

星载成像光谱仪星上实时数据压缩的研究*

张 斧

(上海机械学院上海先河光电公司, 上海, 200093)

龚惠兴 张智敏

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要 针对星载成像光谱仪的地物信息获取模式, 运用最佳线性预测压缩技术, 并配合霍夫曼 (Huffman) 高效编码方法, 达到对星载成像光谱仪谱、像综合数据进行严格保存信息压缩的目的. 给出星载成像光谱仪星上实时数据压缩技术方案的基本原理、系统实现以及相应的实验结果与结论.

关键词 星载成像光谱仪, 遥感, 数据压缩.

引言

遥感技术中, 信息通道的发展与遥感数据量的剧增是研制星载成像光谱仪中遇到的主要困难之一^[1~2]. 解决的方法是使星载成像光谱仪具备有效的星上实时数据压缩能力, 从而使数据率达到与现有信息通道相匹配的程度.

图像数据的压缩分为保存信息的压缩和减少熵的压缩. 保存信息的压缩有空间、变换及混合三种方法^[3~6]; 另外, 还有一种建立在人脑视觉机制上的图像数据压缩方法, 即第二代图像数据压缩技术^[4]. 对于减少熵的压缩, 采用的方法有数据编辑^[7]与分类处理^[8]. 当前数据压缩技术虽已取得重大进展, 但实际应用中除应考虑压缩比与数据保真度外, 还必须充分考虑设备的可靠性, 并使其重量、体积、功耗与星载条件相适应. 因此, DPCM 及预测、内插编码等空间方法是目前较合适的星上数据压缩手段^[1]. 但它存在一定的局限性, 其一, 在压缩过程中, 信息没有严格保存, 存在一定复原误差; 其二, 压缩主要是沿多光谱数据空间维方向进行, 而对于成像光谱数据, 压缩还必须同时考虑光谱维方向. 为此, 本文根据地物信息的统计相关特性, 基于 DPCM 的基本原理, 采用了一种将线性预测与霍夫曼高效编码相结合的数据压缩方法, 以克服上述诸方法的不足, 其根本目的是为星载成像光谱仪提供星上实时数据压缩手段.

* 中国科学院上海技术物理研究所研究项目

本文 1993 年 6 月 2 日收到, 修改稿 1994 年 1 月 4 日收到

1 地物信息统计相关特性分析

本星载成像光谱仪是以线阵探测器摇扫式扫描形式来获取地物的光谱图像信息. 因此, 对于每个光机扫描周期, 系统采集的仅是一维光谱 λ 轴方向与一维空间 x 轴方向的地物信息.

沿 x 轴方向的空间特性在多数情况下可近似地用自相关函数表示^[6], 它分布呈指数衰减, 因此, 对获取的地物信息, 相邻空间像元的空间特性一般均具有较强的空间相关性.

根据一组典型地物的光谱反射比 $\rho(\lambda)$ 曲线^[9], 我们可得与各 $\rho(\lambda)$ 相对应的自相关函数的数字估计 (见表 1). 表 1 中, η 为一维光谱 λ 轴方向光谱元坐标的差值, 地物 1~5 分别为橄榄角闪岩、新雪、风干高岭石、落果期暖性松林及成熟期小麦. 由表 1 结果可推知, 无论何种地物光谱, 相邻光谱元的光谱特性都存在较强的光谱相关性.

表 1 地物光谱反射比自相关函数

Table 1 The self-correlation function of ground spectral reflectance

$ \eta $	$R(\eta)/R(0)$				
	地物 1	地物 2	地物 3	地物 4	地物 5
0	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
1	1.00197	1.00168	1.00081	0.998750	0.999545
2	1.00362	1.00342	1.00154	0.993995	0.994986
3	1.00514	1.00518	1.00226	0.986199	0.987704
4	1.00633	1.00683	1.00292	0.975901	0.978546
5	1.00690	1.00828	1.00342	0.963750	0.969003

图 1 为实验型 71 波段模块式机载成像光谱仪 (MAIS) 波段 9 ($0.62 \sim 0.64 \mu\text{m}$) 的航空遥感图像, 其数据的一维空间与一维光谱方向的自相关函数见表 2.

