

基于连续统快速傅里叶变换的红外光谱处理技术

刘庆杰^{1,2}, 蔺启忠², 王钦军², 李 慧^{1,2}, 李 帅^{1,2}

1. 中国科学院遥感应用研究所, 非再生资源与环境遥感研究室, 北京 100101

2. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 数字陆地研究室, 北京 100080

摘 要 为实现红外光谱对遥感地物准确的识别, 消除高频噪声是光谱特征分析和提取的重要环节。利用光谱连续统处理方法, 结合信号时域分析领域快速傅里叶变换提出了一种新的红外光谱滤波方法。该方法首先对红外光谱进行光谱连续统去除, 利用快速傅里叶变换将去连续统后光谱转换到频域, 设计低通滤波器滤除高频噪声, 然后通过快速傅里叶反变换将频域信号转换到时域, 最后对信号进行光谱连续统恢复, 得到滤除噪声后的红外光谱信号。对比实验表明, 连续统快速傅里叶滤波方法比常规的时域滤波方法有更好、更快的滤波效果, 解决了传统快速傅里叶红外光谱滤波的吉布斯现象。该方法操作简便、运行速度快捷、滤波效果好, 满足了红外光谱地物识别对光谱高质量的要求。

关键词 连续统去除; 快速傅里叶变换; 红外光谱; 噪声滤波; 吉布斯

中图分类号: TP722.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)12-3279-04

引 言

利用高光谱数据进行矿物的识别, 是高光谱遥感地面定标与快速野外验证的重要环节。而地面获得的红外光谱大都含有噪声。采集高质量的地面光谱以及对光谱噪声的滤波至关重要。红外光谱预处理主要是滤除其中的零均值随机高频白噪声。滤波方法分为时域和频域两类。时域有邻近点比较法、加权移动平均法、指数平均法^[1]、五点三次平滑法^[2]、S-G滤波^[3,4]等。频域主要有傅里叶滤波^[5,6]、小波滤波^[7-10]等。时域滤波设计比较简单, 但滤波器的选择对滤波效果影响明显。利用傅里叶滤波可以在频域方便的设计低通、带通或高通滤波器等对光谱进行噪声滤波, 但对整体的波形有要求, 易引起吉布斯现象。小波有较好的滤波效果, 但运算复杂, 并且小波种类较多, 选择不同的小波对滤波效果有较大的影响。

首先分析矿物可见光、短波红外、近红外波段的光谱噪声, 将光谱统去除技术引入光谱噪声滤波领域, 利用快速傅里叶变换滤波, 提出了一种光谱连续统处理快速傅里叶变换光谱滤波算法; 然后基于 USGS 光谱库光谱和仿真白噪声, 对算法进行了性能评价; 最后将其用于新疆包古图地区样品红外光谱预处理。

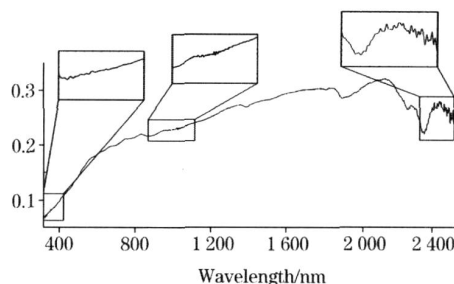


Fig 1 ASD spectrum of sample in Baogutu area

1 红外光谱与光谱噪声

根据矿物中某些官能团在红外光谱的特征吸收光谱可以区分不同矿物。红外光谱测量仪器采用美国分析光谱仪器公司(ASD) FieldSpec FR3 便携式光谱仪, 波谱范围 350 ~ 2 500 nm; 光谱分辨率重采样为 1 nm。采集数据所用参考板是中科院安徽光机所出品的聚四氟乙烯白色板。

红外光谱易受化学成分、含量波动、测量环境及传感器材料等白噪声因素影响。ASD 光谱仪在可见光/短波红外波段采用低噪 NMOS 硅光电二极管阵列, 在近红外波段采用热电制冷的铟-镓-砷光电探测器, 光电探测材料和探测电路的变化, 造成了不同的信噪比。图 1 为新疆包古图地区的孔雀石化的英安斑岩样品 ASD 光谱, 在波段 350~450, 900~

收稿日期: 2008-11-26, 修订日期: 2009-02-26

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2006BAB07B00)资助

作者简介: 刘庆杰, 1981 年生, 中国科学院遥感应用研究所博士研究生

e-mail: liuqingjie66@yahoo.com.cn, iamqingjie@163.com

1 200 和 2 300~2 500 nm 有较多的高频噪声,尤其在短波红外波段的剧烈噪声对矿物的分析与识别造成严重影响。观察研究区样品大量 ASD 光谱都有一致的规律。

