

# 成像光谱技术中机上实时数据 压缩方法研究

钱 神 恩

(中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学开放实验室)

## 提 要

根据成像光谱仪的特点用一系列串行的一维压缩实现二维图像压缩。提出了在机上对原始数据从光谱方向进行实时压缩的“二真值线性预测方法”。该法可做到压缩/复原后光谱特征信息不丢失。实验表明,对大多数光谱数据在1%的重建精度下,至少可获得2:1的压缩比。从总体而言,压缩后原始数据率可降低3~4倍。文中还对压缩数据的编码和误差进行了讨论。

关键词: 成像光谱,实时处理,数据压缩。

## 一、引 言

成像光谱仪是八十年代初出现的新一代遥感器,它在获得目标影像信息的同时还获得了其光谱信息<sup>[1]</sup>。由于多了一维光谱信息,结果原始数据率比传统遥感中增加1~2个量级。以高分辨率成像光谱仪为例,即使以8 bit/pixel量化时原始数据率就达621 Mbps,大大地超出了任何下连接设备所能承受的能力<sup>[2]</sup>。因此,大幅度地降低原始数据率是数据流传输和存贮首先光面临的问题,其有效的解决措施是在机上实时地把数据率降至可接受的水平,然后再向地面传输和存储。

由信息论知,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<sup>[3]</sup>。成像光谱仪的原始数据无论在空间、时间还是光谱各方面都存在很强的相关性,消除或减少这些相关性就能实现数据压缩。图1是焦平面用面阵探测器的成像光谱仪原理图<sup>[4]</sup>。某一瞬时测量的一行(Swath)地面目标成像在面阵探测器上是二维图像,其中一维对应该行上每个地面瞬时视场,另一维量对应每个地面瞬时视场的光谱。若让探测器沿光谱方向逐列读出,每一列像元信

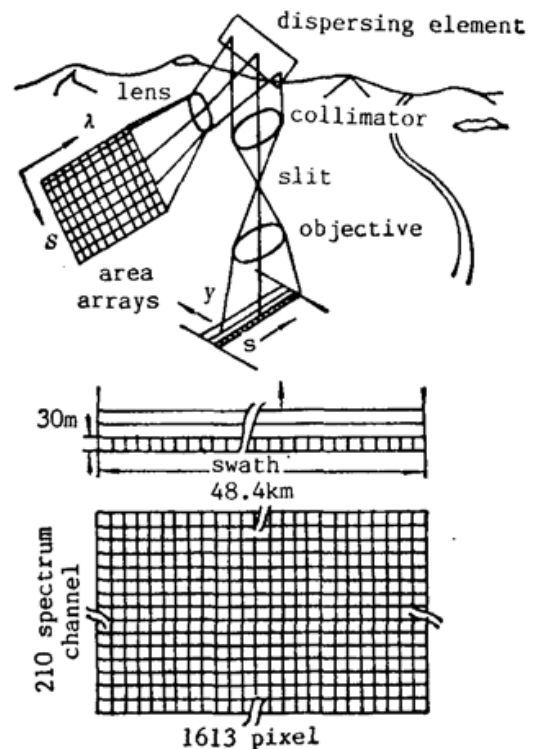


Fig. 1 Imaging spectrometer conception using area-array detectors

号对应一个地面瞬时视场的光谱。在探测器串行输出时边采集边压缩,只要压缩处理周期不大于采集周期就能做到实时压缩。这样每一行地面目标对应的二维图像的压缩可用一系列串行的一维压缩来实现。

为弄清从光谱方面的可压缩性,模拟成像光谱仪的条件,对土壤、矿物、植物和水等具有代表性地面目标的光谱,进行了可压性统计分析。结果表明,大多数情况下,至少可获得 2:1 的压缩比,若每个地面瞬时视场的光谱平均压缩比为 3:1,原始数据率可降低 3 倍。光谱数据压缩比越大,原始数据率下降越多<sup>[4]</sup>。

下面讨论保留光谱信息的实时数据压缩方法、编码技巧和误差,最后给出这种方法的实验结果。

## 二、光谱数据压缩的方法及编码

所有的压缩方法必须满足:(1)算法简捷,实时性好,便于硬件实现;(2)在相同的重建精度下可获得尽可能大的压缩比;(3)对光谱特征信息如吸收峰位置、强度等在压缩/复原时应尽量不引入误差。为此,本文在线性预测法的基础上提出了一种适合上述条件的方法。