表 2 一景 MAIS 航空遥感图像数据自相关函数

Table 2 The self-correlation function of a scene of MAIS airborne remote sensing image data

$ \eta $	$R(\xi)/R(0)$	
	一维空间 x 轴方向	一维光谱 λ 轴方向
0	1.000000	1.000000
1	0.991032	0.943260
2	0.984123	0.954615
3	0.978643	0.935667
4	0.975014	0.932990
5	0.971750	0.920847

由上可得出结论: 系统所获取的地物信息在一维空间和一维光谱方向皆存在较强的相关性, 因而对其实施有效的数据压缩是可行的.



图1 MAIS 波段9 航空遥感图像
Fig. 1 MAIS airborne remote sensing image for wave band 9

2 基本原理

由信息论可知, 只要信源符号彼此相关就存在冗余信息, 冗余度越大, 可压缩的信息就越多. 根据以上分析, 系统获取的地物信息在一维空间和一维光谱方向都存在较强的相关性, 也即具有较大的冗余度, 而信息的压缩就是消除或减少这些冗余度.

由于图像数据中像素之间存在着较强的相关性, 因此可根据其余的像素推导出—给定像素的灰度预测值, 并使之比较接近于该像素的实际灰度值. 将实际值与相应

预测值之差称为预测差值. 显然由预测差值信号所形成的随机变量序列比原图像像素之间的相关性小, 由于预测差值信号的分布一般主要集中在零值附近, 因此可忽略少数高比特数的预测差值, 而仅用较低比特数来传输大部分的预测差值, 从而使图像数据得到一定的压缩. 显然, 这样的压缩方式不可避免地存在着复原误差, 但如果对所出现的预测差值信号实施某种高效非均匀编码, 则图像数据的压缩效果可得到改善, 而且它是一种严格的保存信息压缩方法. 这就是本文所采用的数据压缩方法的基本原理.

3 系统实现

本数据压缩系统由预测器与编码器两大部分组成. 其中, 系统的核心是预测器, 其性能决定着整个系统的数据压缩效益. 为了能给我们研制的星载成像光谱仪提供一个可进行实际操作的星上实时数据压缩系统, 并考虑到线性预测在数学分析与系统工程实施中的简便性, 故本系统将采用最佳线性预测器.

对上述—景 MAIS 航空遥感图像数据, 使用不同形式和不同阶数的最佳线性预测器预测差值均方值的比较见表3. 表3中, 水平、垂直、斜 45° 预测器分别是指利用沿—维空间 x 轴方向、沿—维光谱 λ 轴方向以及沿与 x 轴和 λ 轴成 45° 的斜对角线方向的以前像素对当前像素进行预测; 而混合预测器的当前像素 x_0 . 与以前 $1\sim 12$ 像素 $x_1\sim x_{12}$ 的相互位置关系如图2所示.

表3 使用不同形式、不同阶数的最佳线性预测器预测差值均方值的比较

Table 3 Comparison of the mean square value of predictive difference value for the optimal linear predictor using different form and different order

预测阶数	预测差值均方值 (%)			
	水平预测器	垂直预测器	斜 45° 预测器	混合预测器
1	1.78556	11.0261	11.9931	1.78556
2	1.76363	7.20890	8.46677	1.63857
3	1.74909	7.06938	8.35719	1.20513
4	1.72210	7.03466	8.30334	1.19004
5	1.71630	7.03392	8.28090	1.14991

由表 3 可知，对于相同的阶数，混合预测器效果最好；而对于各种预测器，当预测阶数增加到 3 时，预测差值均方值显著减小，此时若再增加阶数则减小变缓慢。因此，对于图 2 所示的地物光谱图像坐标系中 $\lambda=1$ 、 $x=4 \sim N_1$ 以及 $x=1$ 、 $\lambda=4 \sim N_2$ 的所有像素拟分别采用三阶水平、垂直预测器来进行预测压缩，而对于 $x \geq 2$ 、 $\lambda \geq 2$ 的所有像素则使用三阶混合预测器。

