

航天遥感图象压缩技术的最新发展

贾晓光 王 雷

(哈尔滨工业大学航天电子与光电工程系, 哈尔滨 150001)

摘 要 介绍了当今图象压缩技术的发展现状, 以及航天遥感数据压缩技术的应用现状, 探讨了目前各种图象压缩技术的特点, 并说明了各种技术应用于航天遥感的可能性。对将来我国航天遥感星载无损压缩、有损压缩以及地面数据压缩提出了建议。

关键词 图象压缩, 保真度, 有损压缩, 无损压缩, 分类, 遥感, Rice 算法

1 引言

随着遥感技术的发展, 新型航天遥感器(成像光谱仪和合成孔径雷达等)及未来的地球资源探测平台所获取的数据量越来越大, 如高分辨率成像光谱仪 HIRIS 将要获取 30 米地面分辨率的 192 个波段的数据。其数据传输率达 280Mbps! 不但给星上数据存储和传输信道带来过重负担。也使地面的数据接收难以应付。另一方面, 遥感图象数据本身却存在着相当大的冗余度。显而易见, 压缩是极其必要的。且近年来随着信号处理和大规模集成电路技术的发展, 图象压缩技术取得了长足进展。多种压缩技术走向成熟, 从而使无论在星上或地面进行压缩成为可能。

遥感图象压缩技术大体上可分为三大类: 无损压缩、有损压缩和分类。无损压缩提供了不丢失信息的压缩技术。可从压缩数据无误地恢复原始图象, 但压缩比不高。有时遥感图象是供人眼观察。可允许轻微的失真。另一方面, 未来遥感系统的数据即便采用无损压缩仍可能超过信道容量的上限, 必须舍弃一些数据。这时需采用有损压缩以获得大的压缩比。所谓分类是指当用户只对所获图象中具有某种特征的部分感兴趣时, 可在星上抽取特征并仅传输符合其特征的图象子集, 而不传输所有数据, 这样便压缩掉大量的数据, 所以也属有损压缩。

2 当今图象压缩技术的发展现状

由于航天遥感与通信、多媒体、ISDN 及大众传播技术联系紧密, 有广阔的应用领域和前景, 与之息息相关的图象压缩技术发展很快, 在经典压缩方法基础上有许多新算法问世。

2.1 压缩技术的分类

图象压缩技术分类方式很多, 到目前为止尚未统一。多数学者比较认同的是将压缩分为无损压缩和有损压缩两类。文献[1]给出了压缩技术的简单分类。

2.2 无损压缩

经典的数据压缩理论建立在信息论的基础上。数据压缩的基本途径之一就是设法改变信源的概率分布使其尽可能地非均匀。再用最佳编码方法使平均码长逼近信源的熵。常见的无损压缩方法有霍夫曼编码、算术编码、Rice 算法等^[1]。

2.3 有损压缩

无损压缩的最小数据量以其信息熵为限, 压缩效率有限。有损压缩也称熵压缩。由于信息熵被压缩, 压缩效率提高。目前研究较多的是变换编码、矢量量化、小波变换编码、分形图象编码、人工神经网络

络等。

2.4 图象压缩硬件的进展

随着大规模集成电路的发展,符合各种国际标准要求的硬件芯片不断问世。因通用处理器价格昂贵,针对具体算法的专用芯片应运而生。如针对 JPEG 的 CL550 和 ST1140、针对 MPEG-1 的 CL450 和 XCD250 等。而高性能的通用信号处理器由于可编程多功能性,当算法升级或新标准出现时,只要局部改变微码即可适应,比专用芯片灵活得多。所以发展速度也异常迅猛。TI 公司的最新数字信号处理器 TMS320-C80,采用 $0.5\mu\text{m}$ CMOS 工艺,集成了 400 万个晶体管,包含与一个 32 位 RISC 内核一道并行工作的 4 个 DSP 内核,其机器周期为 25ns,可实现 JPEG、H. 261、MPEG-1 等多种图象压缩算法的编解码^[1]。高性能浮点数字信号处理器还在不断出现。

