

文章编号 1004-924X(2015)08-2376-08

# 基于上下文窗口中反向搜索的高光谱图像无损压缩

高 放, 刘 宇, 郭树旭\*

(吉林大学 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:**针对基于单波段预测的高光谱图像无损压缩压缩比低的问题,提出基于上下文窗口中反向搜索的高光谱图像无损压缩算法。首先,对待测像素设定上下文窗口,计算其预测参考值并进行反向搜索预测得到待测像素的候选预测值。然后,选取与预测参考值最接近的候选预测值作为待测像素的最终预测结果。最后,对预测残差图像进行一阶算术编码完成压缩过程。利用提出的算法对 AVIRIS 1997 高光谱图像进行了实验,结果显示,提出的算法通过对上下文窗口、等效系数和有效像素阈值的优化取值,使反向搜索预测的效果达到最好,经过算术编码器编码后,可以得到一个 3.63 倍的平均压缩比。该方法具有较低的算法复杂度和内存需求,优于当前已报道的基于单波段预测的其他各种高光谱图像无损压缩算法。

**关键词:**高光谱图像;无损压缩;反向搜索;预测压缩;上下文窗口

**中图分类号:**TP751.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152308.2376

## Lossless compression of hyperspectral images using backward search in context window

GAO Fang, LIU Yu, GUO Shu-xu\*

(College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

\* Corresponding author, E-mail: guosx@jlu.edu.cn

**Abstract:** An efficient lossless compression scheme of hyperspectral images based on one-band-prediction was proposed by using backward search in a context window to improve the compression ratio of the hyperspectral images. Firstly, the context window for a pixel to be tested was defined and the prediction reference value under testing was calculated. Then, the candidate predictors which were mostly closed to the prediction reference value were selected as the final prediction results of the pixel to be measured. Finally, the predicted residual image was coded by a first-order arithmetic to implement the image compression. The method proposed was used in the experiments on hyperspectral images from Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) 1997, and the results show that the method has obtained the best prediction results of backward search by optimizing the context window, equivalent coefficients and effective pixel thresholds. After coding by an arithmetic coder, the average compression ratio is 3.63. The method has a lower computing complexity and smaller memory requirements, and outperforms all other lossless compression schemes for hyperspectral images that

收稿日期:2015-05-11;修订日期:2015-06-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41101419)

have been previously reported.

**Key words:** hyperspectral image; lossless compression; backward search; predictive compression; context window

## 1 引言

高光谱图像数据是由同一地物对不同波段的电磁波反射成像而得到的,它通常包括上百幅波段图像,具有丰富的光谱信息,在农业、资源管理、矿产勘探、环境监控和军事侦查等方面有广泛的应用。然而,随着人们对空间分辨率与光谱分辨率的要求越来越高,高光谱图像的数据量越来越大,因此,高光谱图像信息的传输与储存成为重要的研究课题。机载可见光/红外成像光谱仪(Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer, AVIRIS)<sup>[1]</sup>是一种最先进的高光谱传感器,它可以提供224个波段的16位图像,具有20 m的空间分辨率和10 nm的光谱分辨率,储存这样一组高光谱图像数据所需的存储空间高达400~700 MB。因此,高光谱图像的压缩技术一直是星载和机载遥感数据传输和存储中的一个重要课题。

由于高光谱图像大多用来精确分析地物类别,并且绝大部分数据需要使用计算机进行计算,压缩时引起的任何图像数据的失真都不可接受。所以,只有无损压缩才能在提高高光谱图像数据传输和数据存储效率、降低成本的同时,保证高光谱图像数据的质量。

高光谱图像数据具有两种相关性:同一波段内相邻像素之间的空间相关性和相邻波段像素间的光谱相关性。在高光谱图像中,光谱相关性远大于空间相关性,而传统的二维图像无损压缩算法只能利用图像的空间相关性而无法利用光谱相关性,因此需要设计专门针对高光谱图像数据的新型无损压缩算法。

根据高光谱图像无损压缩算法去除相关性的不同,可以将其分为三大类:变换法、矢量量化法和预测法。由于变换法和矢量量化法在高光谱图像无损压缩时的效果并不理想,近年来国内外将研究重点都集中在基于预测的高光谱图像无损压缩。

Mielikainen于2006年提出了基于查表法(LUT)的高光谱图像无损压缩算法<sup>[2]</sup>。该算法在对待测像素进行预测时,将前一波段中与待测