### 1. 二真值线性预测方法

线性预测是用  $t$  时刻的前两个值  $y(t-2)$ 、 $y(t-1)$  来预测  $y(t)$  及其随后值,预测表达式为

$$\hat{y}(t+k) = (k+2)y(t-1) - (k+1)y(t-2), \quad (k=0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

亦即用  $y(t-2)$ 、 $y(t-1)$  连成的直线来进行预测。为方便起见,下面记连成预测线的两个点  $y(t-2)$ 、 $y(t-1)$  为  $y_2$ 、 $y_1$ , 这时预测表达式(1)为:

$$\hat{y}(t+k) = y_1 + (y_1 - y_2)(k+1), \quad (k=0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

当预测误差满足

$$|\hat{y}(t+k) - y(t+k)| \leq W \quad (3)$$

时,就认为该值是冗余采样而丢弃,用预测值取代;当误差大于误差窗容限  $W$  时,就认为  $y(t+k)$  为非冗余采样,保存并将其作为下一条预测线的  $y_1$ , 以此类推。图 2 是线性预测的原理图<sup>[6]</sup>。一条预测线上预测到的冗余采样的个数称为游长(Run length),显然游长越长压缩比就越大。

除起始预测线外,每条预测线的预测过程只保存非冗余采样  $y_1$  和游长  $RL$ ,  $y_2$  是上条预测线上最后一个预测值。图 3(b)是这种方法对图 3(a)的原始数据压缩后复原的光谱曲线。210 个光谱采样用 67 条预测线逼近、平均游长为

$$\overline{RL} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N rl_i = 2.1$$

由图可见恢复曲线在原曲线的平坦区域产生了  $2W$  的抖动。这是由于  $y_2$  不是实际值,由此延长的预测线不能很好地适应实际值的变化趋势造成的,结果使预测线增多,游长变短。

