

文章编号: 1007-4619 (2001) 01-0017-05

遥感多维空间数据场特征的角度分析与应用

马建文, 刘素红, 马超飞

(中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101)

摘 要: 科学计算的可视化是空间数据场的可视化。标题、矢量、张量是线性电磁系统中定义多维数据场的基本参数。从瞬变电磁系统的因果律出发, 可以将遥感传感器对电磁波的响应看作是地表电磁场量的映射, 像元是记录电磁场量的一种方式。由于电磁场量的线性关联, 多波段遥感数字图像可以表示为多维空间数据场量。在多维向量空间中可以对数据场量进行度量、分解和构造向量角度函数。遥感多维空间数据场有效弱信息提取方法则是基于多维空间数据场角度分析展开的。

关键词: 瞬变电磁系统; 数据场; 向量空间; 角度分析

中图分类号: TP701/TP79 **文献标识码:** A

1 引 言

在诸多数字化图像处理中, 卫星遥感数据有效弱信息的提取问题是一个既有广大需求又没有得到解决的难题^[1]。遥感数据的两个空间维和一个光谱维构成的描述地表能量变化的三维数字阵列场, 实验室地物光谱分析证明: 自然界中没有两种地物具有完全相同的光谱曲线。根据这一实验结果有人提出了地球表面物质存在“DNA”的设想, 但是用遥感数据反演地物时所遇到的问题并没有那样简单。主要因为传感器响应到的能量信号与地球表面反射、辐射能量不相等, 在传输过程中被干扰弱化影响了探测度^[2]; 地球表面不同地物反射、辐射强度不同, 相对较弱的信息有时是解释宏观规律的指示信息, 重要的信息, 但在反射、辐射背景场中被强信息抑制。同理, 当相对较弱的电磁能量构成一定的面积场强分布时可以形成面状光谱, 电磁瞬变系统中的这种现象被称之为临地效应或单元效应^[3,4]。鉴于上述认识, 遥感界从不同的方面探索表达地表能量场与遥感多维空间数据场之间的关联模式, 如植被指数 (NDVI) 和植被、水综合指数 (NDWI)^[5,6], 二向性反射模型 (BRDF)^[7], 反射率、反照度综合模型 (TOA)^[3]等的研究, 并且开发了相应的软件。

近年来, 作者结合遥感找矿项目中遇到的问题,

采取系统测试地物光谱和遥感数据场量趋势面分析方法, 建立电磁场量与图像能量的线性关联, 构造多维向量空间角度关系模型, 根据模型选取算法。在分离多波段遥感数据中较弱的有效信息方面, 取得了一定的效果。本文侧重点介绍空间角度的正交投影变换及其3维空间云图分析方法。

2 构造遥感数据向量的角度关系模型

2.1 柯西-许瓦兹不等式 (C-S)

利用空间向量构造角度模型和解释模型时需要引入柯西-许瓦兹不等式^[8-11]。首先定义向量的长度, 设 x 是内积空间 V 的任一向量, 则非负实数称为向量 x 的长度, 并记为 $|x|$, 即定义向量 x 的长度为

$$|x| = \sqrt{(x, x)} \quad (1)$$

由于向量的内积 (x, y) 在内积空间中是个实数, 因此利用长度概念, 柯西-许瓦兹 (C-S) 不等式又可以表示为

$$|(x, y)| \leq |x| \cdot |y| \quad (2)$$

当 x, y 都不为零向量时, 由此不等式可得

$$\frac{|(x, y)|}{|x| \cdot |y|} \leq 1 \quad (3)$$

即:

$$1 \geq \frac{|(x, y)|}{|x| \cdot |y|} \geq -1 \quad (4)$$

收稿日期: 1999-07-16; 修订日期: 2000-01-05

基金项目: 中国科学院“九五”重大项目 (KZ951-A1-302)、中国科学院“九五”重大和特别支持项目 (K295T-03-04-05)。

作者简介: 马建文 (1953—), 男, 研究员, 博士生导师; 1998 年于成都理工学院获博士学位。出版专著 1 本, 论文 30 余篇。

因此,可以用等式

$$\cos \theta = \frac{(x,y)}{\sqrt{x^2+y^2}}$$

(5)

来定义两个非零向量 x, y 的夹角 θ , 且限制 θ 的取值范围为 $[0, \pi]$ 。当 $(x, y) = 0$ 时, 则称 x, y 是正交的, 且记为 $x \perp y$ 。