像素具有相同空间位置的像素视为查找表的索引,在表中找到索引对应的值,将其作为待测像素的最终预测结果。Huang和Sriraja则在LUT算法的基础上设计了LAIS-LUT算法<sup>[3]</sup>。该算法先使用两个查找表获得待测像素的两个预测结果,再计算待测像素的LAIS系数,并选择与LAIS参数最接近的值作为待测像素的最终预测结果。Mielikainen和Toivanen于2008年在LAIS-LUT算法的基础上提出了使用量化索引的LAIS-QLUT算法<sup>[4]</sup>,同时修改了LAIS系数的计算公式,从而降低了算法的复杂度和内存需求。宋金伟等提出了将线性预测与查表法相结合的方法<sup>[5]</sup>,利用自行设计的线性滤波器去除光谱相关性。汤毅等在使用最小二乘法预测压缩之前加入了C均值聚类算法<sup>[6]</sup>,得到了极高的压缩比,但此类方法的算法复杂度过高。粘永健和万建伟提出了一种分块的高光谱图像无损压缩算法<sup>[7]</sup>,在波段分组之后使用最小二乘法进行无损压缩。尹传历和李嘉全提出了一种基于位平面编码的嵌入式高光谱图像压缩算法<sup>[8]</sup>。殷亚男等将预测算法和JPEG2000算法融合对MODIS红外辐射高光谱图像进行无损压缩<sup>[9]</sup>。

Keily和Klimesh在2009年提出了同时利用空间相关性、光谱相关性和人工校准相关性的预测压缩算法(TSP-W1和TSP-W2)<sup>[10]</sup>,Lin和Hwang同样利用这3种相关性提出了二阶段预测算法(IP3-BPS)<sup>[11]</sup>。Song等人提出了一种基于递归最小二乘的实时压缩算法(RLS)<sup>[12]</sup>,此算法将预测过程转化为对递归最小二乘滤波器的求解过程。基于差分脉冲调制编码的算法在近几年也得到广泛应用,Mielikainen和Toivanen于2003年提出了聚类后使用差分脉冲调制编码(C-DPCM)<sup>[13]</sup>的高光谱图像无损压缩算法。该算法首先使用K均值聚类对高光谱图像进行分块,然后对每个分块采用不同的线性预测函数进行预测压缩。Mielikainen和Huang在2012年将C-DPCM算法中加入了自适应选取预测长度的步骤(C-DPCM-APL)<sup>[14]</sup>。这种方法在2014年经Wang等再一次改进而使算法运算时间大大降

低<sup>[15]</sup>。但上述几种算法均是使用多个已知波段预测当前波段,存在算法复杂度较高的问题。

本文提出了一种基于上下文窗口中反向搜索的高光谱图像无损压缩算法,通过对反向搜索过程中上下文窗口、等效系数和有效像素阈值的优化取值,选取当前已知近邻像素的像素值代替计算得到的预测参考值作为待测像素的最终预测结果,最后对预测残差图像进行一阶算术编码完成压缩过程。该方法很好地利用了高光谱图像的空间相关性和光谱相关性,可以获得较高的压缩比;同时由于其只使用一个已知波段来预测当前波段,故具有较低的算法复杂度和内存需求。

## 2 压缩算法

本文提出的基于上下文窗口中反向搜索的高

$$C = \begin{bmatrix} p_{x-u, y-v, z} & p_{x-u, y-v+1, z} & \cdots & p_{x-u, y, z} & \cdots & p_{x-u, y+v-1, z} & p_{x-u, y+v, z} \\ p_{x-u+1, y-v, z} & & & & & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & p_{x-1, y-1, z} & p_{x-1, y, z} & p_{x-1, y+1, z} & \cdots & p_{x-1, y+v, z} \\ p_{x, y-v, z} & \cdots & p_{x, y-1, z} & p_{x, y, z} & \times & \times & \times \end{bmatrix}. \quad (1)$$

