

基于 Karhunen-leave 变换的多光谱 数据压缩统计特性分析*

阎敬文

(长春邮电学院通信工程系, 长春 130012)

孙 辉 张圣华

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 提出了基于 Karhunen-leave 变换(KLT)的多光谱图像数据压缩方法,并对多光谱图像数据 KLT 统计特征进行了分析。在对 KLT 进行了理论推导后,如何将该方法应用于实际多光谱数据压缩系统进行了分析讨论。研究提出了一种最大限度地减少额外码流开销的方法。实验结果表明:该方法对 16 光谱段的三维数据可获得 3.2~ 5.3 的压缩比,且几乎没有失真,明显优于用 DCT 去除谱相关性的方法。

关键词: KLT; 多光谱图像; 协方差矩阵; 本征矢量; 数据压缩

1 引 言

随着遥感技术的不断发展和完善,获得大量遥感数据的传感器不断涌现,并且向高分辨多光谱的先进功能发展。由此产生一个明显问题是如何从空间平台上传输这样大量的数据到地面。例如将来设计的先进系统,能产生 4.28 Gbps 的数据^[1]。如何利用有限卫星下链路传输这样大量数据,是遥感压缩系统设计专家必须考虑的问题。未来遥感卫星系统将很有可能受限于卫星链路的带宽,所以必须对遥感图像进行数据压缩。多光谱遥感图像一般有三种冗余性^[2]:(1) 谱段与谱段间的谱相关,即每个谱段同一空间位置像素很相似。(2) 空间相关性,

即每一幅图像的某一像素与其相邻像素是相关的。(3)统计相关性。指数数据码流间有一定相关性。陆地遥感卫星的遥感图像主要是静态地表特征,而且相互不重叠,所以遥感卫星图像的相关性主要为前两者。针对这两种相关性,遥感图像数据压缩专家们设计了多种压缩系统来消除这两种相关性^[3]。传统的方法是采用一维线性变换消除谱相关性,再利用二维变换消除空间相关性,或者用三维变换同时消除这两种相关性,如三维矢量量化,三维差分脉冲调制编码(3D DPCM)和三维子波变换(Wavelet Transformation)^[4]。由于三维变换,量化,编码的算法比较复杂,需要花大量计算时间,同时也大大增加额外码流开销,使得性能明显下降。所有这些限制影响压缩比的提高,也不利于实现实时压缩。本文结合近年来国外先进多光谱数据压缩技术,采用 KLT 作为一维线性变换来消除谱相关性,再用二维子波变换来消除空间相关性。在分析多光谱图像分布特点后,将 KLT 应用于消除多光谱图像谱相关性。对采用 KLT 进行压缩的统计特征进行了较为详细的理论分析,并将该方法在国内首先应用于多光谱图像数据压缩研究。该方法与国外采用 KLT 进行多光谱图像数据压缩系统的 KLT 相比有以下优点:将每一分块进行一次协方差矩阵计算,这样就可以获得最佳的压缩逼近,避免每一幅图像的所有块均采用固定协方差矩阵计算而引入较大的误差。另外传输的参数不同,即不传输协方差矩阵及其对应的本征值或本征矢量,而改传各分块对应协方差矩阵的前几个较大的本征值所对应的本征矢量。这就大大降低了传输的额外开销,提高传输效率,使协方差矩阵完全自适应于所分块的数据,充分利用了数据的统计特征,可以达到准无损压缩,这是本文新方法的特点。实验结果表明,KLT 对多光谱图像进行消除谱相关性是最优的方法,谱段数越多,压缩比就越高,几乎没有方块效应,并且不影响后续用 W T 消除空间冗余性。

2 KLT 的理论

将连续信号变换为一组不相关表征系数的方法最早是由 Karhunen 和 Loeve 提出的。后来很多文献所涉及离散和连续的变换都称作 KLT 或本征向量变换。KLT 定义为:

$$F(u, v) = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} f(j, k) a(j, k; u, v) \quad (1)$$

式中核 $a(j, k; u, v)$ 满足下式:

$$\lambda(u, v) a(j, k; u, v) = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} k_f(j, k; j, k) a(j, k; u, v) \quad (2)$$

式中 $k_f(j, k; j, k)$ 是图像阵列的协方差矩阵。当 (u, v) 一定时, $\lambda(u, v)$ 为一固定值。

研究图像变换样值的有效量化和编码方法,需要了解变换域的统计特性,即了解图像变换样值的一阶矩和二阶矩。遥感图像是一个二阶矩过程,且均值不为零。假设图像阵列 $f(j, k)$ 是二维随机过程的样本值,若其均值和方差都存在,其 KLT 可由(1)式给出。