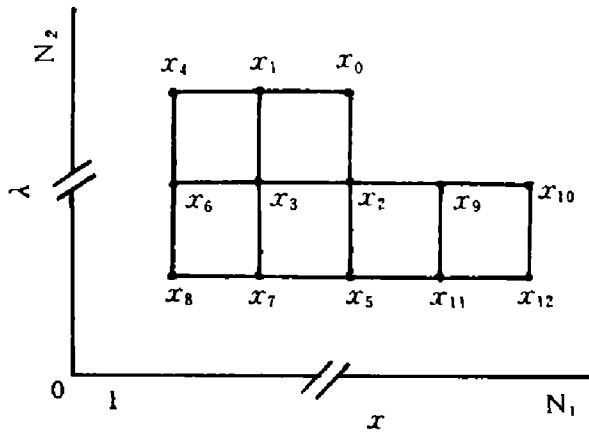


图 2 混合预测器图像像素编号次序
Fig. 2 The serial number of image pixel for the hybrid predictor

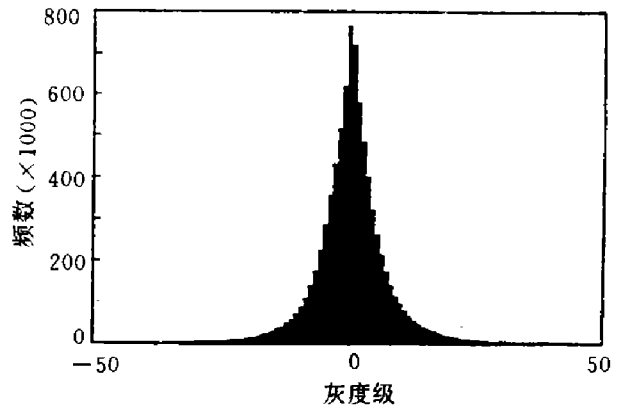


图 3 预测差值信号直方图
Fig. 3 The histogram of predictive difference value signal

按上述预测方案对一景 MAIS 航空遥感图像像素进行预测，其预测差值信号直方图见图 3。除归一化因子外，图 3 给出的直方图就是预测差值信号的一维概率密度函数的估计。显然，具有这样高尖的概率密度函数的预测差值信号最好使用非均匀编码器来进行编码。这里采用的是高效霍夫曼编码^[10]。经对预测系数进行简单的计算可知，预测差值信号的最大取值范围为 $-385 \sim +386$ ，共有 772 个可能的取值。这些不同的取值将与 3~31 bits 长度的霍夫曼代码一一对应。

根据上述系统预测器和编码器的特性与参数，我们可在工程上较方便地实现本星载成像光谱仪上实时数据压缩系统。其硬件框图如图 4 所示。在图 4 中，由于用两组图像数据缓冲存贮器来交替存贮一行地物扫描数据以利于提高时间利用率，因此图像数据的压缩处理可在一行地物扫描中 280° 空扫时间 129.630 ms 内完成。于是，每个地物光谱数据所占用的平均处理时间为 129.630 ms/

