算 MODIS 红外辐射波段图像的谱间相关系数。通过对相关系数和预测代价的分析,设置一个阈值。当相关系数大于此阈值时,则通过预测的方法来压缩此波段的图像;当相关系数小于此阈值时,则对图像直接压缩。然后根据相关系数和阈值对各波段的图像进行重排序。最后使用 JPEG2000 图像压缩算法对预测残差图像和原始图像进行压缩。对 MODIS 的 16 个红外辐射波段图像的实验验证说明了此算法的有效性。

2 MODIS 数据

MODIS^[4]是搭载在 TERRA 和 AQUA 两颗卫星上的中分辨率成像光谱仪。TERRA 和 AQUA 卫星都是太阳同步极地轨道卫星,TERRA 在地方时上午过境,AQUA 在地方时下午过境。由 MODIS 获取的数据对实时地球观测、应

急处理和日内频率的地球系统研究有非常重要的实用价值。MODIS 被设计成 36 个波段,波长范围在 0.4~14.4 μm ,辐射测量灵敏度高达 12 位。其中有 2 个波段分辨率是 250 m,5 个波段是 500 m,其余 29 个波段是 1 000 m。MODIS 的 36 个连续波段的成像被分为 4 组:可见光(VIS)、近红外(NIR)、短波和中波红外(SWIR/MWIR)、长波红外(LWIR)。表 1 对 MODIS 的 16 个红外辐射波段进行了简单的介绍。

表 1 MODIS 的红外辐射波段
Table 1 MODIS IR emissive channels

波段序号	波段宽度/ μm	光谱灵敏度/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{Sr}^{-1})$
20	3.660~3.840	0.45(300 K)
21	3.929~3.989	2.38(335 K)
22	3.929~3.989	0.67(300 K)
23	4.020~4.080	0.79(300 K)
24	4.433~4.498	0.17(250 K)
25	4.482~4.549	0.59(275 K)
27	6.535~6.895	1.16(240 K)
28	7.175~7.475	2.18(250 K)
29	8.400~8.700	9.58(300 K)
30	9.580~9.880	3.69(250 K)
31	10.780~11.280	9.55(300 K)
32	11.770~12.270	8.94(300 K)
33	13.185~13.485	4.52(260 K)
34	13.485~13.785	3.76(250 K)
35	13.785~14.085	3.11(240 K)
36	14.085~14.385	2.08(220 K)

3 压缩算法

每当给定一个波段顺序后,我们的算法通过 JPEG2000 去除第一个波段的空空间相关性。接着,使用线性预测器根据前一个波段预测后一个波段。预测器的参数根据预测序列中相邻的波段计算得到。然后,存储预测残差和对应的两个波段的预测参数。最后使用 JPEG2000 压缩残差图像和不预测的图像。我们使用 Jasper 库进行 JPEG2000 压缩。

3.1 相关系数计算

在概率论和统计学里,相关性(通过计算相关系数得到)表明两个随机变量之间线性关系的强

度和方向。一般情况下,MODIS 相邻波段的谱间相关性是不一样的^[5]。如果我们根据不同的谱间相关性将各波段的预测顺序重新排列,那么就可以提高压缩比。因此,在确定预测序列之前,我们应该先计算各波段之间的相关系数。最常用的

是皮尔逊(Pearson)积差相关系数(Pearson product-moment correlation coefficient),其定义是两个变量的协方差除以两个变量的标准差。给定两个波段的图像 X 和 Y ,大小均为 $M \times N$,则两者的谱间相关系数:

$$H_{xy} = \frac{MN \sum \sum X_{ij} Y_{ij} - \sum \sum X_{ij} \sum \sum Y_{ij}}{\sqrt{[MN \sum \sum X_{ij}^2 - (\sum \sum X_{ij})^2] \times [MN \sum \sum Y_{ij}^2 - (\sum \sum Y_{ij})^2]}} \quad (1)$$

图 1 显示了一组 MODIS 图像序列中的 16 个红外辐射波段的相关系数矩阵。我们注意到第 7 波段(对应表 1 的波段序号 27)和其他所有波段之间的线性相关非常弱。而其他波段之间的线性相关性都较强。