2 滤波算法

2.1 光谱统处理

连续统去除是分析矿物高光谱数据的一种常用方法。连续统被定义为光谱反射率曲线中反射率峰之间连接线性连接部分,描述了不同物质的平均光学路径长度与不同的吸收过程。可以理解为光谱曲线的包络线或外壳,是连接光谱曲线上的局部最大值点外凸的曲线。有效地突出光谱曲线的吸收和反射特征,并且将其归一化到一个一致的光谱背景上,即将各种矿物形状不规则的红外光谱进行标准化。

由于高光谱红外光谱波段窄、光谱覆盖范围宽,计算方法太复杂,会影响计算速度。设光谱反射率曲线样点数组 $r(i)$, $i = (0, 1, \dots, N-1)$ 。利用文献[9]的光谱统运算方法,得到曲线的光谱统 $C(i)$, 计算反射率去光谱统值: $r_c(i) = r(i)/C(i)$, N 为光谱长度, $r_c(0) = 1$, $r_c(N-1) = 1$ 。波段吸收深度 d 定义如下: $d = 1 - r_c$, $0 \leq d \leq 1$, 且 $d(0) = 0$, $d(N-1) = 0$ 。

2.2 快速傅里叶变换

傅里叶变换是信号频域分析的重要工具。光谱信号 $r(i)$ 的傅里叶变换表达式为: $R(k) = \sum_{i=0}^{N-1} r(i) W_N^k (k = 0, 1, \dots, N-1)$, $W_N^k = \exp(-2\pi ki)$ 。其振幅谱 $A(v)$ 和相位谱 $P(v)$ 中含有在频域相分离的目标信号信息和噪声信息。去除掉噪声波段,实现滤波目的。

快速傅里叶变换(FFT)利用 W_N^k 的对称性和周期性,采用 FFT 按时间抽取变换形式(DIT)把 N 点离散傅里叶变换 DFT 的计算变成一系列迭代运算过程,简化了运算量。输入序列 $r(i)$ 按 i 的奇偶分成两个子序列,即 $r_1(m)$, $r_2(m)$, 其对应 DFT 为 $R_1(k)$, $R_2(k)$, ($m, k = 0, 1, \dots, (N/2) - 1$)。则 $R(k)$ 可以表示成前后两部分 $R(k) = R_1(k) + W_N^k R_2(k)$ 和 $R(N/2 + k) = R_1(k) - W_N^k R_2(k)$ 。同样 $R_1(k)$ 和 $R_2(k)$ 也可按上式递归展开,得到 N 个点的 DFT, 计算复杂度得到了大大降低。

2.3 连续统快速傅里叶变换

文中滤波思路是:首先将待处理光谱在时域内进行连续统去除,根据波段吸收深度公式计算光谱特征谱带;利用快速傅里叶变换将光谱特征谱带由时域转化到频域,将噪声与目标信号分离,然后设计低通滤波器滤除高频白噪声,再通过傅里叶反变换滤波后的频谱信息转化为滤波后时域特征光谱信息;最后,在时域内根据光谱连续统恢复光谱信号,得到滤波后的光谱。

3 实验结果及分析

3.1 实验部分

选择 ENVI 的 USGS 库中典型的绿泥石光谱[图 3(a)]

为实验数据源,对文中的算法进行评价。该库中绿泥石光谱波长范围为 400~2 500 nm。据前面噪声分析,在绿泥石光谱的可见光、近红外波段及短波红外波段 400~2 200 和 2 200~2 500 nm 分别添加幅值为 0.01 和 0.06 的加性均值白噪声,得到被两种白噪声污染的绿泥石光谱[图 3(b)]。

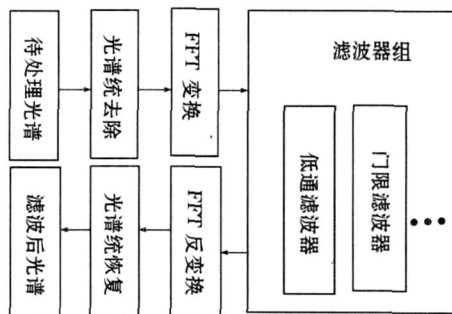


Fig. 2 Flow chart of CFFT filtering method

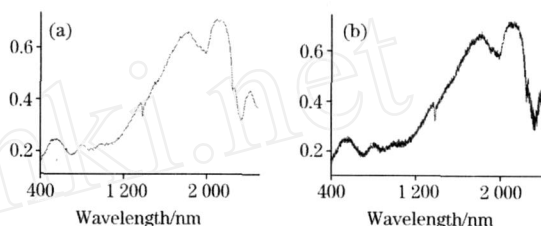


Fig. 3 Spectra of chlorite in USGS and white noise simulation

(a): Spectrum of chlorite in USGS;
(b): Chlorite spectrum containing white noise

图 4 中列出了原始绿泥石光谱、受白噪声污染绿泥石光谱、五点三次滤波光谱、快速傅里叶变换(FFT)滤波光谱及提出的连续统快速傅里叶变换(CFFT)滤波光谱。其中五点三次滤波算法对含噪光谱进行了 150 次滤波,FFT 滤波及 CFFT 滤波的截止频率为 150。为更清晰地分析滤波结果,分别选出噪声典型波段(400~500 nm)[图 4(a)]及(2 300~

