

遥感图像数据实时无失真压缩的研究

郭一平

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

B. C. Forster

(Center for Remote Sensing & GIS, and School of Surveying
The University of New South Wales, Australia)

摘要: 讨论了对单波段遥感图像和多波段遥感图像都适用的一种实时无失真数据压缩的方法。该方法应用线性预测原理减少数据的冗余度并应用 Huffman 编码以实现最佳平均码长。文中讨论和比较了几种预测的方法, 并选用了 2-D 空间预测。为方便实现实时的数据压缩, 本文对 Huffman 编码作了必要的简化。对于不同编码技术的结果, 文中也进行了讨论。本方法将软件仿真应用于 LANDSAT TM, SPOT HRV, AIR SAR 以及中科院上海技术物理研究所研制的航空成像光谱仪的 8 bit/像元遥感数据, 平均压缩比为 2, 其中最高的为 3.1, 最低的为 1.2。

关键词: 图像数据压缩, 无失真, 实时。

引言

随着遥感技术的发展, 人们一直在寻求能有效地处理数据“爆炸”的数据压缩方法^[1,2], 数据压缩的作用在工程应用中主要有两个。首先, 当数据记录和传输设备所能承受的数据率低于数据源的数据率时, 数据压缩可以降低数据源的数据率, 使之能够被现有的设备所接受。其次, 当记录设备的容量确定之后, 采用数据压缩可以在一定的容量内容纳下更多的数据。通常数据压缩技术可分两大类。一类是无失真压缩, 即在压缩后不丢失任何信息, 无失真压缩是可逆的, 压缩之后的数据可以完全恢复成为压缩前的原始数据。第二类是有失真压缩, 它是不可逆的, 不可能完全恢复原始数据。通常有失真的数据压缩方法可以得到较高的数据压缩比, 其代价是丢失部分信息。对于数据采集系统来说, 所有的数据、信息都可能是重要的和宝贵的, 所以无失真压缩技术对于传感器系统具有特别重要的意义, 为此, 我们进行遥感图像数据实时无失真压缩的研究。

1 系统设计

数据压缩的全过程可以分成两部分. 首先是减少数据的冗余度或相关性, 提取有用的信息, 减小信息熵. 其次是采用相应的编码技术对所提取的信息进行编码, 使减少后的信息熵得以具体实现. 1948 年, Shannon 首次给出了一系列独立事件的熵的定义式为

$$\text{熵} = - \sum P_i \cdot \log_2(P_i) \quad (\text{比特/事件}) \quad (1)$$

式 (1) 中 P_i 为各独立事件发生的概率. 由于遥感图像具有高采样率、一定的扫描重叠率和光谱重叠率等特点, 图像数据的冗余度很高. 因此无失真图像数据的压缩越来越把注意点放在寻求高效去除相关和提取信息的方法研究上.

1.1 信息熵的减少

在无失真图像数据压缩技术中, 广泛采用预测方法来减少图像数据的信息熵. 预测的基础是利用图像中相邻像元之间的相关性. 如果能准确地将数据源预测为某一时间函数的话, 则此数据源已被完全确定, 从而也就不再需要传送任何信息, 即信息的熵已减为零.

对于遥感图像而言, 通常具有三维信息. 其中二维是空间信息, 另一维是光谱信息. 合乎逻辑的做法是充分利用三维信息来作预测. 然而 Chen^[2] 等人在理论上计算了利用三维信息所能得到的收益, 他们指出, 当利用多于一维信息作预测时, 对于数据压缩的结果会有某些改善, 但改善不大. 当然, 如果使用多维信息预测所增加的复杂程度在容许范围之内, 利用多维信息预测依然是合理的.

作者对一维预测, 包括行内预测 (H)、行间预测 (V) 以及光谱预测 (S)、二维预测 ($H+V$) 和三维预测 ($H+V+S$) 进行了研究. 图 1 是用 LANDSAT TM 4 个波段图像以及

上海技术物理研究所的航空成像光谱仪前 16 个波段可见光图像所得到的结果, 所有的图像均为 8 bit/像元.