为克服这个问题,  $y_2$  不用预测值而用该时刻的真实值,并也作为非冗余采样保存。我们

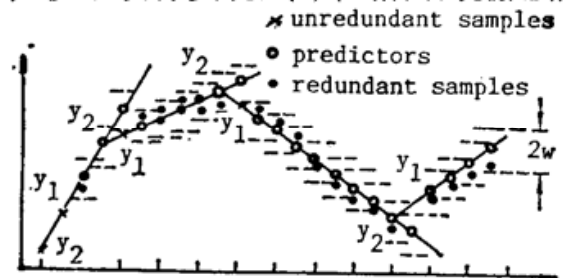


Fig. 2 Illustrated figure for one-order linear predictor

称这种两个真实值的线性预测为“二真值线性预测”。图3(c)是 $W$ 不变时这种方法的结果,

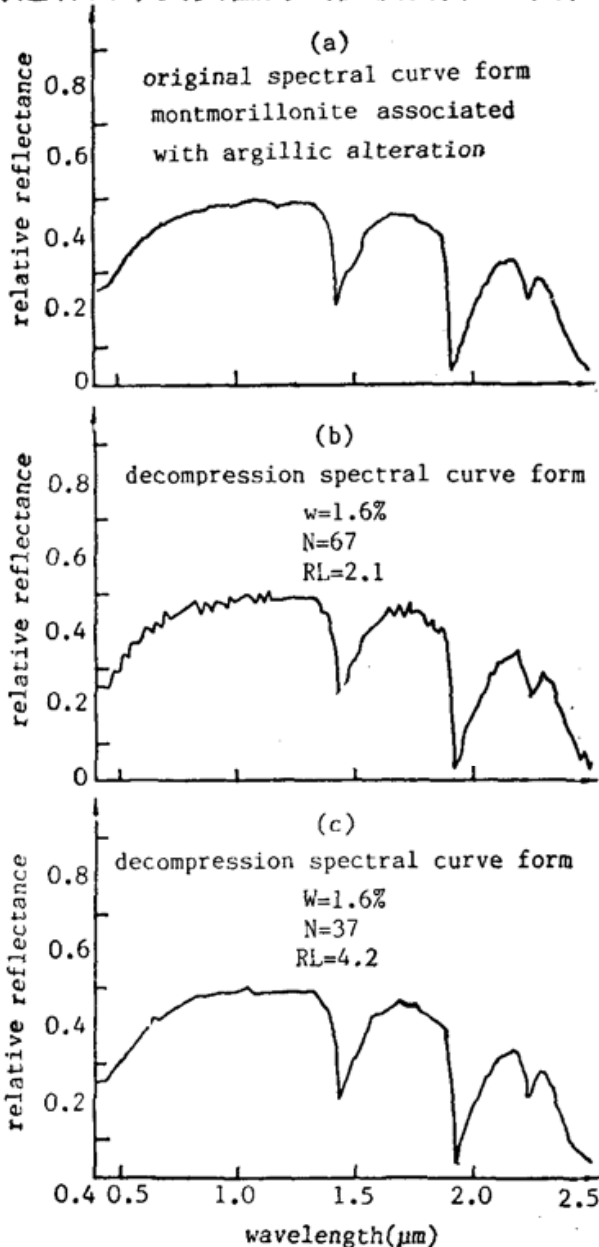


Fig. 3 Two predicting results with different  $y_2$  taking

可见平坦区域的抖动几乎消失, 预测线数量减至  $N=37$ , 平均游长提高为  $RL=4.2$ 。图4是这种方法保留光谱特征信息压缩的示意图。吸收峰附近斜率剧变, 峰值处曲线凹向改变, 当预测误差超出窗容限时, 预测线更新, 新预测线的  $y_2$  和  $y_1$  位置同时又分别是上束预测线的最后一个预测值的位置和误差大于  $W$  的非冗余采样值的位置。大多数情况吸收峰之峰值都出现在  $y_2$  或  $y_1$  位置的某一个上, 由于  $y_2$ 、 $y_1$  均作为非冗余采样保存, 所以压缩过程中峰的强度、位置没有引入误差。这种力法在变化梯度大的区域游长短, 压缩掉的信息少。图4中对由21个采样点构成的吸收峰只压缩了8个冗余采样值, 吸收峰形状基本未变。

二真值线性预测法不仅有利于增大游长而且还保留了光谱特征信息。代价是比通常方法多保存一个非冗余采样, 在下面要讨论的编码方法中将会知道保存  $y_2$  无需用一个全字节。由于平均游长成倍地增加, 总压缩比不仅没有因此下降反而有所提高。

## 2. 编码方法

为提高比特压缩比, 最大限度地减少表示压缩数据的总比特数, 有必要对编码方法进行研究。在8 bit分辨率系统中存储  $y_1$  需8 bit。经大量实验发现相邻预测线  $y_1$  之差的绝对值

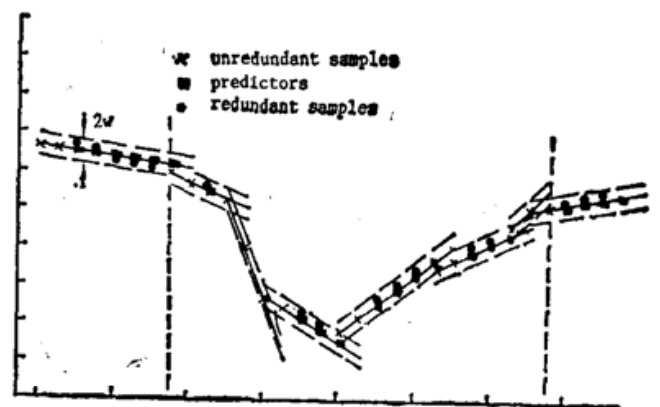


Fig. 4 A predicting process of an absorption peak with the two-true-value linear prediction method

表示了。对  $\geq 2^m$  的游长,仍采用加溢出比特和逗号的方法来解决。这样对大多数游长只需用  $(m+1)$  bit 就可以表示了。

成像光谱中系统最终测量精度受多种因素影响。若要达到 1% 的系统测量精度仅就信噪比而言至少要保证 40 dB,这在实际系统中是很难做到的。所以在压缩过程中引入 1~2% 左右的误差是可接收的。误差控制过小不利于压缩比提高,也是不必要的。若选上限值 2%,在 8 bit 分辨率系统中对应的量化值  $W=5$ 。由于  $y_2$  与上条预测线上最后一个预测值差的绝对值  $\leq W$ ,保存这个差及符号只需 4 bit 即可。在复原  $y_2$  时只需先算出预测值,然后加上保存的误差就可得到实际采样值。

综上所述,可将用一条预测线压缩后数据的编码格式表示成如下:

+ / -	×	×	×	+ / -	n bit	溢出 bit	逗号	m bit	溢出 bit	逗号
$y_2$ 误差				非冗余采样 $y_1$ 的增量 $\Delta y_1$			游 长			

这种编码方式由于大多数情况两个溢出比特均为零,表示每条预测线的压缩数据只需  $(7+n+m)$  bit 可最大限度地减少压缩后总比特数,进一步提高压缩比。

在机上进行实时压缩过程中,每个地面瞬时视场对应的光谱按上面讨论的方法进行压缩和编码。为便于复原和防止出错,在每个地面瞬时视场光谱压缩数据段后加入两字节的地面瞬时视场同步字,对每帧压缩行数据加入四字节于行同步字。

### 三、误差分析

假设预测误差在窗容限  $\pm W$  内均匀分布,分布函数为  $\omega(x) = (1/2W)$  均值为  $M = E[x] = 0$ ,可求得均方根误差为

$$E = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (x-M)^2 \omega(x) dx} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (x^2/2W) dx} = (W/\sqrt{3}), \quad (4)$$

考虑一种最坏的情况,假定所有冗余采样的复原误差均为  $W$ ,这时的均方根误差最大。不失一般性,假定每条预测线的游长平均为  $\overline{RL}$ ,由于  $y_2, y_1$  没有误差,而  $\overline{RL}$  个冗余采样的误差均为  $W$ ,可算得最大均方根误差为

$$E_M = \sqrt{\frac{\overline{RL}W^2}{\overline{RL}+2}} = W \sqrt{\frac{\overline{RL}}{\overline{RL}+2}}, \quad (5)$$

实验压缩数据的误差可按式求得

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (g_i - a_i)^2}. \quad (6)$$

式中  $a_i$  为原始光谱数据,  $g_i$  为复原数据,  $N$  为光谱道数。

### 四、实验结果

用前面讨论的方法对几种按成像光谱条件获得的典型地面目标光谱进行实验分析。图 5 是某一光谱的压缩情况,图 5(b)、图 5(c)和图 5(d)为分别对应  $W=1.2\%$ ,  $2\%$ ,  $2.8\%$  时