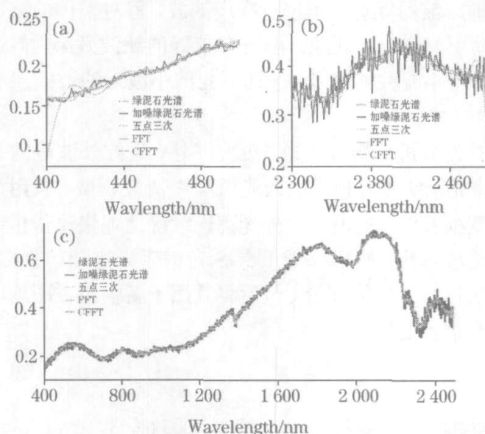


Fig. 4 Result comparison of CFFT with the others

(a): Filter result between 400~500 nm;
(b): Filter result between 2 300~2 500 nm;
(c): Spectrum filtering result of some methods

2 500 nm) [图 4(b)] 进行几种滤波效果的对比观察。对含噪声光谱进行多次五点三次滤波在一定程度上减弱了白噪声对原始光谱的影响, 但是噪声的影响依然比较明显, 尤其噪声引起的小吸收峰和反射峰较为严重。另外为了得到更好的滤波效果需进行多次的五点三次滤波, 运行效率比较低。FFT 滤波方法在光谱的中间波段的滤波效果要优于五点三次方法, 但在光谱的边缘波段 400~500 nm 以及 2 400~2 500 nm 有较大的振荡, 产生波谱失真, 即吉布斯现象。该现象的主要原因是不同地物红外光谱波形变化较大, 并且光谱形状规律不一致。CFFT 利用光谱连续统处理解决了这一问题, 对整条波谱对噪声进行了较好的滤除, 调节滤波器截止频率可以调整滤波效果, 不影响运行效率。

3.2 效果评价

滤波去噪后的光谱与标准绿泥石光谱两者的均方误差 (mean squared error, MSE) 值, 作为衡量滤波算法评价的标准^[11], 定义为 $MES = \left(\sum (y_i - x_i)^2 \right) / N$, y_i 是标准信号; x_i 是去噪后信号。

分别计算五点三次算法对含噪红外光谱进行 100、150 和 200 次滤波 MES 值, 以及 FFT 和 CFFT 分别在截止频率选 100, 150 和 200 滤波时的 MES 值 (如表 1)。随着五点三次算法滤波次数的增加, 去噪光谱的 MES 值逐渐减小。FFT 滤波中, 截止频率变大, MES 值变小, 但由于吉布斯现象的影响, MES 值比其他算法大。CFFT 的 MES 值都小于前两种方法的值, 且在截止频率为 150 时取得最小值, 为最优截止频率, 取得了最好的滤波效果。

五点三次滤波计算是对每组数据进行改正计算, 每一个改正的点都包含了其他两个相邻点的信息, 对于较大的观测噪声的消除是比较有效的, 但是对于比较准确的观测数据, 其精度提高的可能性并不大, 甚至会损失一定的精度。FFT 滤波对待处理光谱有一定波形要求, 而地物红外光谱比较复杂, 一般不满足这种要求。光谱连续统处理则较好的解决了地物红外光谱波形复杂问题。

Table 1 MES comparison of three filtering methods

滤波次数或 截止频率	滤波方法		
	五点三次	FFT	CFFT
100	2.508 2e-005	8.491 1e-005	1.318 5e-005
150	2.296 3e-005	6.107 4e-005	1.233 6e-005
200	2.207 6e-005	4.787 3e-005	1.249 9e-005

对包古图样品的红外光谱进行 CFFT 滤波 (图 5), 在近红外、短波红外的高频噪声得到了很好的滤除。将算法推广应用到研究区其他样本光谱的噪声处理, 都得到比较理想的滤波效果。