在一维预测方法中, 行内预测和行间预测都比通道间的光谱预测效果要好得多. 该结果说明通道间的相关性相对较弱. 对于二维预测方法, 二维空间的预测 ($H+V$) 效果优于一维预测方法. 但正如 Chen^[3] 等人所指出的, 改进的效果有限. 涉及光谱维的预测, 如 ($H+S$) 和 ($V+S$) 的效果都不如一维空间预测的效果好, 所以图 1 未列出它们的结果. 三维预测 ($H+V+S$) 同样受到光谱维的影响而效果欠佳. 因此我们选择二维空间的预测. 它可以表示为

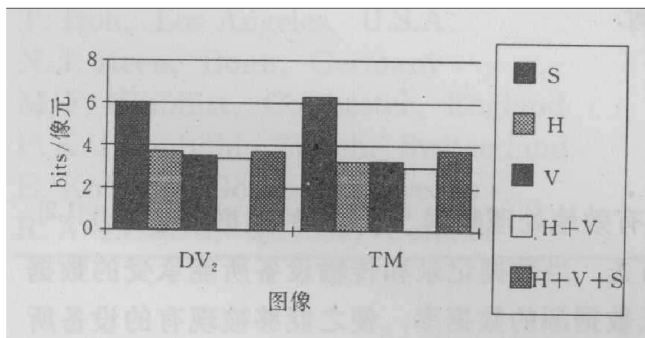


图 1 利用航空成像光谱仪 16 波段图像 (DV_2) 和 LANDSAT TM 4 波段图像 (TM) 对各种预测方法结果比较

Fig. 1 The comparison of entropy for some prediction, using 16-band imaging spectrometer data (DV_2) and a 4-band LANDSAT TM image (TM)

$$U'_{ij} = \sum_i \sum_j a_{kl} \cdot U_{i-k, j-l}, \quad (2)$$

第 ij 个实际图像与预测值之间的差为差分 (误差) 图像, 其表达式为

$$e_{ij} = U_{ij} - U'_{ij} + \text{offset}, \quad (3)$$

式 (3) 实际上是全范围的差分脉冲编码调制 DPCM, 因此是不失真的可逆过程. 为了今后编码的方便, 式 (3) 中引入了一个正值的常数作为偏移量. 若原始图像为 8 bits, 则差分图像亦然. 虽然存在“卷曲”效应, 但只要数据压缩和去压缩过程都采用同样的规则进行预测, 就可以从差分图像准确无误地恢复原始图像.

1.2 编码

图像数据压缩的第 2 步是用适当的编码技术对信息熵已经得到减小的差分图像进行编码, 最终实现数据的压缩. 目前最常用、效率最高的变字长编码技术之一是 Huffman 编码, 而另一种是算数编码. 由于算数编码是对一组数据而不是对单个数据进行编码, 故在理论上它有优于或至少不劣于 Huffman 编码的效率. 但一般而言, Huffman 编码容易实时和高速实现, 所以作者采用的是 Huffman 编码技术. Huffman 编码技术可分为两类. 一是静态的 Huffman 编码, 即预先已知或事先统计了各种类型的差分图像, 以掌握其统计规律, 在此基础上生成 Huffman 树或表格 (LUT); 该方法的优点是简单, 易于高速实现, 不足之处是当实际的差分图像统计特性随时间变化或与事先得到的统计性质存在明显差别时, 数据压缩的效率将会有不同程度的下降. 第二种改进的方法是自适应的 Huffman 编码技术, 即随着输入差分图像统计特性的改变, 不断调整或重新生成 Huffman 树. 该算法充分保证数据压缩的高效率, 但复杂性增加且不易实现高速. 作为折衷, 若输入的差分图像的统计性质变化相对较小时, 动态地调整 Huffman 树上各个节点, 而不是生成新的树, 可以较好地解决复杂程度、耗时与压缩效率之间的平衡问题.

当实际生成 Huffman 树时, 如果不加区别地将 8 位数据所能表示的 256 个状态以及为增加可靠性而引入的行结束符 EOL 一起编码, 不仅形成的树很大, 而且节点很多. 更严重的是绝大多数节点都对应小概率事件, 对于不同的图像它们的离散程度很大. 为克服上述缺点, 作者对 Huffman 编码作了修改. 在 256 个事件中, 引入一个编码窗口

$$C = \begin{cases} c, & \text{如 } c_1 < c < c_2, \\ cc, & \text{其它,} \end{cases} \quad (4)$$

即凡是位于窗口内的事件均作为独立事件, 而在窗口外的所有事件则组成一个综合的“独立事件”, 与前述的独立事件以及行结束符一起编码, 生成 Huffman 树. 在实际的编码过程中, 对综合事件的处理是先送出它的 Huffman 码作为标志, 然后送出差分图像的 8 位原码. 由于综合事件的概率约为 5%, 这样处理对压缩效率的损失不大, 却大大减化了编码过程, 克服了小概率事件随图像变化的问题.

1.3 算法的实时实现

一个数据压缩过程是实时的, 是指存在着一个常数 K , 该常数不依赖于所处理的数据, 若对于每个 K 单位的时间而言, 数据压缩的入口数据数目与数据解调的出口数据数目总是相等, 则该过程就称之为实时的. 对于上述说法的唯一例外是允许在数据压缩和解调之间存在小的延时.