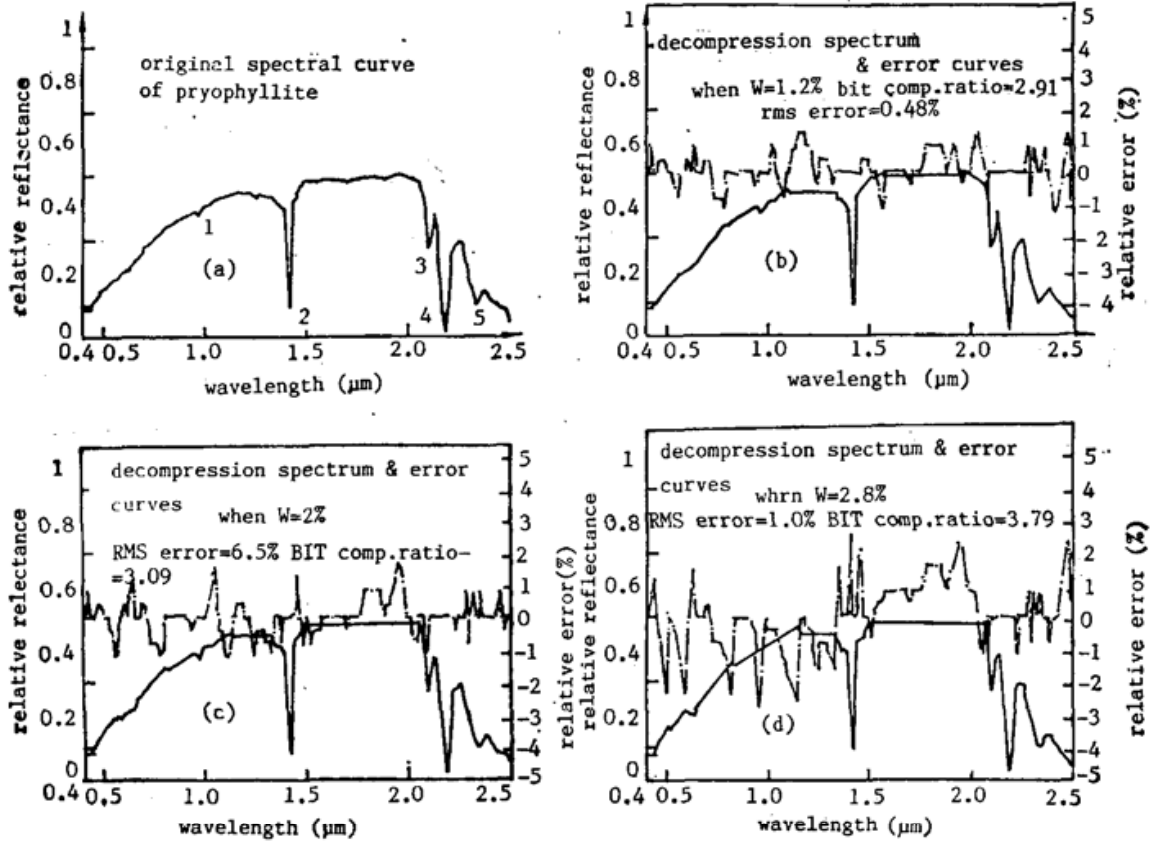
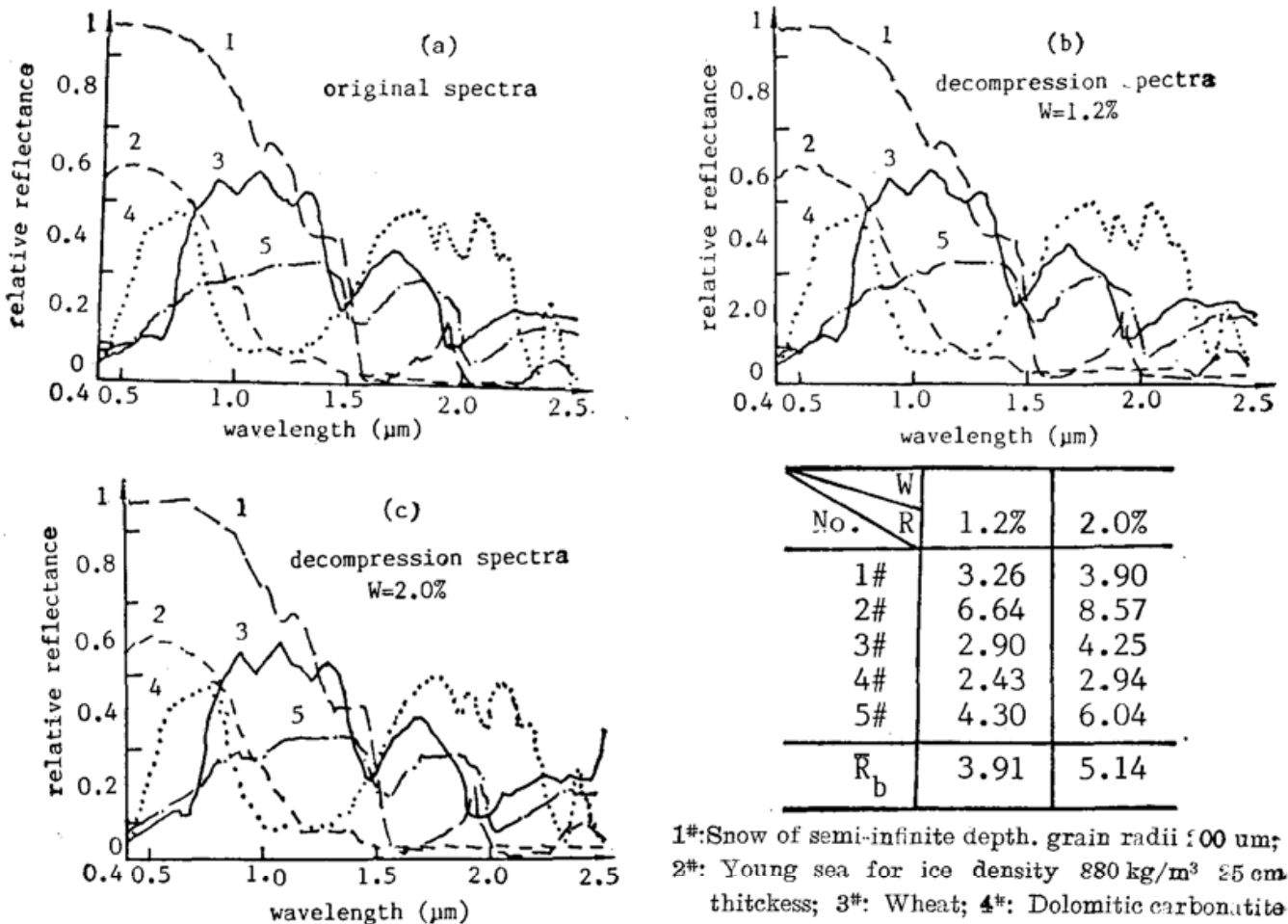