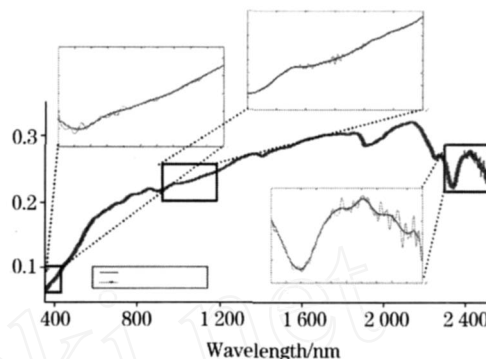


Fig 5 CFFT application in sample of Baogutu area

4 结 论

时域五点三次滤波对噪声污染红外光谱滤波效果一般, 运行效率比较低。而常规的快速傅里叶变换对光谱的中间波段有较好的噪声滤出作用, 但在光谱边缘波段易引起吉布斯现象, 噪声光谱失真。利用光谱连续统处理较好地解决了快速傅里叶变换滤波的上述现象, 取得了较好的噪声滤波效果, 提高了算法的运行效率, 比较理想地去除了可见光、短波红外、近红外波段的噪声。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Yin, ZHOU Meng-ran (张 银, 周孟然). Infrared Technology (红外技术), 2007, 29(6): 345.
- [2] HAN Guo-ming, YUN Shao-hui (韩国明, 云绍辉). Transactions of the China Welding Institution (焊接学报) 2001, 22(1): 19.
- [3] WANG Qiang, SHU Jiong, YIN Qiu (王 强, 束 炯, 尹 球). J. Infrared Millim. Waves (红外与毫米波学报), 2006, 25(1): 29.
- [4] LI Xiao-li, HU Xing-yue, HE Yong (李晓丽, 胡兴越, 何 勇). J. Infrared Millim. Waves (红外与毫米波学报), 2006, 25(6): 417.
- [5] LAN Tian-ge, FAN Yong-hua (兰天鸽, 方勇华). Infrared and Laser Engineering (红外与激光工程), 2007, 36(2): 257.
- [6] CHEN Tian-jiang (陈天江). Journal of Yunnan University (云南大学学报·自然科学版), 2005, 27(6): 509.
- [7] LIU Zhi-hong, DENG Bo (刘志宏, 邓 波). Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory (光谱实验室), 2006, 23(4): 815.
- [8] XIU Lian-cun, ZHENG Zhi-zhong (修连存, 郑志忠). Acta Geologica Sinica (地质学报), 2007, 81(11): 1584.
- [9] WU Chuan-qing (吴传庆). Remote Sensing Technology and Application (遥感技术与应用), 2005, 20(5): 506.
- [10] Bergman E L, Brage H, Josefson M, et al. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2006, 41(1): 89.
- [11] NI Zhen, HU Chang-qin (尼 珍, 胡昌勤). Chinese Journal Pharmaceutical Analysis (药物分析杂志), 2008, 28(5): 824.

Continuum Based Fast Fourier Transform Processing of Infrared Spectrum

LIU Qing-jie^{1,2}, LIN Qi-zhong², WANG Qin-jun², LI Hui^{1,2}, LI Shuai^{1,2}

1. Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2. Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract To recognize ground objects with infrared spectrum, high frequency noise removing is one of the most important phases in spectrum feature analysis and extraction. A new method for infrared spectrum preprocessing was given combining spectrum continuum processing and Fast Fourier Transform (CFFT). Continuum was firstly removed from the noise polluted infrared spectrum to standardize hyper-spectra. Then the spectrum was transformed into frequency domain (FD) with fast Fourier transform (FFT), separating noise information from target information. After noise eliminating from useful information with a low-pass filter, the filtered FD spectrum was transformed into time domain (TD) with fast Fourier inverse transform. Finally the continuum was recovered to the spectrum, and the filtered infrared spectrum was achieved. Experiment was performed for chlorite spectrum in USGS polluted with two kinds of simulated white noise to validate the filtering ability of CFFT by contrast with cubic function of five point (CFFP) in time domain and traditional FFT in frequency domain. A circle of CFFP has limited filtering effect, so it should work much with more circles and consume more time to achieve better filtering result. As for conventional FFT, Gibbs phenomenon has great effect on preprocessing result at edge bands because of special character of rock or mineral spectra, while works well at middle bands. Mean squared error of CFFT is 0.000 012 336 with cut-off frequency of 150, while that of FFT and CFFP is 0.000 061 074 with cut-off frequency of 150 and 0.000 022 963 with 150 working circles respectively. Besides the filtering result of CFFT can be improved by adjusting the filter cut-off frequency, and has little effect on working time. The CFFT method overcomes the Gibbs problem of FFT in spectrum filtering, and can be more convenient, dependable, and effective than traditional TD filter methods.

Keywords Continuum removing; FFT; Infrared spectrum; Noise filtering; Gibbs

(Received Nov. 26, 2008; accepted Feb. 26, 2009)