KLT 是所有正交变换中具有最优能量压缩。对任何正交变换系数的方差按大小排列成 $\sigma^2(1) > \sigma^2(2) > \sigma^2(3) > \dots > \sigma^2(N^2)$, 并且协方差矩阵函数的本征值同样按大小排列成 $\lambda(1) > \lambda(2) > \lambda(3) > \dots > \lambda(N^2)$, 则可证明当 $w < N^2$ 时, 满足 $\sum_{n=0}^w \lambda(n) > \sum_{n=0}^w \sigma^2(n)$ 。

3 KL T 的统计特征分析

多光谱遥感图像各谱段间对应像素点是二阶矩过程。由二阶矩过程定义知道, 像素点随机过程的均值和方差都存在, 因此多光谱遥感图像各谱段间对应像素点具有一阶矩和二阶矩的统计特征。令该随机过程为 $\{\xi_k(\lambda), \lambda, \lambda\}$ 是图像上某一点图像信号数据值, 其均值和方差都存在。假设 $\xi_k(\lambda)$ 的均值 $E\{\xi_k(\lambda)\} = \mu_{\xi_k}(\lambda)$ 为一确定值。如果用 (m, n) 空间坐标表示该随机过程, 那么 $\xi_k(\lambda)$ 可以写成 $\xi(\lambda, x, y)$ 。令 $\Psi(\lambda, x, y) = \xi(\lambda, x, y) - \mu_{\xi_k}(\lambda)$, 那么 we 可得到另一随机过程 $\Psi(\lambda, x, y)$, 而且 $E\{\Psi(\lambda, x, y)\} = 0$, $\Psi(\lambda, x, y)$ 的均方差也存在, 故 $\Psi(\lambda, x, y)$ 是一个零均值二阶矩过程。因为 $\Psi(\lambda, x, y)$ 是一个零均值二阶矩过程, 所以 $\Psi(\lambda, x, y)$ 的协方差函数和自相关函数是相同的。若 ξ 是 n 维正态分布 $N(\mu, B)$, 则存在一个正交变换 U , 使得 $\varphi = U\xi$ 是一个具有独立正态分布的随机矢量, 它的数学期望为 $U\eta$, 而它的方差分量是矩阵 B 的特征值^[5]。由线性代数知道, 对 B 进行对角化 $UBU^T = D$, 其中 U^T 为 U 的转置, $D = \text{diag}(d_1, d_2, d_3, \dots, d_n)$ 。这里 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ 是 B 的特征值。若矩阵 B 的秩为 r , 则有 r 个特征值不为零。 U 可以认为是 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ 所对应的特征矢量而组成的矩阵。若 $r < n$, 则正态分布退化到一个 r 维子空间上, 此时正态分布称为奇异分布或边缘分布。KL T 正是基于上述统计和变换而产生的, 它的最大优点是能最大限度地消除数据的相关性。但缺点是计算相当费时。假设:

条件 1: 假设一幅图像的尺寸为 $M \times N$, 而图像信号本身 $f(m, n)$ 是一个 $M \times N$ 维平稳随机信号, 而且具有二阶矩特征。

条件 2: 假设多光谱图像 Q 谱段组成集合为 $\{f_1(m, n), f_2(m, n), f_3(m, n), \dots, f_Q(m, n)\}$ 。将每一幅图像 $f_i(m, n)$ 组成可表示成一个行(或列)顺序的列向量 $f_i(j)$, 其中 $j = mN + n + 1, 0 \leq n \leq N - 1$ 。

由条件 1 可得 Q 个谱段图像样本集, 可估计出随机过程的协方差矩阵如下:

$$[C_f] = E\{(f_i - \mu_i)(f_i - \mu_i)^T\} \quad (3)$$

μ_i 表示信号均值矢量, 它可由下式求出:

$$\mu_f = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q f_i(j) \quad (4)$$

这样可以求出 $(MN) \times (MN)$ 协方差矩阵为:

$$[C_f] = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q (f_i - \mu_f)(f_i - \mu_f)^T = \frac{1}{Q} [\sum_{i=1}^Q f_i f_i^T] - \mu_f \mu_f^T \quad (5)$$

求得协方差矩阵后, 可求出 (MN) 个本征值, 并对本征值按大小进行排序 $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_{MN}$, 再求出本征值 λ_i 对应的归一化矢量 e_i , 构成正交线性变换矩阵:

$$[A] = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & \dots & e_{1MN} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & \dots & e_{2MN} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{MN1} & e_{MN2} & \dots & \dots & e_{MNMN} \end{bmatrix} \quad (6)$$

于是 KL T 为^[5]:

$$g = [A](f - \mu_f) \tag{7}$$

这里 f 对应 ξ , g 对应 Ψ 。由零均值二阶矩统计特征分析可知, g 协方差矩阵具有以下性质:

(1)

$$[C_g] = [A][C_f][A]^T \tag{8}$$

$[C_g]$ 是一对角矩阵 $C_{ii} = \lambda_i, C_{ij} = 0, i \neq j$ 。

(2) KL T 另一重要性质是它的元素是不相关的, g 的第 i 个元素的方差 σ_i^2 等于本征值 λ_i 。因此总可以找到一组本征向量来求得反变换。这样通过将 g 的维数减小到 P , 使 $M \times N$ 维向量等于前 P 个元素所构成的向量, 从而使得得到最小均方差意义上的最佳近似。若限定 P 个本征向量对应前 k 个最大的本征值足够大时, 舍掉的 $(P - k)$ 个较小的本征值, 可使能量获得最佳压缩。因此, KL T 在消除多光谱图像谱相关性方面发挥重要作用, 而且谱段数 Q 越多压缩比越高。

逆 KL T, 即由本征子图像重建原图像公式可由 (9) 求出:

$$f = [A]^T g + \mu_f \tag{9}$$

其中 $[A]^T$ 是 $[A]$ 的转置矩阵。

4 KL T 方法在消除谱相关性的应用

多光谱遥感图像各谱段对应像素具有很大的相关性。消除这种相关性的传统方法是采用一维线性变换, 从消除多光谱图像谱相关性均方差最小的意义上讲 KL T 是最佳变换。过去因技术上的因素, 限制这种方法的应用。随着高速 VLSI 器件的发展, 采用较小分块的 KL T 应用于实时数据压缩系统已成为可能。该方法能有效地控制舍入误差, 对失真进行人为的调整, 取得其它变换无法获得的效果。

按照 3 中介绍的方法, 我们将每个小块分成一 16 维的随机变量 $f_i(j), j = 1, 2, \dots, 16$ 。计算 $f_i(j)$ 的均值 μ_f 和协方差矩阵 $[C_f]_{16 \times 16}$, 再由此协方差矩阵求出的 16 个本征值, 并将它们按大小进行排序 $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_{16}$ 。前 4 个子块的本征值分布规律如图 1 所示。由图 1 可见, 本征值分布规律呈明显下降趋势, 当取 $k = 2$ 时, 即取 λ_1 和 λ_2 对应的本征矢量对图像进行分解, 可以保留 95% 以上的能量, 舍去的均方差总和小于 1%。此时压缩比 CR 可由下式求得:

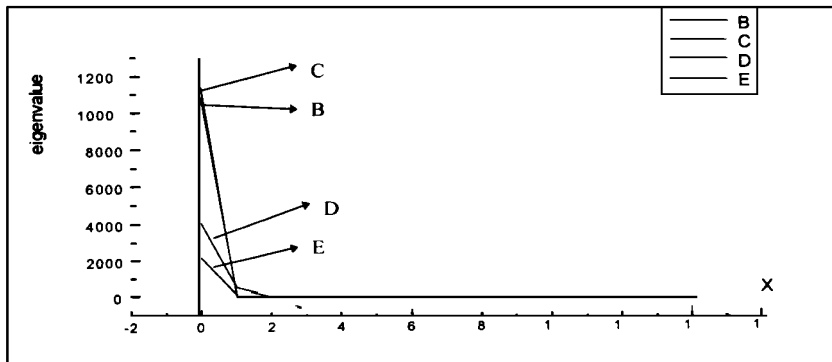


Fig 1 The sixteen eigen value distributions of multispectral image K- L transformation of size 4 × 4 sub-block in the sixteen bands

$$CR = \frac{Q \times n \times n}{n \times n + k \times n \times n + Q \times k} \quad (10)$$

$n \times n$ 表示所分的子块大小, k 是保留的本征值的个数, Q 为谱段数。子块是 4×4 , k 取 2 时, 获得的压缩比为 3.2。当取 $k=1$ 时, 获得的压缩比为 5.3。由公式(10)可知, 当谱段数 Q 增大时, CR 也随之提高, $n \times n$ 的大小应小于 Q , 否则不利于 CR 的提高。经 $KL T$ 变换后分解的前 3 个子图像如图 2 所示。因为是完全的自适应计算每一子块的 $KL T$, 取前两个本征子图像进行重建, 获得的压缩几乎无失真, 并且没有方块效应。

(a) (b) (c) (d)

Fig. 2 The multispectral image $KL T$.