3 国际上航天遥感图象压缩现状

航天传感器要求以有限的信道容量尽可能多地传送遥感信息。主要使用无损压缩,但当信息量大到无损压缩无法满足信道要求时,也考虑失真较小的有损压缩。若只对某些特殊区域感兴趣,可采用分类压缩。对供观察和浏览的图象,不要求很高质量,可采用高压缩比的压缩,以减轻通信和存储的负担,星上压缩方案要求实时和硬件复杂度低(功耗小),在地面上,要求可以放宽,硬件复杂度可以高一些,速度也不是非常重要。下面分别讨论。

3.1 星上无损压缩

星上数据压缩主要是因为信道容量有限所致。目前以无损压缩为主。鉴于遥感图象像素间强烈的相关性,压缩过程分为去相关和编码两步。去相关是为了减小熵。去相关以后图象的一阶熵明显变小。再用可变长码编码,就可得到较低的编码率。

前期遥感图象压缩研究主要集中于编码,目前编码已可接近图象的信息熵,而去相关技术仍有足够的研究的余地,现在集中研究好的去相关算法^[2]。应用最广的去相关技术是预测。目前和未来的遥感图象很多是多光谱的,可视为三维图象——两个空间维和一个光谱维。因为空间和光谱间都有相关性,所以有足够的理由应用三维预测来去相关。尽管有人认为^[3]多维预测带来的压缩效率并不明显,

但只要多维预测导致的计算复杂性提高是可接受的,就应采用。由于图象的相关主要发生在水平、垂直和对角线三个方向,去相关时可选用能最大去相关性的象素。预测树方案^[4]就是应用这个原理。这种方法特别适用于多光谱图象。因为同一区域的不同谱段尽管能量值不均匀,但图象结构基本一致,可以用同一预测树预测同一区域的不同谱段的图象。预测树构造如下:给定一个数字图象,用四邻域模型获取一差分图(Difference Graph),图中每两个顶点之间的边的权为原始图象这两个象素的差值,然后由这个图构造一个生成树(Spanning Tree),也就是图象的预测树。构造最小熵的生成树是一个 NP-hard 问题,可转化为求最小绝对权预测树(Minimum Absolute Weight Prediction Tree),在线性时间内求解。对于多光谱图象,可使用后向自适应技术:利用相邻谱段图象结构相似的特点,用本波段的预测树对下一谱段预测。这种方法去相关的效果很好。以七波段 Landsat 热成像仪和 224 波段的 AVIRIS 实验,结果均好于 JPEG 静止图象压缩标准。也可以用前向自适应技术,对每个波段的预测树,累计它们的权,在此基础上构造一个预测树,用它来预测每一个图象,在传输数据时先传预测树编码,再传差分图编码。

传统的无损压缩技术,如霍夫曼编码、Lempel-Ziv Welch^[5]压缩和算术编码等,已经在各种类型的星上压缩中应用。其中算术编码的效率略高于霍夫曼编码。为了提高性能,又陆续提出了动态霍夫曼编码^[6]、动态算术编码^[7]和 Rice 算法^[8]等。其中 Rice 算法在较广的范围内有很好的性能。并已经有 VL-SI 芯片问世。

Rice 算法是一个对较宽的熵条件都有效和可以迅速自适应的无损压缩算法^[9]。它由基本序列(Fundamental Sequence,简称 FS)和采样分割(sample split)两个部分组成。FS 是一个逗号码(comma code),数值 m 对应由 m 个 0 接一个 1 构成的码。由于码字唯一而不需要码本。采样分割中假设一块中的每个采样点的最低位是随机的。因为它们随机,所以不能被压缩。首先假设输入的 N 位数据都可被压缩,FS 码作用于输入的数据字并记录总的比特数。然后假设每个采样点的最低位是随机的,再用同样的 FS 码作用于剩余的 $N-1$ 位,也记录下总比特数。同样地,当 $k=[0,1,\dots,12]$,假设每个采样点的最低 k 位是随机的,再用同样的 FS 码作用于剩余的 $N-k$ 位,记录总的比特数。然后比

