

文章编号: 1001 - 9014(2008)03 - 0227 - 07

干涉成像光谱仪切趾函数对复原光谱的影响分析

张文娟^{1,2}, 张兵³, 张霞¹, 高连如³, 张维⁴

(1. 中国科学院 遥感应用研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;

3. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100080;

4. 合肥工业大学 理学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 随着搭载干涉成像光谱仪 HJY20-1-A 的我国环境与减灾遥感卫星 HJ-1A 即将发射, 我国干涉光谱成像研究也从实验室开始走向实用化。在干涉光谱成像过程中, 切趾函数处理是干涉成像光谱仪光谱复原过程中的一个重要环节, 对复原光谱的精度有着极其重要的影响。根据 HJY20-1-A 的参数设置, 文中首先模拟了 24 种典型地物对应于 HJY20-1-A 和其它最大光程差设置的干涉成像光谱仪数据, 在不同切趾函数作用下的复原光谱, 结果表明 Hanning 函数是其中最有效、最为稳定的切趾函数, 同时发现切趾函数的应用虽然可以提高复原光谱的精度, 但与真实光谱仍存在一定差距, 尤其对应 HJY20-1-A, 复原光谱的精度更加有限。在以上分析基础上, 提出了基于仪器线型函数标准化的光谱复原改进算法, 实验结果证实了该方法可以显著提高复原光谱精度, 尤其适用于最大光程差较小的空间调制型干涉成像光谱仪。最后, 就 HJY20-1-A 复原光谱对 3 种典型植被指数求解, 进一步证明了该方法的有效性。

关键词: 高光谱遥感; 干涉成像光谱仪; 切趾函数; 光谱复原; 植被光谱指数

中图分类号: TP731 **文献标识码:** A

EFFECTS OF APODIZATION FUNCTIONS OF IMAGING FOURIER TRANSFORM SPECTROMETER ON RECONSTRUCTED SPECTRUM

ZHANG Wen-Juan^{1, 2}, ZHANG Bing³, ZHANG Xia¹, GAO Lian-Ru³, ZHANG Wei⁴

(1. The State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

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

4. School of Science, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The imaging Fourier transform spectrometer (IFTS) HJY20-1-A onboard China small satellite "HJ-1A" will be launched soon. As a new and challenging type of imaging spectrometer, its successful launch implies IFTS will play an important role in hyperspectral remote sensing applications, in which apodization function is an important part of interferogram pre-processing, and it has a powerful effect on the accuracy of reconstructed spectra. Hence, it is necessary to analyze the effect of apodization functions on reconstructed spectra. The reconstructed spectra of 24 kinds of typical surface objects were simulated under four different apodization functions and four different max optical path differences (one for HJY20-1-A) in this paper. Results show that 1) Hanning function is the most stable and efficient apodization function; 2) although the accuracy of reconstructed spectrum is improved by apodization functions, the accuracy is not very high, especially for HJY20-1-A. Finally, an improved algorithm based on the standardization of the instrument line shape function (LS) was proposed, the reconstructed spectrum by this algorithm was gained with higher accuracy. For reconstructed spectra with HJY20-1-A, three typical vegetation indices were calculated. The calculated results agree with those obtained by the real spectra.

Key words: hyperspectral remote sensing; imaging Fourier transform spectrometer (IFTS); apodization function; spectrum reconstruction; vegetation indices

收稿日期: 2007 - 11 - 20, 修回日期: 2008 - 02 - 11

Received date: 2007 - 11 - 20, revised date: 2008 - 02 - 11

基金项目: 国家自然科学基金“利用干涉成像光谱仪进行月球表面元素定量遥感探测的机理与方法研究”(40571113)

作者简介: 张文娟 (1983-), 女, 安徽潜山人, 遥感所博士研究生, 主要从事干涉成像光谱仪成像分析及图像模拟研究。

引言

干涉成像光谱仪获取的原始数据是干涉信息, 对干涉信息进行光谱复原得到光谱数据. 记录的干涉信息是有限光程差范围内的信号, 这使得复原光谱存在旁瓣效应^[1], 旁瓣的存在严重影响邻近光谱尤其是较弱光谱的准确测定. 为了提高复原光谱的精度, 光谱复原中采用切趾函数来抑制这种旁瓣效应^[1].