(a) The first band original image of sixteen bands (b) The first eigen subimage of the first band of sixteen bands (c) The second eigen subimage of the first band of sixteen bands (d) The third eigen subimage of the first band of sixteen bands

减少传输码流的方法如下: 选用我国自行研制的 16 谱段的成像光谱仪在澳大利亚达尔文地区飞行获得的谱像数据, 作为 $KL T$ 的样本数据进行仿真。将 16 谱段多光谱图像分成 $16 \times 4 \times 4$ 子块, 若每个像素的变化范围为 8bits, 则每一子块集合数据量为 $4 \times 4 \times 16 \times 8 = 2 \text{ kbits}$, 每一子块的协方差矩阵每个元素字长为 8bits, 则每一子块集合的协方差矩阵的数据量为 $16 \times 16 \times 8 = 2 \text{ kbits}$, 而 16 个谱段子块总的的数据量为 $4 \times 4 \times 16 \times 8 = 2 \text{ kbits}$ 。可见, 若传输均值和子块的协方差矩阵, 没有数据压缩。本文减少传输矢量码流的方法: 首先确定所取的前面分量个数 k , 然后进行 $KL T$ 变换。由图 1 说明 k 取 2 是比较合适的。其次将最大的两个本征值和本征矢量及 $KL T$ 的两个分量由浮点 32 位量化为 8 位。最后将分解的图像由 512×512 压缩成 128×256 , 使数据量大为减少。均值图像仍为 512×512 。经上述步骤处理后, 传输数据量大为减少, 可获得(10)式的压缩比。同时使 $KL T$ 后的图像数据量减少 8 倍, 大大节省存贮量, 同时也为后续消除空间相关性的二维线变换大大减少了计算量。

5 实验结果和讨论

本实验选用我国自行研制的 16 谱段的成像光谱仪在澳大利亚达尔文地区飞行获得谱像数据, 作为 $KL T$ 的样本数据进行仿真。为了便于计算, 把 512×512 大小的图像分成 128×128 个 4×4 大小的子块, 对每一子块进行 $KL T$ 变换。因为采用每个子块进行协方差计算, 误差较小。用两个本征子图像重建原图像, 方差小于 2%, 取得其他变换方法无法获得的效果。由协方

差矩阵计算出的 16 个本征值分布相差较大, 取 $k = 2$ 就可获得 95% 以上的能量。该方法主要优点是通过对控制 k 来调整误差, 使得舍入误差控制在要求范围内。作为一个例子, 任选择四个子块的协方差矩阵计算出的 16 个本征值分布规律如图 1 所示, 当 $i > 2$ 时, $\lambda_i \ll \lambda_0$ 。

图 2 给出了 16 谱段的第一个谱段的原图像, 前三个本征值对应的子图像。由图 2 知, 第三个本征值对应的子图像所含的信息量接近于零, 用前二个本征值对应的子图像重建的原图像会引入较大的误差。KLT + JPEG 进行三维谱象数据压缩方法研究是下一步将进行的工作。

参 考 文 献

- [1] Vaughan VAL P, Wilkinson Timothy S. System Consideration for Multispectral Image Compression Designs IEEE Signal Processing Magazine, 1995, 5(1): 19~ 31
- [2] Hilton Michael L, Bjorn D. J, Sergupta A. Compression Still and Moving Images with Wavelets Multimedia System, 1994, 2(3): 1~ 19
- [3] Saghri John A, TEScher Andrew, Reagon John T. Practical Transform Coding of Multispectral Imagery. IEEE Signal Processing Magazine, 1995, 5(1): 32~ 43
- [4] Brower B, Gandni B, Couwenhoven D, Smith C. ADPCM for Advanced Landsat Downlink Applications Proc of twenty seventh Asiluar Conf on signals system & computers 1993
- [5] 陆大绘. 随机过程和应用 北京: 清华大学出版社 1987, 473~ 474

The Characteristic Properties Analysis for Multispectral Data Compression Based on Karhunen- Leove Transformation

Yan Jinwen

(Dept of Communication engineering,

Changchun Institute of Posts & Telecommunication, Changchun 130012)

Sun Hui, Zhang Shenghua

(Changchun Institute of Optics & Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

In this paper a compression method for multispectral image data based on Karhunen- Leove Transformation (KLT) was presented, and the statistical properties of multispectral image using KLT was analyzed. After deducing the theory of KLT, we discussed the schemes of applying this method to the practical compression system of multispectral image data. A maximum degree decreasing bit flow method is researched and presented. Experiment results show that this method can obtain the compression ratio 3.2~ 5.3 for sixteen band multispectral, almost lossless. It is superior to the method of applying DCT to remove the spectral correlation.

Keywords: KLT, Multispectral image, Covariance matrix, Eigen vectors, Data compression

阎敬文, 男 1964 年生于吉林, 1987 年毕业于吉林工业大学电子工程系获工学学士学位。1992 年毕业于中国科学院长春地理所, 获地图学与遥感理学硕士学位。现在长春邮电学院任教, 于 1994 年在中国科学院长春光机所应用光学国家重点实验室攻读在职博士学位。主要研究领域: 数字信号处理, 子波变换理论和应用, 数据压缩, 已发表论文数篇。