较 k 取不同值时总的比特数,选择比特数最少的选项对数据编码。目前 NASA 研制的基于 Rice 算法的芯片已有商用产品,1993 年推出的第二代产品 Universal Source Encoder for Space (USES) 是航天级芯片。其编码速度已达 20M 采样点/秒。解码速度是编码速度的一半。经分析比较,对于灰度按拉普拉斯分布的图象,Rice 算法性能优于霍夫曼编码和算术编码等,是星载仪器编码的发展方向。

3.2 星上有损数据压缩

未来星载多光谱传感器对数据传输的需求将远远超过信道容量,无损压缩已不足以解决问题,必须考虑有损方式。很多文献对此做了探讨。Baker 和 Tze^[10]讨论了用 DPCM、方块截尾编码、变换编码和各种矢量量化方案来压缩多光谱图象。其中以 mean residual 和 gain-shape VQ 效果最好。其压缩比为 20:1。Gupta 和 Gersho^[11]使用了非线性预测 VQ,用谱段间矢量预测和谱段内 VQ 进行压缩。对 TM 图象在保持良好视觉效果的情况下压缩效率达 0.34bpp。Saghri 和 Tescher^[12]介绍的方案首先对三维数据用 KLT 去谱段相关,然后再用自适应 DCT。也有人提出用 K-L 变换去谱段相关,用 WT 去空间相关^[13]。Matic 和 Mosley^[14]提出了 6 种谱段去相关方案。(1) 只去空间相关不做谱段去相关。Spatial-only 用于比较。(2) 用 KLT,作其它谱段去相关技术的比较参考(KLT)。(3) 用两个参考波段进行预测(PRED1)。(4) 波段-波段依次相减(PRED2)。方案(3),(4)都是运用预测技术去相关,只是方案(3)中的参考波段固定,而方案(4)中依次用前一波段的对应像素值与当前波段相应像素值相减。其结果是差分波段的熵较低,因而易于编码。(5) 一维 WT(WV1D)。(6) 三维 WT(WV3D),方案(5),(6)都使用 WT 作为去相关技术。方案(6)中先对各谱段响应像素构成的向量使用一维 WT,然后对去掉谱段相关的图象的每一波段分别进行二维 WT。在方案(6)中使用三维 WT 同时去除谱段和空间的冗余。除方案(2)外都可实时完成。以上所有方法都用 WT 去空间相关。实验结果表明 KLT 去谱段相关效果最好,一维谱段 WT 或相邻谱段预测去相关效果又好于其它几种方法。还有成功地使用自适应矩保持方块截尾方法进行图象压缩^[15]。

合成孔径雷达 SAR 的数据量很大,人们考虑了很多方法来减少星上 SAR 的原始数据量。Strodl 等^[16]比较了用分块自适应量化(BAQ),模糊分块自

适应量化(FBAQ),离散余弦变换分块自适应量化(DCT-BAQ),Walsh-Hadamard 变换分块自适应量化(WHT-BAQ)和分块自适应矢量量化(BAVQ)等方法压缩 SAR 的原始数据。结果表明,在压缩比为 2.5~3 的情况下,分块自适应矢量量化的信噪比最大。

3.3 地面遥感数据压缩

地面处理比在星上处理的限制少,可以采用较复杂的性能更好的压缩方案。硬件复杂度和功耗都可以高一些;一般不要求实时性,纯软件方案也可考虑^[17]。以对合成孔径雷达(SAR)图象和成像光谱仪多光谱图象压缩为主。

SAR 的分辨率高,数据量也非常大,有必要压缩。SAR 图象具有动态范围大的特征,因此它的信息熵大,对 SAR 数据压缩比对光学成像和计算机成像图象压缩要难。Gorman 和 Werness^[18]提出多分辨率 WT、基于人眼视觉系统模型的比特分配方法和混合标量/向量量化的算法。先用 WT 进行多分辨率分解,然后运用小波收缩技术将 WT 系数分成 3 个部分:局部平坦、边缘和纹理。再对这 3 个部分分别用不同的比特分配方案量化。局部平坦和边缘区的系数用标量量化,特征信息用向量量化。处理以后的数据率可达到或小于 1bpp。