Fig. 5 Compression/decompression spectrum & error curves of the pyrophyllite with advanced argillic alteration



1#: Snow of semi-infinite depth, grain radii 100 μm;  
 2#: Young sea for ice density 880 kg/m<sup>3</sup> 25 cm thickness; 3#: Wheat; 4#: Dolomitic carbonatite  
 5#: Soil (low organic, low iron content)

Fig. 6 Experimental results of compression/decompression spectral datum corresponding to five typical ground objects

压缩后复原光谱和误差曲线。图 5 中所列各均方根误差均按(6)式求得,比按(4)式的统计值要小。由图 5 可见,各吸收峰及其附近误差为零。在  $W=2\%$  时,即使吸收强度相对弱的  $1^{\#}$  峰也没有丢失。但当  $W=2.8\%$  时,  $1^{\#}$  峰就丢失了,这是因为  $W$  太大把吸收峰深度小于  $(W/2)$  的小峰当作曲线的起伏而丢失的。实际上  $1^{\#}$  吸收峰的深度只有  $1.2\%$ 。所以在选择  $W$  时应在压缩比和最小吸收峰保留之间权衡,看具体情况而定。

图 6 是五种典型地面目标光谱的数据压缩结果。图 6(a)是原始光谱曲线,图 6(c)、图 6(d)分别为  $W=1.2\%$ 、 $2\%$  时压缩后复原光谱曲线。各曲线的名称列在图的下方。即使信息量较大的  $4^{\#}$  光谱在  $W=1.2\%$  时也可取得大于  $2:1$  的压缩比;对  $2^{\#}$  光谱因曲线较平坦,信息量相对小,当  $W=2\%$  时压缩比达到了  $8.57$ 。就这五种典型光谱平均而言,当  $W=1.2\%$  时,平均压缩比  $\bar{R}_0=3.91$ ;当  $W=2\%$  时  $\bar{R}_0=5.14$ 。

## 六、结 论

为解决成像光谱仪高速数据流的传输和存储问题,大幅度地降低原始数据率,在机上进行实时数据压缩是十分必要的。根据成像光谱仪的特点,从光谱方向对每个地面瞬时视场对应的光谱信息作实时压缩是可能的。本文论及的方案在系统可接受误差范围内,对大多数地面目标的光谱至少可获得  $2:1$  的压缩比。就宏观总体而言,可使原始数据率下降  $3\sim 4$  倍,在压缩/复原过程中可保证光谱特征信息不丢失。

## 参 考 文 献

- [1] A. F. H. Goetz *et al.*; *Science*, 1985, **228**, No. 4704 (Jun), 1147~1153.
- [2] M. Herring; *Proc. SPIE*, 1986, Vol. 644 (Apr), 82~85.
- [3] N. Abramson; «Information Theory and Coding», (McGraw-Hill, New York, 1963), 156.
- [4] Joseph M. Conley *et al.*; *Proc. SPIE*, 1987, Vol. 834 (Aug), 188~195.
- [5] Thomas J. Lynch; «Data Compression Techniques and Applications», (Lifetime Learning Publication, Belmont, California, 1985), 136.
- [6] NASA, *High-Resolution Imaging Spectrometer: Science opportunities for the 1990s*, ERATH OBSERVING SYSTEM, Vol. IIc, 1987.

## Study of a real-time data compression method in imaging spectroscopy

QIAN SHEN'EN

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)*

(Received 10 July 1989; revised 22 August 1989)

### Abstract

According to the feature of imaging spectrometer, compression of a two-dimension image is converted into a series of one dimension processings. A real-time "two-true-value linear prediction method" has been developed to have the ability of on-board compressing the original data in the spectrum direction. This method can preserve absorption peak information during compression/decompression process. The results show that for most spectra at least 2:1 compression ratio has been obtained under 1% reconstruction accuracy, on an average the original data rate can be reduced by 3~4 times. The art for coding compressing data, and the decom resion error has also been described.

**Key words:** imaging spectroscopy; real-time data processing; data compression.