首先,为待测像素  $p_{x, y, z}$  定义一个上下文窗口  $C(u$  行,  $2v+1$  列),如公式(1)所示。再使用公式(2)计算待测像素的预测参考值  $o_{x, y, z}$ 。预测参考值是利用待测像素同一波段中因果像素与前一波段中因果像素的比例因子对待测像素进行预测得到的简单估计值,其中  $p_{x, y, z-1}$  表示在  $z-1$  波段图像中与待测像素  $p_{x, y, z}$  具有相同空间位置坐标的像素:

$$o_{x, y, z} = \frac{(p_{x-1, y, z} + p_{x-1, y-1, z} + p_{x-1, y+1, z})}{(p_{x-1, y, z-1} + p_{x-1, y-1, z-1} + p_{x-1, y+1, z-1})} \times p_{x, y, z-1}. \quad (2)$$

然后,在第  $z-1$  和第  $z$  波段的上下文窗口内进行反向搜索预测,定义等效系数  $r$  为一个正整数。对等效系数  $r$  的取值应采用穷举搜索法,即选取使待测波段压缩效果最佳的值作为该波段的等效系数,但是,穷举搜索法需要海量运算时间,本文算法通过观察实验数据,在不降低整体压缩比,但可大幅度降低算法时间的情况下,将等效系数  $r$  的取值范围设定为:

$$r = m(m-1), m = 1, 2, \dots, 15, \quad (3)$$

其中  $m$  为一个正整数。

光谱图像无损压缩算法主要分为 4 个步骤:(1)设定待测像素所在的上下文窗口,并在其中求出待测像素的预测参考值;(2)设定等效系数和有效像素阈值的大小,在上下文窗口内进行反向搜索预测,得到待测像素的候选预测值;(3)将每个候选预测值与预测参考值进行比较,选取与预测参考值最接近的候选预测值作为待测像素的最终预测结果;若候选预测值的个数为零,则将预测参考值作为待测像素的最终预测结果;(4)使用一阶算术编码对预测残差图像进行编码压缩,以去除空间冗余。

本文算法将当前待测像素表示为  $p_{x, y, z}$ (第  $z$  波段中第  $x$  行第  $y$  列的像素),预测阶段按光栅扫描顺序,即对待测像素以从左向右、从上向下的顺序依次进行预测。

反向搜索过程采用反向光栅扫描顺序,即从右向左、从下到上。在第  $z-1$  波段的上下文窗口中进行反向搜索预测,搜索出上下文窗口中与像素  $p_{x, y, z-1}$  的差在  $[-r, r]$  内的像素  $p_{x_i, y_i, z-1}$ :

$$p_{x, y, z-1} - r \leq p_{x_i, y_i, z-1} \leq p_{x, y, z-1} + r. \quad (4)$$

将当前波段中与像素  $p_{x_i, y_i, z-1}$  具有相同空间位置坐标的像素  $p_{x_i, y_i, z}$  选为待测像素的候选预测值。

等效系数和上下文窗口大小均可调整,故反向搜索预测过程理论上可以得到很多个候选预测值,而距离待测像素过远的候选预测值与待测像素之间相关性很低,会对随后最终预测结果的选择造成障碍,影响算法的压缩效果。为了避免这种现象,同时也为了限制反向搜索的搜索范围,减少运算时间,本文设定一个有效像素阈值  $\omega$ 。当反向搜索过程搜索到待测像素的第  $\omega$  个候选预测值后,反向搜索过程中断。

随后,将待测像素与反向搜索预测得到的所有候选预测值相减并取绝对值得到  $\Delta_{x_i, y_i, z}$ ,选出其中最小的  $\Delta_{x_{\min}, y_{\min}, z}$ :

$$\Delta_{x_i, y_i, z} = |p_{x_i, y_i, z} - o_{x, y, z}|, \quad (5)$$

$$\Delta x_{\min}, y_{\min}, z = \min\{\Delta_{x_i, y_i, z}, \dots, \Delta_{x_i, y_i, z}, \dots, \Delta_{x_n, y_n, z}\}. \tag{6}$$