成像光谱仪类的仪器数据量大且数据间的相关性强。去除数据间的相关,WT 性能优于 DCT 和 DPCM,Evans^[19]提出了 3 种方案:谱段独立 WT,三维 WT 压缩和谱段去相关 WT 压缩。其中谱段独立 WT 作为参考。三维 WT 是二维 WT 的可分离扩展,将数据分解为 7 个高通通道和一个低通通道。7 个高通通道包含有向边缘信息。每个通道的数据量为原始采样点数的八分之一。对低通通道递归地应用这个操作,产生网格状分解。再用一定的策略(如霍夫曼编码或 Lloyd-Max 量化器)对变换参数量化。对于谱段去相关 WT 压缩,首先将数据组织为 $D = \{d_{k,l}\}$ 的集合,谱向量 $d_{k,l}$ 由对应于空间分辨率元 (k,l) 的所有谱段的采样组成。对每个向量进行仿射变换 $T: d_{k,l} \rightarrow T(d_{k,l}) \equiv C_{k,l}$,其中 $C_{k,l}$ 的维数 $m < n$,将这个数据集进行类似于谱段独立小波压缩的二维 WT,由于变换 T 将能量集中到少数几个波段上,因而可以给这些谱段较高的比特率,其余的谱段分配较少的比特率。实验表明,三维小波压缩的效果不如谱段去相关小波压缩好。谱段去相关小波压缩的 PSNR 比三维小波压缩的 PSNR 高 4dB 左右。

从多家研究看出,对多光谱图象的压缩,用谱段去相关小波压缩是最有效的^[20]。但人们仍在探讨更有效的方法^[21,22]。由于分形压缩的高效性,目前对分形压缩的研究也很热。

4 对将来航天遥感数据压缩传输体制的建议

航天遥感获得的信息非常宝贵,星上压缩时应尽量避免或少丢失信息。由于星上环境的特殊性,应采用简单的易于硬件实现的、硬件功耗尽可能小的算法。另外,在受到干扰时,解码的信息损失应尽量限制在小范围。当遥感信息量不是特别大时,我们建议使用压缩效率较低的无损编码。由于 Rice 算法的优良性能,在此建议使用 Rice 算法作为星载无损压缩算法。在数据流量超过编码速率时,可采用多个编码器并行工作。压缩后再将多路数据转换成一路或两路发送到地面。关于去相关问题,对非多光谱数据建议使用一维预测编码,对多光谱数据建议使用预测树对相邻谱段去相关。当遥感信息量大到使用无损压缩不足以解决问题时,建议使用 WT 作为压缩的主体。对单谱段的数据使用 WT,然后对低通分量做 DCT,并对 DCT 系数进行算术编码或其它变长编码。量化时对高通分量采用不同的比特分配策略。可采用算术编码和 Rice 算法混合编码策略。对信息熵较大的分量用 Rice 算法,对信息熵较小的分量用算术编码。对多光谱数据先进行谱段去相关,可使用相邻谱段相减或一维 WT。然后再用二维 WT,再象单谱段的数据编码一样进行编码。这样计算量不太大,可硬件实现。分形图象编码作为一种极有潜力的编码方法,仍是人们研究的热点。目前人们需要解决的是如何实现实时编码和自动编码。