2.2 任意数据的正交投影变换

设 M 是一标准正交系。给定 n 个数据 x_1, x_2, \dots, x_n , 希望找出 n 个常数 a_1, a_2, \dots, a_n , 使得线性组合

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^n a_i e_i$$

(6)

拟合未知的随机变量 x 时, 拟合 (或估计) 误差

$$e = x - \hat{x} = x - \sum_{i=1}^n a_i e_i$$

(7)

均方值

$$p = E \left\{ \left| x - \sum_{i=1}^n a_i e_i \right|^2 \right\}$$

(8)

为最小, 确保 \hat{x} 在 L_2 空间上的投影 \hat{x} 正交 (图 1)。在实际应用中原始数据一般不是正交数据, 因此我们需要先将原始数据归一化转换成标准正交数据。Gram-Schmidt 正交变换提供了对任意原始数据进行标准正交化途径^[9] (图 1)。

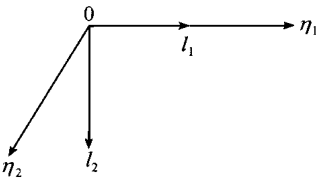


图 1 任意数据构造 Gram-Schmidt 正交关系的三维坐标空间位置

Fig. 1 To formulate Gram-Schmidt orthogonal relations in 3D coordinate for any data sets

如果 x_1, x_2, \dots, x_n 是任意数据, 根据 Gram-Schmidt 正交构造法, 可以用

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= e_1 \\ x_2 &= e_1^{(2)} + e_2^{(2)} \\ &\vdots \\ x_k &= \sum_{i=1}^k e_i^{(k)}, \quad k = 2, 3, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

构造 n 个标准正交随机变量, 归结为确定式 (9) 中的系数 $e_i^{(k)}$, $i = 1, 2, \dots, k$; $k = 2, 3, \dots, n$ 。令: $R_{ij} = E \{ x_i x_j \}$, 由标准正交化条件 $E \{ e_i^2 \} = 1$ 可以求出 $e_i^{(k)}$, 在构造 e_k 时利用了条

件 $e_k \perp e_j (j < k)$ 得到 $k - 1$ 个方程:

$$E \{ x_k e_j \} = e_1^{(k)} R_{1j} + e_2^{(k)} R_{2j} + \dots + e_k^{(k)} R_{kj} = 0$$

$$j = 1, 2, \dots, k - 1$$

(10)

从标准化条件又可以得到第 k 个方程:

$$E \{ x_k^2 \} = e_1^{(k)} R_{1k} + e_2^{(k)} R_{2k} + \dots + e_k^{(k)} R_{kk} = 1$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

(11)

因此, k 个系数 $e_1^{(k)}, e_2^{(k)}, \dots, e_k^{(k)}$ 由方程 (10), (11) 的解确定。在实际运算中采用三角矩阵方法

$$L = \begin{bmatrix} e_1^{(1)} & e_1^{(2)} & \dots & e_1^{(n)} \\ e_2^{(1)} & e_2^{(2)} & \dots & e_2^{(n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_n^{(1)} & e_n^{(2)} & \dots & e_n^{(n)} \end{bmatrix}$$

(12)

$$L^{-1} = \begin{bmatrix} l_1^{(1)} & l_1^{(2)} & \dots & l_1^{(n)} \\ l_2^{(1)} & l_2^{(2)} & \dots & l_2^{(n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_n^{(1)} & l_n^{(2)} & \dots & l_n^{(n)} \end{bmatrix}$$

(13)

有了矩阵 (12), (13) 后, 式 (9) 可以简写为

$$x = Lh$$

(14)

式中 $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, $h = [h_1, h_2, \dots, h_n]^T$, 经过转换后, 原始数据向量 h 可以表示为

$$h = L^{-1}x = L^T x$$

(15)

式 (14) 中的 L 相当一个白化滤波器, 任意原始数据通过该滤波器后即可转换成为标准正交的数据 e_1, e_2, \dots, e_n 。由式 (9) 可知 e_1, e_2, \dots, e_n 具有与 x_1, x_2, \dots, x_n 相同的信息 (子空间), 因为前者是后者线性变换的结果。因此经标准正交的 e_1, e_2, \dots, e_n 也称作原始数据 x_1, x_2, \dots, x_n 的新息。式 (15) 则表明, 矩阵 L 相当于一个新息滤波器, 用新息 e_1, e_2, \dots, e_n 作新息滤波器的输入, 滤波器的输出既是原始数据。