将  $\Delta x_{\min}, y_{\min}, z$  对应的候选预测值  $p_{x_{\min}, y_{\min}, z}$  作为待测像素的最终预测结果,即与预测参考值  $o_{x, y, z}$  最接近的候选预测值  $p_{x_{\min}, y_{\min}, z}$  被选作待测像素  $p_{x, y, z}$  的最终预测结果:

$$q_{x, y, z} = p_{x_{\min}, y_{\min}, z}. \tag{7}$$

若反向搜索预测结束时,在上下文窗口中没有搜索到符合条件的候选预测值,则将预测参考值  $o_{x, y, z}$  直接作为待测像素的最终预测结果:

$$q_{x, y, z} = o_{x, y, z}. \tag{8}$$

图 1 为本文算法预测过程的示例,等效系数  $r$  设为 56,有效像素阈值  $\omega$  设为 3,图中阴影部分设为上下文窗口,当前待测像素使用黑色背景显示。如图 1 所示,当前波段中的待测像素为 4004,在前一波段中与待测像素具有相同空间位置的像素为 4120。首先使用公式(2)计算出待测像素的预测参考值为 4022。然后在前一波段的上下文窗口中进行反向搜索预测,其中,符合反向搜索条件,即像素值在[4064,4176]内的像素有 5 个:4071,4077,4143,4148,4120,但由于有效像素

阈值为 3,所以反向搜索预测在搜索到第 3 个像素 4143 时中断,即反向搜索预测过程的搜索结果 为 4071,4077,4143。将当前波段中与这 3 个像素具有相同空间位置的像素作为候选预测值: 3958,3982,4085。在 3 个候选预测值中选择与预测参考值 4022 最接近的 3982 作为待测像素的最终预测结果。

最后,对反向搜索预测得到的残差图像进行一阶算术编码压缩,去除空间冗余。由于反向搜索预测过程中,上下文窗口、等效系数和有效像素阈值的大小在不同波段的取值并不一定相同,所以本文算法在对当前波段残差图像进行算术编码之前,将此波段所设定的上下文窗口、等效系数和有效像素阈值的取值记录在输入码流的前端,再对预测残差图像进行算术编码压缩。

本文所使用的一阶算术编码流程与文献[16]一致,但文献[16]中的算术编码算法要求输入序列必须为正整数,而预测残差序列无法直接进行算术编码操作,故需要先对预测残差序列进行转换操作<sup>[17-18]</sup>。本文将预测残差序列中出现的第  $n$  个新误差在转换序列里用  $n$  表示,再将预测残差序列中的误差值依次对应转化完成后,再对转换序列进行算术编码。

在解码过程中,为了得到原始预测残差序列,解码器需要知道转换序列中每个正整数  $n$  所对应的预测残差值,因此本文算法在编码前需将正整数  $n$  与预测残差值的对应关系附在预测残差序列前端。虽然本文算法在预测残差序列中加入了上述上下文窗口、等效系数、有效像素阈值和预测残差值对应关系等额外信息,但由于高光谱图像数据的庞大,使得这些额外信息占实验图像整体信息的百分比不足 0.5%,故对本文算法的压缩效果并未造成太大影响。

在图像解压缩阶段,通过算术解码器解码得到转换序列和额外信息后,按照对应关系将转换序列还原成预测残差序列。设定等效系数等参数的大小,依次对待测像素进行反向搜索预测,将预测结果与其对应的预测残差值相加,即可还原出该波段的原始高光谱图像。

3988	4173	4251	4035	3916	3958	4119
3909	<b>4120</b>	<b>4148</b>	3975	3909	3969	4094
3928	4218	<b>4143</b>	4207	4030	4030	4053
4011	4029	<b>4077</b>	4029	<b>4071</b>	4017	3969
3963	3987	3951	<b>4120</b>	4250	4023	4076
4035	4130	4166	4364	4645	4579	4340

(a)前一波段图像  
(a)Former band image

3886	4078	4132	3922	3778	3880	3928
3802	3922	4036	3892	3808	3862	3934
3850	3946	<b>4085</b>	4012	3940	3928	3904
3904	3916	<b>3982</b>	3946	<b>3958</b>	3934	3772
3858	3894	3864	<b>4004</b>	4159	3918	3912
3796	3916	3844	3976	4060	3922	3952

(b)当前波段图像  
(b)Current band image

图 1 算法实例

Fig. 1 Proposed algorithm examples

### 3 实验结果

本文选择了学术界广泛使用的 AVIRIS 1997

高光谱数据中的 4 个场景作为实验图像,分别为: Cuprite; Jasper Ridge; Lunar Lake 和 Moffett Field。AVIRIS 1997 图像由美国宇航局所属的喷气动力实验室开发,所获取数据均有 224 个波段,图像高度分别为 2206、2586、1431 和 2031 pixel,宽度均为 614 pixel,图像中的每个像素均由一个 16 位整数表示。在进行仿真实验时,本文算法首先设定 3 个参数,其中通过多次实验,上下文窗口  $C$  设为待测像素所在行的已知部分,有效像素阈值  $\omega$  设为 7。等效系数  $r$  在各波段间相互独立,选取本文算法对该波段进行运算后得到最大压缩比时的值作为该波段的最优等效系数。