经典的切趾函数主要是信号处理中的各种窗函数^[1], 在此基础上, 研究者们提出了一些新的切趾函数. 其中, Filler 提出了两大切趾函数族^[2], Norton&Beer 也提出了新的切趾函数族^[3-4]. 但切趾函数处理对复原光谱及其应用的影响分析很少, Amato 等指出切趾函数处理对于利用红外波段反演地球物理参数没有效果^[5], 该研究针对的干涉成像光谱仪是最大光程差较大的时间调制型. 而由于制造工艺的限制, 空间调制型干涉成像光谱仪的最大光程差通常较小, 此时切趾函数作用对复原光谱的影响极有可能不同. 随着空间调制型干涉成像光谱仪 HJY20-1-A 即将投入使用, 切趾函数对复原光谱的影响分析显得更加迫切.

以 24 种典型地物光谱为例, 本文首先分析了不同切趾函数对四种最大光程差 (包括 HJY20-1-A)、四种切趾函数作用下复原光谱的影响, 得出切趾函数的应用可以提高复原光谱精度的结论, 同时发现当最大光程差较小时, 切趾函数作用下的复原光谱精度仍然不高, 尤其是对于 HJY20-1-A. 在此基础上, 本文提出了基于仪器线型函数标准化的光谱复原改进算法, 试验结果证明该方法可以显著提高复原光谱精度. 最后就 HJY20-1-A 复原光谱求解了三种典型植被指数, 进一步证明了方法的有效性.

1 试验数据准备

1.1 地面光谱数据

本文中所采用的 24 种典型地物的光谱数据是于 2006 年 11 月在中科院千烟洲生态试验站通过野外试验测量获得. 测量仪器为 ASD 地面光谱仪 (350~2500nm). 在光谱测量过程中, 先测量白板光谱, 后测量地物光谱, 各测量 10 次以上, 测量时天空晴朗无云, 大气条件稳定. 在数据后期处理中剔除了异常光谱, 并对同一地物的多条反射率光谱数据取算术平均, 将得到的结果作为该地物的反射率光谱曲

线.

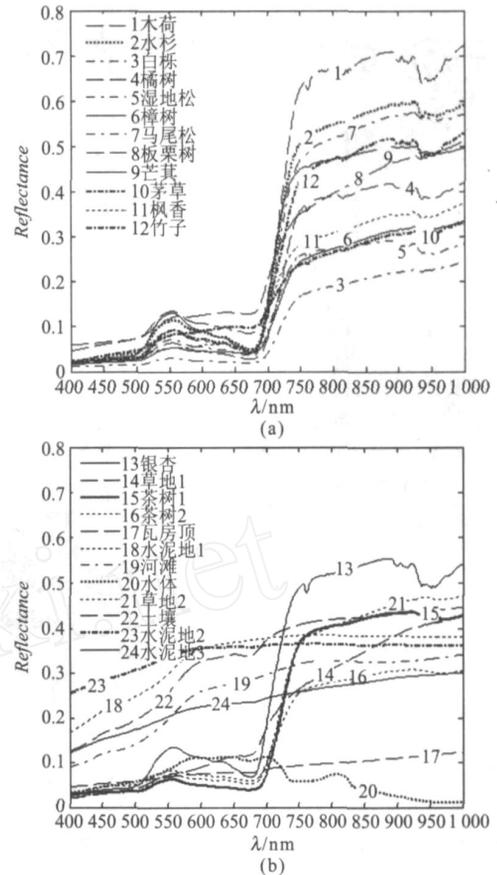


图 1 典型地物光谱数据

Fig 1 Spectra of surface objects

地物光谱数据涵盖了自然界的主要地物类型, 主要有水体、干土、水泥地、河滩、瓦屋顶、草地、竹子以及多种植物. 如图 1 所示, 图中地物类型丰富, 光谱差异大. 图 1(a) 为各种典型树种和竹子的光谱曲线, 图 1(b) 中为其他各种典型地物和草地的光谱曲线, 其中, 3 种水泥地分别是不同粗糙度下的光谱数据.