为了便于实时实现算法, 作者对算法再加上两个简化处理. 第一是保证在预测时各系数满足下列条件

$$\begin{cases} a_{kl} = 2^n, \\ n = -2, -1, 0, 1, 2. \end{cases} \quad (5)$$

该简化保证了预测的所有操作均可归结于仅仅是相加和移位操作. 其次是 Huffman 的码长不超过 8 位.

图 2 是本算法实现的方框图. 对于二维 ($H+V$) 预测, 需要设置两行的缓冲区. 在计算实现算法的时间时, 必须考虑对缓冲区存取的时间. 若考虑使用通用硬件或特殊 VLIC, 在计入存储器读写时间和相加-移位操作的条件下, 预测部分数据入口的数据率可以达到 10~20 Mbyte/s. 下一步是考虑 Huffman 编码. Huffman 编码的原型是需要存储器作缓冲的, 但正如上面所述, 修正后的 Huffman 编码对码长作了限制, 其码长不超过 8 位, 这为无存储器工作方式提供了可能. 在无存储器工作方式下, 数据处理的“瓶颈”是编码的移位操作, 据估计用上述器件只能达到 3~4 Mbyte/s 数据率. 在设置存储器作缓冲后, 数据率可大大提高, 其改善程度为对所缓冲的数据处理的平均效果与极端条件下最差效果之比, 也可以达到 10~20 Mbyte/s 的数据率. 解码器的工作状况与编码器相同, 在此就不赘述了.

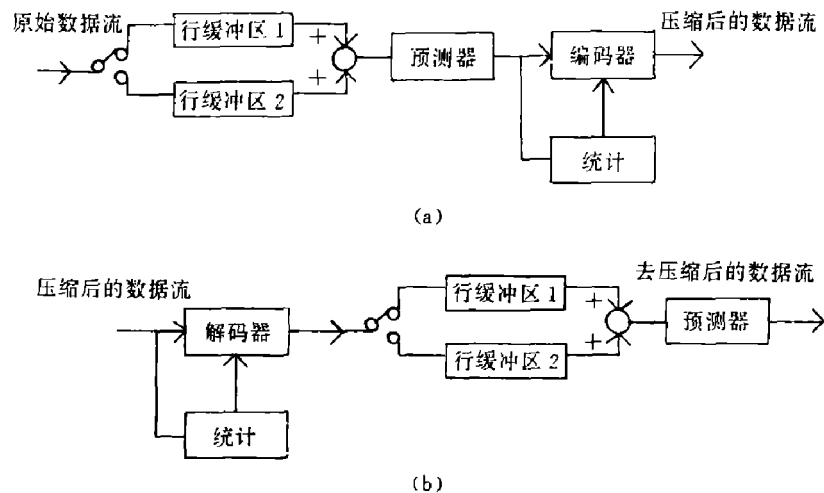


图 2 算法实现的方框图
Fig. 2 The diagram of the algorithm

2 数据处理结果

作者用软件仿真方法将上述算法应用于遥感图像, 进行数据压缩. 所使用的图像有 TM 图像 (第 1, 2, 3, 4, 5 和 7 波段, 512×512, 8 bits/像元)、SPOT HRV 图像 (第 1、2 和 3 波段, 512×512, 8 bits/像元)、机载综合孔径雷达图像 (HH, HV 和 VV 偏振, 1024×1279, 8 bits/像元) 以及中国科学院上海技术物理研究所研制的航空成像光谱仪的图像 (16 个波

段, 512×1024 , 8 bits/像素). 压缩的结果列于表 1. 压缩的效果由数据压缩比和平均码长衡量. 上述所有的图像压缩后均经过解码检验无误.

表 1 各类遥感图像数据压缩的结果

Table 1 Results of the algorithm applied to various remotely sensed images

图像数据	注 释	压缩比/平均码长 (静态编码)	压缩比/平均码长 (动态编码)
SPOT1	512×512	2.23/3.59	2.26/3.54
SPOT2	SPOT HRV	2.49/3.21	2.51/3.19
SPOT3	图像	1.94/4.12	1.94/4.12
	平均	2.22/3.64	2.27/3.61
TM1		2.45/3.27	2.45/3.27
TM2		3.07/2.61	3.07/2.61
TM3	512×512	2.79/2.87	2.79/2.87
TM4	LANDSAT TM	2.01/3.98	2.01/3.98
TM5	图像	1.87/4.29	1.87/4.29
TM7		2.34/3.42	2.34/3.42
	平均	2.43/3.41	2.43/3.41
DRVV1	512×1024	1.87/4.27	1.95/4.10
DRVV2		2.08/3.84	2.15/3.73
DV1	上海技术物理所	1.89/4.23	1.98/4.05
DV2	成像光谱仪 16 通道图像	2.19/3.65	2.27/3.52
	平均	2.01/4.00	2.09/3.85
BKCHH	1024×1279	1.21/6.61	1.26/6.35
BKCVH	AIR SAR	1.56/5.13	1.57/5.10
BKCVV	图像	1.33/6.02	1.35/5.93
	平均	1.37/5.92	1.39/5.79

图 3 是 TM、HRV 和成像光谱仪图像理论计算的信息熵与实际压缩结果比较的情况.