表 1 AVIRIS 1997 高光谱图像压缩效果

Tab.1 Compression performance of hyperspectral image on the AVIRIS 1997 database

算法	Cuprite	Jasper ridge	Lunar lake	Moffett field	Average
SLSQ	3.24	3.23	3.23	3.23	3.23
FL	3.26	3.23	3.26	3.21	3.24
KSP	3.28	3.23	3.27	3.25	3.26
LUT	3.44	3.23	3.40	3.17	3.31
C-DPCM	3.42	3.46	3.37	3.46	3.43
S-FMP	3.43	3.46	3.43	3.46	3.45
LAIS-LUT	3.58	3.42	3.53	3.36	3.47
LAIS-QLUT	3.73	3.47	3.69	3.46	3.59
本文算法	<b>3.78</b>	<b>3.54</b>	<b>3.75</b>	<b>3.48</b>	<b>3.63</b>

表 1 比较了 4 组 AVIRIS 1997 高光谱数据: Cuprite; Jasper Ridge; Lunar Lake 和 Moffett Field 作为实验图像时,多种高光谱图像无损压缩算法的压缩效果,采用压缩比作为无损压缩算法性能的评价标准。选择 SLSQ<sup>[19]</sup>, FL<sup>[20]</sup>, KSP<sup>[21]</sup>, LUT<sup>[2]</sup>, C-DPCM<sup>[13]</sup>, S-FMP<sup>[22]</sup>, LAIS-LUT<sup>[3]</sup>, LAIS-QLUT<sup>[4]</sup> 作为对比算法。表 1 中的最右列表示上述算法对 4 组 AVIRIS 1997 高光谱图像的平均压缩比,每组图像的最高压缩比加粗表示。从表 1 可以看出,本文算法的平均压缩比为 3.63 倍,优于用于比较的其他高光谱图像无损压缩算法,并且,本文算法对 4 组高光谱图像数据中任意一组的压缩效果均为最优。

图 2 为以 Cuprite 图像为例时,本文算法使

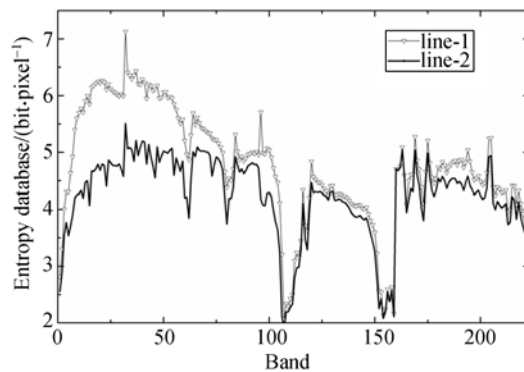


图 2 本文算法对 Cuprite 图像压缩后的预测残差比特率曲线

Fig.2 Prediction residual bit rate for Cuprite image compressed by proposed algorithm

用两种不同的等效系数所取得的不同压缩效果: (line-1)表示在等效系数  $r$  设为零时,即不使用等效系数的情况下,本文算法对 Cuprite 实验图像进行逐波段无损预测压缩后,得到的预测残差图像的比特率曲线,其平均比特率为 4.77 (bit/pixel); (line-2)表示了等效系数  $r$  在每个波段都取最优值时,本文算法对 Cuprite 图像逐个波段进行无损预测压缩后得到的预测残差图像的比特率曲线,其平均比特率为 4.23 (bit/pixel),相比 (line-1) 的压缩效果, line-2 的平均比特率降低了 11.3%。

从图 2 可以看出,逐个波段对等效系数  $r$  取最优值后,本文算法得到的预测残差图像的平均比特率大大减小了。这是由于 AVIRIS 1997 高光谱图像的像素值变化范围较大,若不最优化等效系数,则绝大部分待测像素在反向搜索预测过程中无法搜索到候选预测值,最终只能将预测参考值作为其最终预测结果,而预测参考值只是一个对待测像素的简单估计,并没有很好地利用高光谱数据的光谱相关性,过多的使用预测参考值作为最终预测结果会大大降低算法的压缩效果。