1.2 入瞳辐亮度计算

本文旨在分析切趾函数处理对光谱复原的影响, 因此假设干涉成像光谱仪的数据获取直接在地面进行, 不考虑成像几何和大气等因素的影响, 所以干涉成像光谱仪的入瞳辐亮度 $B(\lambda)$ 为:

$$B(\lambda) = L(\lambda) \cdot \Delta A \cdot \Delta \Omega \cdot \Delta t \quad (1)$$

其中, λ 为波数, $L(\lambda)$ 为地物在波数 λ 处的反射率, $L(\lambda)$ 是地物在波数 λ 处入射到地表的辐亮度, 通常采用太阳常数 $F_0(\lambda)$ 代替 $L(\lambda)$.

2 切趾函数与其对复原光谱的影响分析

2.1 光谱复原算法

切趾函数满足的必要条件为:在零光程差处为极大值,随着光程差的增大函数值变小,在最大光程差 L 处为零. 试验中采用了矩形函数、三角函数、Hanning函数和 Blackman函数四种常用切趾函数进行影响分析,这四种切趾函数以及对应的仪器线型函数 (LS)如表 1所示. 由于干涉成像光谱仪探测到的干涉信号是有限光程差范围内的信号,即干涉信号在最大光程差位置被突然截断,这相当于对干涉成像光谱仪探测到的信号采用了矩形函数进行处理.

切趾函数 $w(\cdot)$ 对应的仪器线型函数 LS 可以看作是通过最大光程差为 L 的干涉成像光谱仪的波数为 ν_1 的单色光,经过切趾函数 $w(\cdot)$ 作用后的复原光谱数据. 若波数为 ν_1 的单色光辐亮度值为 $B(\nu_1)$,则复原后的辐亮度值 $B(\nu_1)$ 为: $B(\nu_1) = B(\nu_1) * LS$ (*表示卷积).

因此,当波数范围 $[\nu_{min}, \nu_{max}]$ 的入瞳光辐亮度是 $B(\nu)$ 时,其经过切趾函数 $w(\cdot)$ 作用的复原光谱辐亮度值 $B(\nu)$ 是:

$$B(\nu) = \int_{\nu_{min}}^{\nu_{max}} B(\nu_1) * LS(\nu - \nu_1) d\nu_1 \quad (2)$$

不同切趾函数作用下的复原光谱精度存在差异,而干涉成像光谱仪的最大光程差不同,复原光谱的精度也差异很大. 因此,本文中对干涉成像光谱仪分别设置了四种最大光程差值,以分析不同最大光程差时切趾函数对 24 种典型地物复原光谱精度的影响. 这四种最大光程差值是 0.4cm、0.1cm、0.05cm 以及 HJY20-1-A 对应的最大光程差,其中 HJY20-1-A 的最大光程差由光谱分辨率求得是 0.0069cm.

2.2 切趾函数对复原光谱的影响分析

针对 24 种典型地物,根据公式 (2)求得对应不同最大光程差、不同切趾函数的复原光谱. 这些不同条件下的 24 种典型地物复原光谱的相对误差根据

公式 (3)求得,相对误差图如图 2 所示.

$$Error(\nu) = \frac{B(\nu) - B(\nu)}{B(\nu)} \quad (3)$$

图 2(a) ~ 2(d) 分别对应不同最大光程差时,四种切趾函数作用下的 24 种典型地物复原光谱的相对误差. 从图中可以看出,虽然地物类型不同,光谱信息存在差异,但复原光谱的相对误差结果却几乎相同. 这表明切趾函数作用下的复原光谱精度不随地物类型变化.

通过对图 2(a) ~ 2(d) 中不同切趾函数作用下的复原光谱的比较分析发现,当最大光程差一定时,矩形函数作用下的复原光谱相对误差最大,其它切趾函数作用后的复原光谱精度明显提高,尤其是当最大光程差 $L = 0.1\text{cm}$ 和 $L = 0.4\text{cm}$ 时,这表明切趾函数处理是光谱复原过程中不可忽略的环节. 其中,相对于其他切趾函数, Hanning 函数作用后的复原光谱在各个最大光程差下相对误差都较小. 此外,同一最大光程差下,各个切趾函数作用下的复原光谱相对误差都随着波长增大而增大,这是随着波长变大波长分辨率变低的一种表现.