随着技术的发展和需求的增加,还会出现更好的方案。将来的发展方向将集中在开发更好的压缩算法、研究传感器系统对压缩算法设计与实现的影响以及研究新的压缩评价技术。

参考文献

- 1 吴乐南. 数据压缩的原理与应用. 电子工业出版社, 1995.
- 2 Sayood K. Data compression in remote sensing applications, In N93-20172.
- 3 Chen T M. Information content analysis of Landsat image data for compression, IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1987, GE-25:499-501.
- 4 Momen N D, Magliveras S S. Prediction trees and lossless image compressional extended abstract. Proceedings of the Data Compression Conference, IEEE Computer Society Press, 1991, 83~92.
- 5 Welch T A. A technique for high-performance data compression, IEEE Trans on Computer, 1984, 176:8~19.
- 6 Gallager R G. Variations on a theme by Huffman, IEEE Trans on Information Theory, 1978, IT-24(6):668~674.
- 7 Cover T M, Thomas J A. Elements of Information Theory. Wiley Series in Telecommunications. John. Wiley, Sons Inc. 1991.
- 8 Venbrux J, Gambles J. A VLSI chip set development for lossless data compression. Report of NASA Space Engineering Research Center under Grant NAGW-3292.
- 9 Yeh P, Miller W H. The development of lossless data compression technology for remote sensing applications, In IGARSS'94: 307~309.
- 10 Baker R L, Tze Y T. Compression of high spectral resolution imagery, Proceedings of SPIE, 1988, 1974:255~264.
- 11 Gupta S, Gersho A. Feature predictive vector quantization of multispectral images, IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30:491~501.
- 12 Saghri J A, Tescher A G. Near-lossless bandwidth compression for radiometric data. Optical Engineering, 1991, 30(6):934~939.
- 13 Epstein B R. Multispectral KLT-Wavelet data compression for Landsat thematic mapper images. Proceedings of Data Compression Conference (DCC'92), 1992, (4):200~208.
- 14 Matic R M, Mosley J I. A comparison of spectral decorrelation techniques and performance evaluation metrics for a Wavelet-based. multispectral data compression algorithm, In N94~28258.
- 15 Fouquet M, Sweeting M N. Remote sensing using the university of Surrey's microsattellites. Proc of Int Symp on Satellite Communication and Remote Sensing SCRS'95, 1995, (9):263~268.
- 16 Strodl K, Benz U. A comparison of several algorithms for on-board SAR raw data reduction, In IGARSS'94, 2197~2199.
- 17 Grunes M R. Image compression software for the SOHO LASCO and EIT experiments, In N94~28253.
- 18 Gorman J D, Werness S A. Preceptual compression of magnitude-detected Synthetic Aperture Radar imagery, In N94~28260.
- 19 Evans B. Wavelet compression techniques for hyperspectral data, In N94-28263.
- 20 Bradley J N, Brislawn C M. Applications of Wavelet-based compressional Earth science data, In N93~24547.
- 21 Shapiro J M. Compression of multispectral Landsat imagery using the embedded zerotree Wavelet (EZW) algorithm, In N94~28261.
- 22 Abousleman G P. Compression of hyperspectral imagery using the 3~D DCT and hybrid DPCM/DCT. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(1):26~33.

Skeletonization and Reconstruction via Mathematical Morphology

Zhou Nan, Cui Yi

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088)

Abstract This paper presents algorithms and applications of acquiring skeleton of binary image and completely or partially reconstructing binary image from its skeleton using mathematical morphology method.

Keywords Mathematical morphology, Skeleton, Reconstruction

(上接 700 页)



贾晓光,毕业于哈尔滨工业大学无线电系获学士和硕士学位,留学英国南安普敦大学电子学与计算机科学获博士学位;现在是哈尔滨工业大学航天学院教授她目前从事图象处理、基于图象特征信息的目标提取与识别、卫星及有效载荷的电子系统、以及卫星应用的研究和开发。

The Up-to-date Development of Data Compression Techniques in Space-based Remote Sensing

Jia Xiaoguang, Wang Lei

(Dept. of Astronautics, Electronics & Opto-Electronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Haerbin 150001)

Abstract The state-of-the-art of image compression techniques are summarized in the paper whilst the emphasis is specially on those for data from space-borne remote sensors. Suggestions of using various techniques in space-based remote sensing are proposed. The system configurations on space-based lossless and lossy compression and ground-based data compression are rendered.

Keywords Image compression, Fidelity, Lossy compression, Lossless compression, Classification, Remote sensing, Rice algorithm