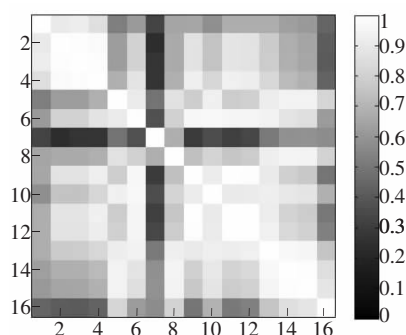


图 1 一组 MODIS 图像序列的相关系数矩阵

Fig. 1 Correlation coefficient matrix for a sample of MODIS granules

3.2 预测序列优化

因为 MODIS 相邻波段的谱间相关性是不一样的,所以确定一个好的预测序列对压缩性能的提高是很重要的^[6]。而且对于一个特定的波段,如果它和别的波段的相关性都很弱(比如图 1 中的波段 7)又或者存在大量的噪声,那么我们对其进行预测后可能效果很小,甚至引起数据量膨胀,而且还增加了预测时间。对于这种情况,预测并不是最优的,即我们可以对图像进行直接压缩。所以我们设定一个阈值 M ,当谱间相关系数大于 M 时,使用预测的方法得到残差图像后对残差图像压缩;当某个波段与其他波段间的相关系数小于 M 时,则该波段的图像不进行预测而直接压缩。通过对大量的 MODIS 图像序列进行分析我们发现,最优的 M 值会随着图像序列变化,但基本都围绕 0.8 上下小幅波动, M 取 0.8 时,大部

分数据块都可以找到最好的压缩序列。

这里使用图论的方法来说明找到最优预测序列的方法。如果将波段看作图 G 的顶点 V ,将各个波段之间的连线看作边 E ,边两端的两个波段的相关系数定义为边的权值 $w(i, j)$,那么我们的任务就是找到 G 的最小生成树(MST, Minimum Spanning Tree)。为了更方便地从 G 中找到能直接用来预测的最小生成树,我们需要对 G 进行如下处理:

(1)给 G 增加一个虚拟的顶点“0”,它和其他所有顶点均有边的连接,所有连接顶点“0”的边的权值均满足 $w(0, j) = w(i, 0) = M$ 。

(2)设波段 k 直接压缩后的数据大小为 $S(k)$,找到使得 $S(k)$ 最小且不为(1)中小于阈值 M 的波段 k^* 。令 $w(0, k^*) = w(k^*, 0) = 1$ 。即选择压缩比最高的波段作为起始波段。

由(1)(2)两步所构造的新图称为图 G' 。

Prim 算法,又称“边割法”,是一种常用的构造最小生成树的算法。这里使用 Prim 算法构造图 G' 的最小生成树。图 2 是对应于图 1 的一组

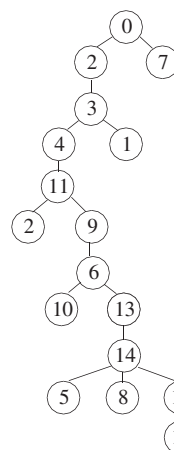


图 2 对应图 1 的 MODIS 图像序列产生的优化压缩树
Fig. 2 Optimal compression tree of MODIS granules for Fig. 1

MODIS 红外辐射图像序列构造的优化压缩树。图 2 中与第一个虚拟的顶点“0”相连表明该波段不预测而直接压缩,子节点对应的波段均由其父节点对应的波段预测。

3.3 线性预测器设计

在选择谱间预测器时,本文主要考虑以下几点:残差图像的压缩文件大小(预测精度),预测器参数的压缩文件大小,预测算法的速度^[7]。如果对残差图像大小要求过高,即要求得到一个极其精确的预测,有可能使得预测器参数文件过于庞大,影响压缩效果。如果设计的预测器极其简单,那么产生的残差图像也有可能引起数据量膨胀。综上,我们选择一阶线性预测器^[8]

$$\bar{X}_n = a_{n-1} X_{n-1} + b_{n-1}$$

(2)

其中 a_{n-1} 和 b_{n-1} 是预测器的系数, X_{n-1} 是波段 $n-1$ 的像素值, $\bar{X}_n$ 是 X_n 的预测值。

令平均方差:

$$E_n = \sum \| a_{n-1} X_{n-1} + b_{n-1} - X_n \|^2$$

(3)

为减小逼近误差,即求式(3)中使 E_n 最小的 a_{n-1} 和 b_{n-1} 的值。 E_n 分别对 a_{n-1} 和 b_{n-1} 求偏导:

$$\frac{\partial E_n}{\partial a_{n-1}} = 0, \quad \frac{\partial E_n}{\partial b_{n-1}} = 0$$

(4)

若给定图像大小 $M \times N$,从式(4)我们可以得到 a_{n-1} 和 b_{n-1} :

$$a_{n-1} = \frac{MN \sum X_n X_{n-1} - \sum X_n \sum X_{n-1}}{MN \sum X_{n-1}^2 - (\sum X_{n-1})^2}$$