从图 2(a)至图 2(d),复原光谱对应的最大光程差逐渐变大,比较不同最大光程差、同一切趾函数作用下的复原光谱发现,随着最大光程差增大,相对误差逐渐变小. 图 2(a)中 HJY20-1-A 对应的复原光谱误差很大,图 2(b)中的复原光谱精度相对图 2(a)有了显著提高,而当最大光程差 $L = 0.4\text{cm}$ 时,复原光谱则已经非常贴近真实光谱.

可见,虽然切趾函数的作用可以提高复原光谱精度,但干涉成像光谱仪的最大光程差值的影响更大. 而对于空间调制型干涉成像光谱仪,由于受到硬件工艺限制,通常最大光程差很难设置的很大. 因此,在最大光程差较小的情况下,如何提高复原光谱精度,对于空间调制型干涉成像光谱仪尤其重要.

表 1 4种切趾函数及对应的仪器线型函数

Table 1 Four different apodization functions and corresponding LS functions

函数	时域	频域
矩形函数	$w(\nu) = \begin{cases} 1, & -L \leq \nu \leq L \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$	$LS_{rect}(\nu) = 2L \text{sinc}(\nu L)$
三角函数	$w(\nu) = 1 - (\nu /L)$	$LS_{tri}(\nu) = L \text{sinc}^2(\nu L/2)$
Hanning函数	$w(\nu) = 0.5 + 0.5 \cos\left(\frac{\pi \nu}{L}\right)$	$LS_{hann}(\nu) = L \text{sinc}(\nu L) + 0.5L \text{sinc}^2(\nu L/2) + 0.5L \text{sinc}^2(3\nu L/2)$
Blackman函数	$w(\nu) = 0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{\pi \nu}{L}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{2\pi \nu}{L}\right)$	$LS_{black}(\nu) = 0.84L \text{sinc}(\nu L) + 0.5L \text{sinc}^2(\nu L/2) + 0.5L \text{sinc}^2(3\nu L/2) + 0.08L \text{sinc}^2(2\nu L) + 0.08L \text{sinc}^2(4\nu L)$

其中: $\nu_1 = \nu - L, \nu_2 = \nu - L, \nu_3 = \nu - L, \nu_4 = \nu - L, \nu_5 = \nu - L, \nu_6 = \nu - L, \nu_7 = \nu - L, \nu_8 = \nu - L, \nu_9 = \nu - L, \nu_{10} = \nu - L, \nu_{11} = \nu - L, \nu_{12} = \nu - L, \nu_{13} = \nu - L, \nu_{14} = \nu - L, \nu_{15} = \nu - L, \nu_{16} = \nu - L, \nu_{17} = \nu - L, \nu_{18} = \nu - L, \nu_{19} = \nu - L, \nu_{20} = \nu - L, \nu_{21} = \nu - L, \nu_{22} = \nu - L, \nu_{23} = \nu - L, \nu_{24} = \nu - L$