图 3 表示了本文算法以 Cuprite 图像为例完成反向搜索预测过程后,可以在上下文窗口中搜索到候选预测值的待测像素个数占总像素个数的百分比,其中,  $P_{\text{same1}}$  表示在将等效系数  $r$  设为零时的百分比,  $P_{\text{same2}}$  表示等效系数  $r$  在每个波段取最优值时的百分比。从图 3 可以看出,通过对等效系数  $r$  进行逐波段取最优值后,本文算法可以

搜索到的候选预测值的待测像素个数占总像素个数的百分比从 56% 提升到 93%, 只有 7% 的待测像素使用预测参考值作为最终预测结果, 而 37% 的提升则转化为平均比特率降低 0.54 (bit/pixel)。

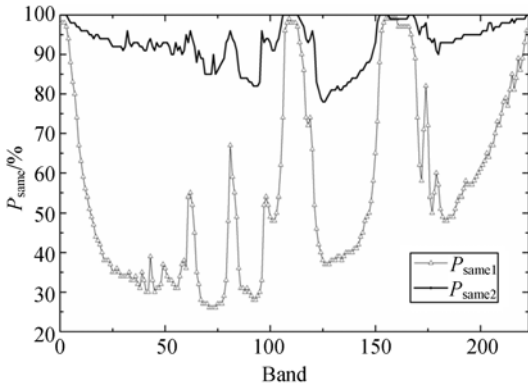


图 3 具有候选预测值的待测像素个数占像素总数的比例

Fig. 3 Percentage of current pixels containing candidate predictors in total pixels

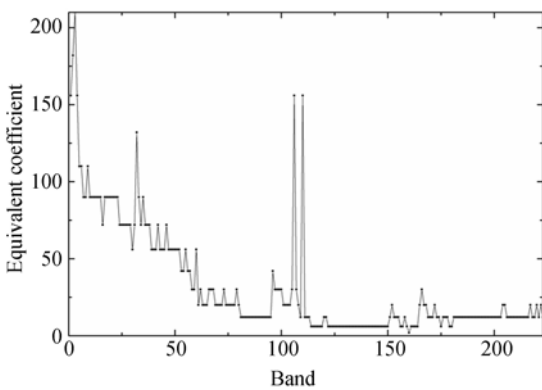


图 4 Lunar lake 图像实验中各波段等效系数的最优取值

Fig. 4 Optimal value of equivalent coefficient in each band for Lunar lake image

表 2 有效像素阈值  $\omega$  的取值实验

Tab. 2 Compression ratio of proposed algorithm with different  $\omega$

压缩比	$\omega$					
	$\omega=1$	$\omega=3$	$\omega=5$	$\omega=7$	$\omega=9$	$\omega=11$
	3.27	3.38	3.49	3.54	3.53	3.52

图 4 表示了本文算法对 Lunar Lake 图像进

行无损压缩时, 等效系数  $r$  在各个波段的最优取值。从图 4 可以看出, 在 1~50 波段间, 等效系数  $r$  的最优取值基本都大于 56。这是因为 AVIRIS 1997 图像在 1~50 波段内像素值变化范围偏大, 而在 117~150 波段间的情况则刚好相反, 因此可以得出如下结论: 等效系数  $r$  的最优取值与其对应波段像素值的变化范围成正比。

表 2 对比了本文算法对 Jasper ridge 图像进行处理时, 选取不同有效像素阈值  $\omega$  得到的不同压缩比。从表 2 可以看出, 有效像素阈值在 1~7 内逐渐增大时, 本文算法得到的压缩比也随之增大, 并且在  $\omega=7$  时取得最大压缩比。而当有效像素阈值的取值继续增大时, 许多距离待测像素过远的候选预测值在反向搜索中被选中, 进而影响了最终预测效果。所以, 当有效像素阈值大于 7 后, 本文算法的压缩比开始降低。

本文最后将整组实验图像全部波段的等效系数  $r$  都设为同一个固定值进行实验, 但在这种情况下, 本文算法对 4 组 AVIRIS 1997 图像进行无损压缩时得到的压缩效果均较差, 并且无论固定后的等效系数  $r$  如何选取都无法达到甚至无法接近逐个波段最优取值时的压缩效果, 因此也再次证明对等效系数  $r$  逐个波段分别取最优值的方法是有效并值得使用的。