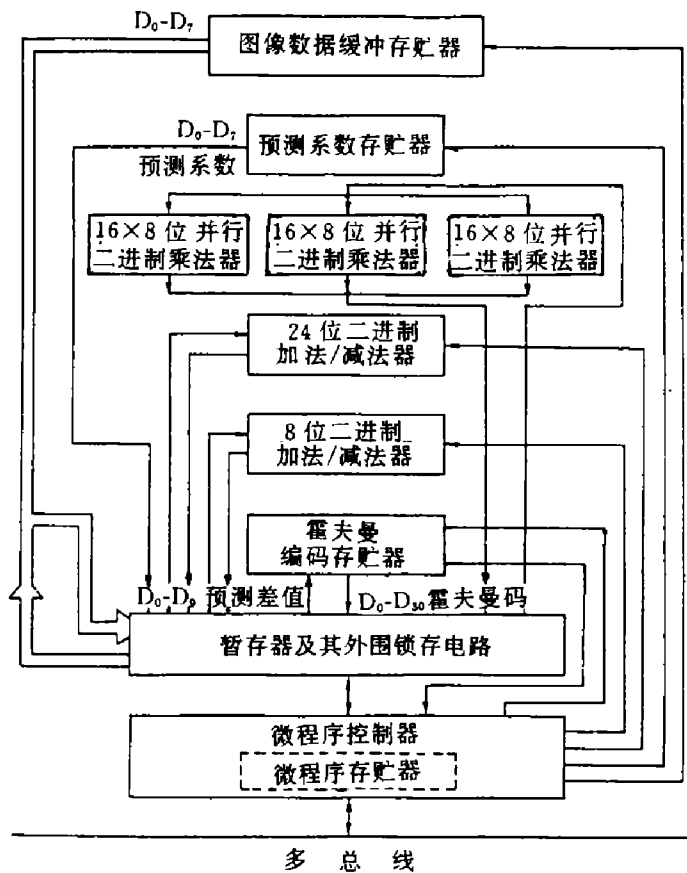


图 4 星上实时数据压缩系统硬件框图
Fig. 4 The hardware block diagram of the onboard real-time data compression system

133860 = 968.400 ns. 由于时间间隔短, 依赖于微处理器软件来实现数据压缩处理相当困难, 为此我们研制了如图 4 所示的流水线结构的高速硬件电路系统.

4 实验结果

图 5 是上述一景 MAIS 航空遥感图像数据的灰度级直方图. 图 6 是该图像数据中 1~400 地物扫描行的每行地物光谱数据经本机上实时数据压缩系统处理后的平均代码长度曲线图. 其部分地物扫描行的信源熵与压缩后平均代码长度的相互比较见表 4.

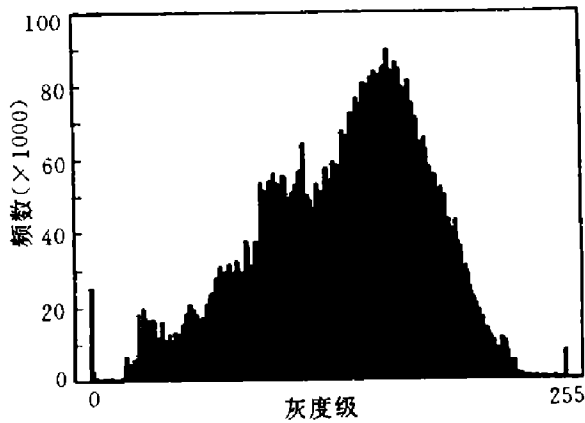


图 5 一景 MAIS 航空遥感图像数据灰度级直方图

Fig. 5 The histogram of gray levels of a scene of MAIS airborne remote sensing image data

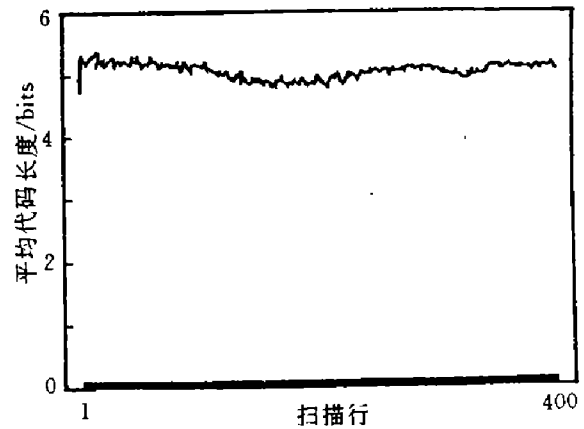


图 6 每行地物光谱数据经压缩处理后的平均代码长度曲线

Fig. 6 The curve of mean code length of the compressed ground spectral data per line

表 4 部分地物扫描行的信源熵与压缩后平均代码长度的比较

Table 4 Comparison between the signal source entropy and the compressed mean code length of some ground scanning lines