利用白化滤波器的上述性质, 经过均方差最小判断, 便可以对多波段遥感数据进行正交分解。通过均方差最大过滤筛过滤多维离散数据, 实现数据云图的叠加。

3 典型应用

“九五”国家 305 科技攻关航天遥感的任务之一是利用卫星 TM 数据对东西昆仑山脉关键成矿带的 1:5 万的岩性填图, 分析成矿地质条件。由于该地区没有系统地开展过基础地质工作, 相同或大于该比例尺的参考资料甚少。该地区高山缺氧、地质构造、岩性条件复杂, 风化强烈, 并且有一定面积风成

黄土,高山沙土覆盖,更增加了野外地质工作的难度。为了完成与成矿有关岩性和矿化信息填图,本课题采用正交投影的新息过程填制“东昆仑卡特里西”含铜岩性带,图版 I 图 2、图版 I 图 3 中的 A—B 表示野外工作剖面位置,图像像元行列数为 980×580 ,接收时间为 1999 年 6 月。与正交分解投影方法不同的是该方法首先采用非监督分类提取含铜地层图像的灰度数据并以此数据构造新轴,然后对各波段作正交变换,变换过程将均方差最小分解后将与新轴相似的新息投影聚集到新轴,实现对含铜岩性带目标信息的有效提取,图版 I 图 3 中部的紫红色条带。

TM 数据处理前后的三维云图和云图旋转说明利用均方差最小过滤的新息投影效果。3D 云图表达了目标像元向量在三维坐标空间的位置和角度空间投影方法对矿化岩性信息的有效聚类(图 4)。图

中符号 KTR、KTG、KIB 为原始图像红、绿、蓝 3 个波段;符号 KTPR、KTPG、KTPB 为投影图像红、绿、蓝 3 个波段(其中(a),(b) KTR-Z 轴,KTG-Y 轴,KIB-X 轴 3D 散点云图,箭头指示处的聚类有所变化;(c),(d) 以 3D 云图的重心作 3 轴正交旋转观察云图变化,在 3 轴这一位置云图变化不大;(e),(f) 在展示 KTR 与 KIB 象限时的云图,投影图像的散点在 KTPR 和 KTPB 象限产生新的聚集,新聚集像元在 B(蓝)、G(绿)轴呈现紫红色,见图版 I 图 2;(g),(h) 3D 正交轴的侧面云图,投影后的 3D 侧面云图的首部变宽)。

野外验证工作路线剖面位于东昆仑褶皱带东段,新疆且末县阿羌乡卡特里西铜矿处。矿区海拔高达 4040m,自卡特里西村到矿区,沿卡特里西萨依对中生炭统地层进行了剖面观察(图 5)。自北向南主要岩石地层单元如下:

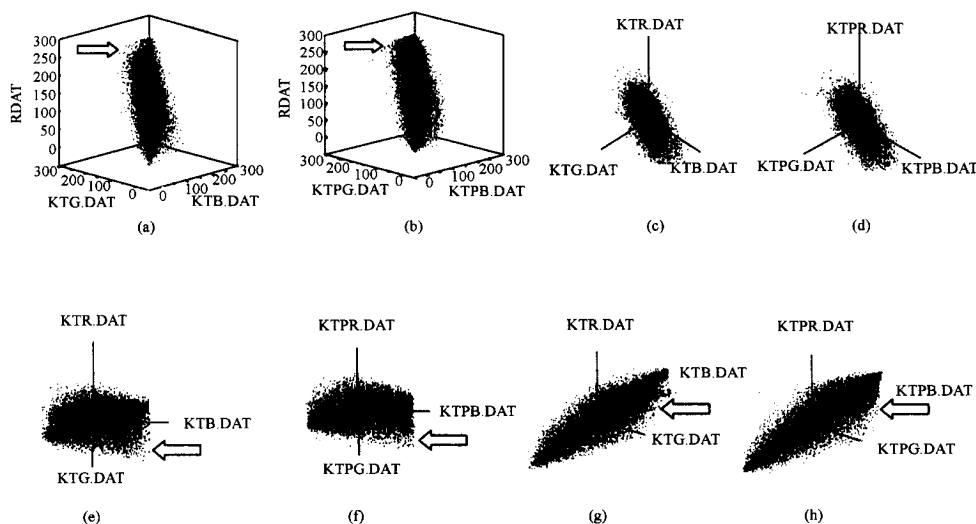


图 4 TM 数据处理前后遥感数据不同角度 3D 云图

Fig. 4 3D cloud map of TM data before processing and after processing

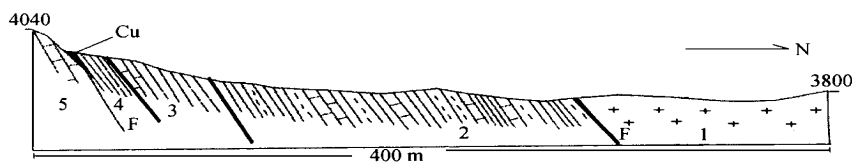


图 5 1998 年 8 月野外观测时绘制的路线剖面图(根据燕守勋野外素描图改编)

Fig. 5 Field observation sketch map in Aug. 1998

- 1 海面期托库孜达坂花岗岩体
——断层；
- 2 厚层浅变质细碎屑岩(黑板岩、千枚岩夹灰岩)；
- 3 中石岩统青灰色灰岩夹变质千枚岩薄层；
- 4 厚达 50—80m 浅变质细碎屑岩,灰绿色,可解为层凝灰岩
——断裂矿化带(产状 $350^{\circ} 69^{\circ}$, Cu 品位 3%—5%)；
- 5 山梁上土黄褐色风化的厚层碳酸盐岩。

地层总体为碳酸岩与细碎屑岩互层,近东西向展布。细碎屑岩类为暗色调浑圆山丘,碳酸岩为土黄褐色高陡大山。

铜矿体产在沿第 5 层碳酸岩与第 4 层凝灰岩接触带,发育的断裂带中偏灰岩一侧,矿体下盘围岩为硅质条带灰岩。层凝灰岩中少量矿化。含矿断裂呈冲沟地貌,产状为 $350^{\circ} 69^{\circ}$ 。其南北两侧岩石色调差异明显。矿石矿物主要为黄铜矿、孔雀石、自然铜等。岩脉以石英、自然硫为主。

4 结 论

本文从地物电磁系统和不同遥感波段对电磁系统场量响应的关联与差异观察、分析入手,试图利用多维空间遥感数据场向量云图的角度变化来分离和解释目标信息识别和提取的可视化过程。这样我们就可以将有关场量的运算方法正确地引入遥感图像处理中。正交投影方法利用了遥感数据场中记录能量变化 DN 值的离散属性,一幅图像的 DN 值在空间数据场中表现为向量,多波段 DN 值在数据场中表现为维向堆积。经过均方差最小判断实现了遥感多波段数据相似性叠加。同理,还可以经过均方差最大判断、实现相似性分解和通过新息滤波器实现不同数据间的融合。目前遥感数据的正交分解实验已经取得了较好的示范应用,数据融合还在实验过程中。

参考文献 (References)

- [1] Chen Shupeng, Tong Qingxi, Guo Huadong. Preface of Study of Remote Information Mechanism [M]. Beijing: Science Press, 1998. [陈述彭,童庆禧,郭华东. 遥感信息机理研究[M]. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [2] Wu Xinghui *et al.* Sensor and Signal Processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998. [吴兴惠等. 传感器与信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.]
- [3] Christopher O. Justice. The Moderate Resolution Imaging Spectral radio-meter (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research [J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1998, **36**(4): 1228—1249.
- [4] Ma Jianwen *et al.* Weak Information Extraction from Milt-band Remote Sensing Data Based on Remote Sensing Information Field Theory [A]. Institute of Remote Sensing Application, CAS. The Proceedings of Remote Sensing Knowledge Innovation [C]. Beijing: China Science and Technology Press, 1999. [马建文等. 基于遥感信息场的多波段遥感弱信息的分离[A]. 中国科学院遥感应用研究所. 遥感知识创新文集[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999.]
- [5] Tian Qingjiu. Advances in Study on Vegetation Indices [J]. *Advance in Earth Science*, 1998, **13**(4): 327—333. [田庆久. 植被指数研究进展[J]. 地球科学进展, 1998, **13**(4): 327—333.]
- [6] Li Shuqing. Electromagnetic Scattering from Two Adjacent Cylinders [J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1998, **36**(6): 1981—1985.
- [7] Li X., Strahler A. Geometric-Optical Bidirectional Reflectance Modeling of a Coniferous Forest Canopy [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, **24**(5): 281—293.
- [8] Luo Jiahong. The Analysis Theory of Matrix [M]. Guangzhou: Publishing House of Huanan University of Technology, 1992. [罗家洪. 矩阵分析引论[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1992.]
- [9] Zhang Xianda. Linear Algebra in Signal Processing [M]. Beijing: Science Press, 1997. [张贤达. 信号处理中的线性代数[M]. 北京: 科学出版社, 1997.]
- [10] Tang Zhesheng. The New Development of Visualization and Virtual Reality Technology [N]. *Computer World*, 1999-07-05 [唐泽圣. 可视化及虚拟现实技术的新发展[N]. 计算机世界, 1999-07-05.]
- [11] Zheng Qingzhang. The Theory of Relativity and Time-Space [M]. Taiyuan: Science Technology Press of Shanxi, 1998. [郑庆璋. 相对论与时空[M]. 太原: 山西科学技术出版社, 1998.]