#### 4 结 论

本文提出了一种基于上下文窗口中反向搜索的高光谱图像无损压缩算法。本文算法通过对上下文窗口、等效系数和有效像素阈值的优化取值, 使反向搜索预测的效果达到最好。对 AVIRIS 1997 高光谱图像的实验结果可以看出, 经过算术编码器编码后, 可以得到一个 3.63 倍的平均压缩比, 优于当前已报道的基于单波段预测的其他各种高光谱图像无损压缩算法, 证明了本文算法的有效性和实用性。

## 参考文献:

- [1] Free AVIRIS standard data products [EB/OL]. [http://aviris.jpl.nasa.gov/html/aviris\\_freedata.html](http://aviris.jpl.nasa.gov/html/aviris_freedata.html).
- [2] MIELIKAINEN J. Lossless compression of hyperspectral images using lookup tables [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2006, 13(3):157-160.
- [3] HUANG B, SRIRAJA Y. Lossless compression of hyperspectral imagery via lookup tables with predictor selection [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6365:65650L-1-63650L-8.
- [4] MIELIKAINEN J, TOIVANEN P. Lossless compression of hyperspectral images using a quantized index to lookup tables [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3):474-478.
- [5] 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. Hyperspectral imagery compression via linear prediction and lookup tables [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8):2201-2208. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 粘永健,辛勤,汤毅,等. 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.  
NIAN Y J, XIN Q, TANG Y, *et al.*. Distributed lossless compression of hyperspectral images based on multi-band prediction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4):906-912. (in Chinese)
- [8] 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.  
YIN CH L, LI J Q. Embedded hyper spectral image compression system based on bit-plane [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(2):245-249. (in Chinese)
- [9] 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 [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)
- [10] KIELY A, KLIMESH M. Exploiting calibration-induced artifacts in lossless compression of hyperspectral imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8):2672-2678.
- [11] LIN CH CH, HWANG Y T. An efficient lossless compression scheme for hyperspectral images using two-stage prediction [J]. *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, 2010, 7(3):558-562.
- [12] SONG J W, ZHANG ZH W, CHEN X M. Lossless compression of hyperspectral imagery via RLS filter [J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(16):992-993.
- [13] MIELIKAINEN J, TOIVANEN P. Clustered DPCM for the lossless compression of hyperspectral images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(12):2943-2946.
- [14] MIELIKAINEN J, HUANG B. Lossless compression of hyperspectral images using clustered linear prediction with adaptive prediction length [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(6):1118-1121.
- [15] WANG K Y, LIAO H L, LI Y S, *et al.*. Lossless compression of hyperspectral images using C-DPCM-APL with reference bands selection [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9124: 91240W-1-91240W-10.
- [16] MOFFAT A, NEAL R, WITTEN I H. Arithmetic coding revisited [C]. *Data Compression Conference*, 1995, 202-211.
- [17] ABERG J, SHTARKOV Y M, SMETTS B J M. Multialphabet coding with separate alphabet description [C]. *Proceedings of Compression and Complexity of Sequences*, 1997, 56-65.
- [18] ORLITSKY A, SANTHANAM N P, ZHANG J. Universal compression of memoryless sources over

- unknown alphabets [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(7):1469-1481.
- [19] RIZZO F, CARPENTIERI B, MOTTA G, *et al.*. Low-complexity lossless compression of hyperspectral imagery via linear prediction [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, 12(2):138-141.
- [20] KLIMESH M. Low-complexity adaptive lossless compression of hyperspectral imagery [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6300: 63000N-1-63000N-9.
- [21] MAGLI E. Multiband lossless compression of hyperspectral images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(4):1168-1178.
- [22] AIAZZI B, AIPARONE L, BARONTI S, *et al.*. Crisp and fuzzy adaptive spectral predictions for lossless and near-lossless compression of hyperspectral imagery [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(4):532-536.

## 作者简介:



高放(1987—),男,吉林长春人,博士研究生,2010年于吉林大学获得学士学位,主要从事高光谱图像压缩方面的研究。E-mail: gaofang@163.com

## 导师简介:



郭树旭(1959—),男,黑龙江虎林人,教授,博士生导师,主要从事数字图像处理与分析方面的研究。E-mail: guosx@jlu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)