(5)

$$b_{n-1} = \frac{1}{MN} (\sum X_n - a_{n-1} \sum X_{n-1})$$

(6)

一般情况下,通过式(5)、(6)得到的 a_{n-1} 和 b_{n-1} 均

不为整数,这样在量化环节会出现信息的丢失。所以我们对上式得到的 a_{n-1} 和 b_{n-1} 取整,即使用如下的优化整数预测器:

$$\bar{X}_n = \text{round}[a_{n-1}]x_{n-1} + \text{round}[b_{n-1}]$$

(7)

这样,我们就可以用这里得到的预测器,对得到的预测序列进行预测,然后对预测残差图像进行编码压缩。

3.4 JPEG2000 压缩算法

JPEG2000 是由联合图像专家组 (Joint Photographic Experts Group) 在 2000 年提出的静态图像压缩标准。其采用离散小波变换和自适应算术编码来压缩图像,具有许多优异的特性,且可以实现有损和无损压缩。本文使用 Jasper^[9] 的库以获得对图像及残差图像的 JPEG2000 压缩。

4 实验结果

为验证算法的有效性,我们使用 MATLAB 对 MODIS 的红外辐射多光谱图像进行压缩。选取 TERRA 卫星获取的 MODIS L1B 的 4 组红外辐射图像序列,空间分辨率为 1 km,空间图像大小为 1 024×1 024 像素。选择其中的 16 个热辐射波段即 20~25、27~36 波段。寻找预测序列时的阈值 M 取 0.8。采用压缩比作为评价无损压缩性能的标准。表 2 将本文的算法与其他的几种算法的性能做了比较。JPEG2000 对应的是各波段单独压缩后的结果;Linear sequence 对应的是使用相邻波段进行预测再使用 JPEG2000 进行压缩后的结果;Our method 对应的是本文描述的算法。

表 2 数据压缩结果比较

Table 2 Compression ratios of various algorithms for MODIS test granules

Granule name(MOD021KM, A2012)	JPEG2000	Linear sequence JPEG2000	Our method
157.0200.005.2012157093218	2.29	2.21	2.62
157.0205.005.2012157093250	2.26	2.26	2.64
157.0340.005.2012157134230	2.28	2.20	2.58
157.0345.005.2012157134407	2.27	2.23	2.52

通过表 2 可以看出, JPEG2000 未考虑谱间相关,压缩性能较低; Linear sequence 虽然做了预测处理,但没有考虑谱间相关性的大小,引起了数据量膨胀,压缩性能反而比 JPEG2000 还低; 本文使用的方法性能明显优于前两种方法,充分说

明本文优化预测序列及预测器设计的性能,验证了算法的有效性。

5 结 论

提出了一种基于线性预测与 JPEG2000 的

MODIS 红外辐射多光谱图像无损压缩算法,该算法可以很好地去频谱间和空间相关,得到较高的压缩比。该算法通过计算多光谱图像的谱间相关性、对图像进行波段分组和预测序列优化、谱间预测及 JPEG2000 压缩算法实现高压压缩比的压

缩。随着航天多光谱技术的发展,星载多光谱数据压缩技术已经成为研究热点。如何将本文的工作移植到受处理能力及功耗限制的星上平台将成为以后要研究与解决的问题。

参 考 文 献:

- [1] Gladkova I, Roytman L, Goldberg M. Adaptive clustering for hyperspectral sounder data compression [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2005, 5889(588907):1-11.
- [2] Gottipati S, Gladkova I, Grossberg M. An analysis of the information dependence between MODIS emissive bands [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2008, 7084(70840J):1-11.
- [3] Skodras A, Chrstopoulos C, Ebrahimi T. The JPEG-2000 still image compression standard [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2001, 18(5):36-58.
- [4] NaSA'S Goddard Space Flight Center. LAADS Web Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System[EB/OL]. [2012-06-01]. <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/index.html>.
- [5] 粘永健,辛勤,汤毅. 基于多波段预测的高光谱图像分布式无损压缩 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4):906-912.
- [6] 刘恒殊. 超光谱遥感图像压缩算法的研究 [D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002.
- [7] 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*, 2012, 27(2):245-249.
- [8] Ren R Z, Guo S X, Gu L J, *et al.* A lossless compression method based on mix coding and IWT for MODIS image [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2009, 7455(7550R):1-9.
- [9] Adams M D, Kossentini F. A software-based JPEG-2000 codec implementation [C]//2000 *Image Processing International Conference*, USA:IEEE, 2000:53-56