扫描行	信源熵 $H(S)$ (bits)	平均代码长度 \bar{L} (bits)	编码效率 η
1	4.66595	4.77093	0.977996
100	5.04940	5.09855	0.990360
200	4.85203	4.90965	0.988264
300	5.03446	5.08432	0.990193
400	5.02292	5.07889	0.988980
512	5.30377	5.37262	0.987185

表 4 中, $H(S)$ 、 \bar{L} 、 η 分别为:

$$H(S) = - \sum_{i=1}^q P(S_i) \log_2 P(S_i), \quad (1)$$

$$\bar{L} = \sum_{i=1}^q P(S_i) l(S_i), \quad (2)$$

$$\eta = \frac{H(S)}{\bar{L}}, \quad (3)$$

其中, 信源符号 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_q\}$, $P(S_i)$ 是 S_i 出现的概率, $l(S_i)$ 是对 S_i 编码的代码长度.

实验结果表明: 1~512 地物扫描行的平均 $H(S)$ 、 \bar{L} 和 η 分别为 5.04593、5.10667 和 0.988106. 由此可见, 本系统无损数据压缩比约为 8:5, 这与美国 NASA 计划于 90 年代中期实施于地球观测系统空间站的高分辨率成像光谱仪 (HIRIS) 中所制定的无损数据压缩比 (2:1)^[2] 的研究目标相接近.

表 5 是利用本系统算法与常用 DPCM 算法对上述一景 MAIS 航空遥感图像数据进行压缩处理的性能比较. 可知, 本系统算法具有严格保存信息、数据压缩效益较高、算法简捷和系统较易实施等特点.

表 5 本系统算法与常用 DPCM 算法的性能比较
Table 5 The performance comparison between the system's algorithm and the usual DPCM algorithm

本系统算法		常用 DPCM 算法	
数据压缩比	失真数据个数百分率 (%)	数据压缩比	失真数据个数百分率 (%)
8:5	0	8:4	46.292
		8:5	26.676
		8:6	16.732

致谢 本文工作曾得到中国科学院上海技术物理研究所薛永祺研究员等人的大力支持, 谨表衷心的感谢.

参考文献

- 1 Ando K J. *Proc. IGARSS'82*, 1982, 3.1~3.6
- 2 Herring M. *SPIE*, 1986, 644:82~85
- 3 Jain A K. *Proc. IEEE*, 1981, 69(3):349~389
- 4 Kunt M, et al. *Proc. IEEE*, 1985, 73(4):549~574
- 5 Colwell R N, et al. *Manual of Remote Sensing*, 2nd. Falls Church ed. Virginia: American Society of Photogrammetry, 1983.745
- 6 Moik J G. *Digital Processing of Remotely Sensed Images*. Washington, D.C.: NASA, 1980:296~306
- 7 Goetz A F H, et al. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1989, 27(2):136~144
- 8 Thomas H M. *Proc. IGARSS'82*, 1982:1.1~1.6
- 9 中国科学院空间科学技术中心. *中国地球资源光谱信息资料汇编*. 北京: 能源出版社, 1986. 13, 279, 401, 631, 853
- 10 Pratt W K. *Digital Image Processing*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1978.

STUDY OF ONBOARD REAL-TIME DATA COMPRESSION FOR THE SPACEBORNE IMAGING SPECTROMETER

Zhang Fu

*(Shanghai Shiner Optoelectronics Company, Shanghai Institute of
Mechanical Engineering, Shanghai 200093, China)*

Gong Huixing Zhang Zhimin

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract For discussing the ground information acquisition mode of the spaceborne imaging spectrometer, this paper applies the optimal linear predictive compression technique in combination with the Huffman high-efficiency coding method to achieve the goal of strict information-preserving compression for the spectral and spatial composite data of the spaceborne imaging spectrometer. In this paper, the basic principle, system realization and the corresponding experimental results and conclusions of the onboard real-time data compression technical scheme for the spaceborne imaging spectrometer are given.

Key words spaceborne imaging spectrometer, remote sensing, data compression.