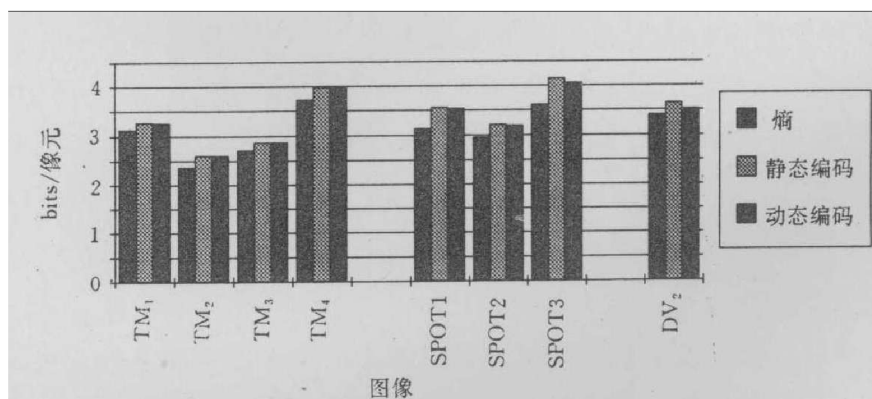


图 3 LANDSAT TM、SPOT HRV 和成像光谱仪图像的信息熵与实际压缩结果的比较
Fig. 3 Comparison of entropy and the results of using static and dynamic Huffman coding for LANDSAT TM, SPOT HRV and imaging spectrometer data

3 结论

上述无失真数字图像压缩算法的结果表明:

(1) 本方法适用于压缩单波段和多波段数字图像, 压缩的结果与波段数无关. 本方法亦可用于雷达遥感图像的压缩, 但由于雷达图像中含有较高的噪声成分, 故压缩的效果不如光学遥感图像的压缩效果.

(2) 虽然编码器在实际实现时对许多问题作了简化, 但最后的编码结果仍接近于理论的极限-熵. 说明所作的简化处理是合理的.

(3) 静态 Huffman 编码的结果与动态 Huffman 编码的结果很接近, 其差别仅 0~5%.

(4) 由于对实际问题的简化, 本算法易于实时地实现.

(5) 利用二维空间信息比仅利用一维空间信息可以改善数据压缩的结果, 然而改善的程度有限.

(6) 由于图像数据的熵取决于算法中图像的模式, 即对图像的理解与描述, 故进一步改善数据压缩结果的关键是寻求更有效地去除相关和信息抽取的算法.

致谢: 作者对澳大利亚新南威尔士大学遥感中心主任 Dr. A. Skidmore 的鼓励与该中心 J. C. Kingberg 热心提供遥感图像表示衷心感谢.

参考文献

- 1 Khalid Sayood. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Newsletter*, 1992
- 2 Chen T M, Staelin D H, Arps R R. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1987; **GE-25**:499-501
- 3 Xue Y Q *et al.* *Proceedings of the 11th Asian Conference on Remote Sensing*, Guangzhou, China, 1990, P-32
- 4 Gilbert Held. *Data Compression-Techniques and Applications, Hardware and Software*, 2nd Edition, New York: Wiley, 1987
- 5 Lynch T J. *Data Compression-Techniques and Applications*, New York: Van Nostrand Reinhold, 1985

STUDY ON REAL-TIME LOSSLESS DATA COMPRESSION FOR REMOTE SENSING IMAGES

GUO YIPING

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

B. C. FORSTER

*(Center for Remote Sensing & GIS, and School of Surveying,
The University of New South Wales, Australia)*

Abstract: The paper describes a real-time lossless data compression algorithm for both individual band and multi-spectral remote sensing images. This approach uses prediction to reduce the redundancy and classical Huffman coding to reduce the average code length. Several kinds of predictions were studied and the 2-D prediction was selected. Some simplifications were taken in the Huffman coding for real-time use. A comparison between the coding methods was discussed. The scheme was applied to the 8 bits/pixel original images of LANDSAT TM, SPOT HRV, AIR SAR and imaging spectrometer by software emulation. An average compression ratio of 2, with the highest value of 3.1 and the lowest value of 1.2 for the radar images, was achieved.

Key words: image data compression, lossless, real-time.