The Analysis of Vector Angles in Remotely Sensed Data Field and It 's Application

MA Jian-wen , LIU Su-hong , MA Chao-fei

(*Institute of Remote Sensing Applications , CAS , Beijing , 100101 , China*)

Abstract : The visualization of scientific computation is spatial data field visualization. Scalar , vector and tensor quantity are principal parameters to define multi-dimensional data field in linear electromagnetic system. Based on cause and effect rule of instantaneous change electromagnetic system. The response of remote sensing sensor to the electromagnetic field can be regarded as the reflectance of ground electromagnetic field. The pixel is the digital media to record the reflectance. Because the linear connection between ground electromagnetic field and multi-band DNS , the digital image can be expressed as multi-dimensional spatial data field. In multi-dimensional linear vector space , values of data field can be calculated , differentiated , analyzed and the angle function also can be formulated in the space. The mapping of useful weak feature in remote sensing data field is also carried out based on angle analysis.

Key words : instantaneous change electromagnetic system ; remote sensing data field ; linear vector space ; angle analysis

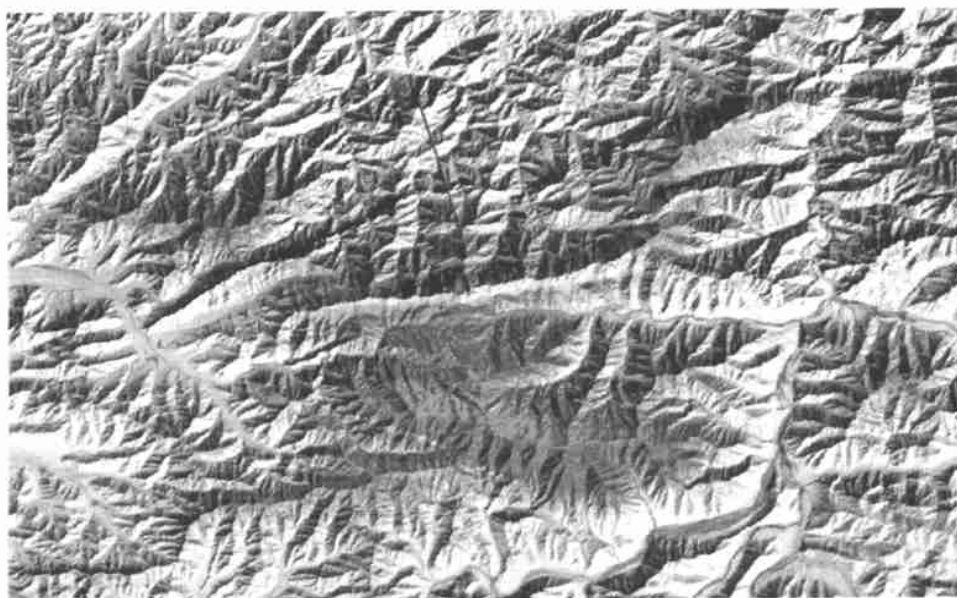


图 2 TM1, 4, 7 波段合成图像

A——B 野外工作剖面，蓝色为冰雪覆盖



图 3 由 2, 3, 1 三个投影轴合成的彩色投影图像

图中紫红色为含铜碳酸岩