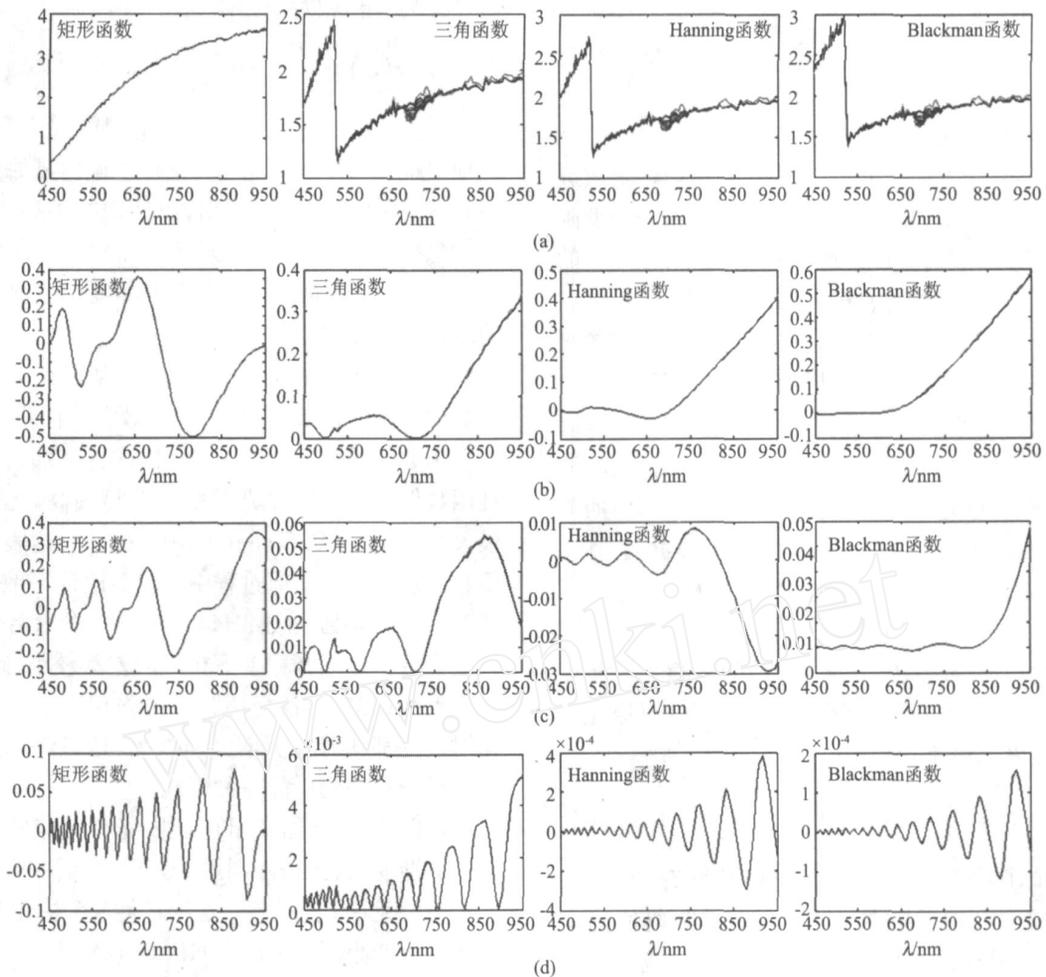


图 2 四种不同最大光程差设置下的干涉成像光谱仪数据经过四种不同切趾函数作用后的复原光谱相对误差图
 (a) $L = 0.0069\text{cm}$ (b) $L = 0.05\text{cm}$ (c) $L = 0.1\text{cm}$ (d) $L = 0.4\text{cm}$

Fig 2 Relative errors of reconstructed spectra with differentMPD and different apodization functions

3 光谱复原算法改进与分析

3.1 光谱复原算法改进

切趾函数的作用在一定程度上提高了复原光谱精度,当 $L = 0.1\text{cm}$ 时, 950nm 处的光谱分辨率已经高达 0.55nm ,但从图 2 可以看出,复原光谱相对误差仍然很大.同时, HJY20-1-A 经切趾函数作用后的复原光谱误差仍然很大.因此如何提高复原光谱精度对于 HJY20-1-A 的应用显得非常重要.

干涉成像光谱仪干涉信号的突然截断使得复原光谱能量外泄,这导致波数 处的复原光谱是不仅含有该波数处的光谱信息,同时还叠加了周围波谱信息.因此采用基于仪器线型函数标准化的光谱复原方法,以提高复原光谱的精度.该方法得到的复原光谱 $B_std(\lambda)$ 为:

$$B_std(\lambda) = \frac{\max_{\lambda} B(\lambda) * LS}{\min_{\lambda} LS} \quad (4)$$

对 24 种典型地物,根据公式 (4) 求得对应 4 种不同最大光程差、4 种不同切趾函数的复原光谱.这些不同条件下的 24 种典型地物复原光谱对应的相对误差采用与公式 (3) 相同方法求得,相对误差图如图 3 所示.

对应比较图 2 与图 3 中的各幅图,发现同一最大光程差、同一切趾函数作用下的复原光谱,经过仪器线型函数标准化后的复原光谱相对误差明显变小,同时还削弱了复原光谱相对误差随波长的变化性. HJY20-1-A 对应的复原光谱采用改进算法后精度显著提高.

此外,比较图 3 中同一最大光程差下不同切趾

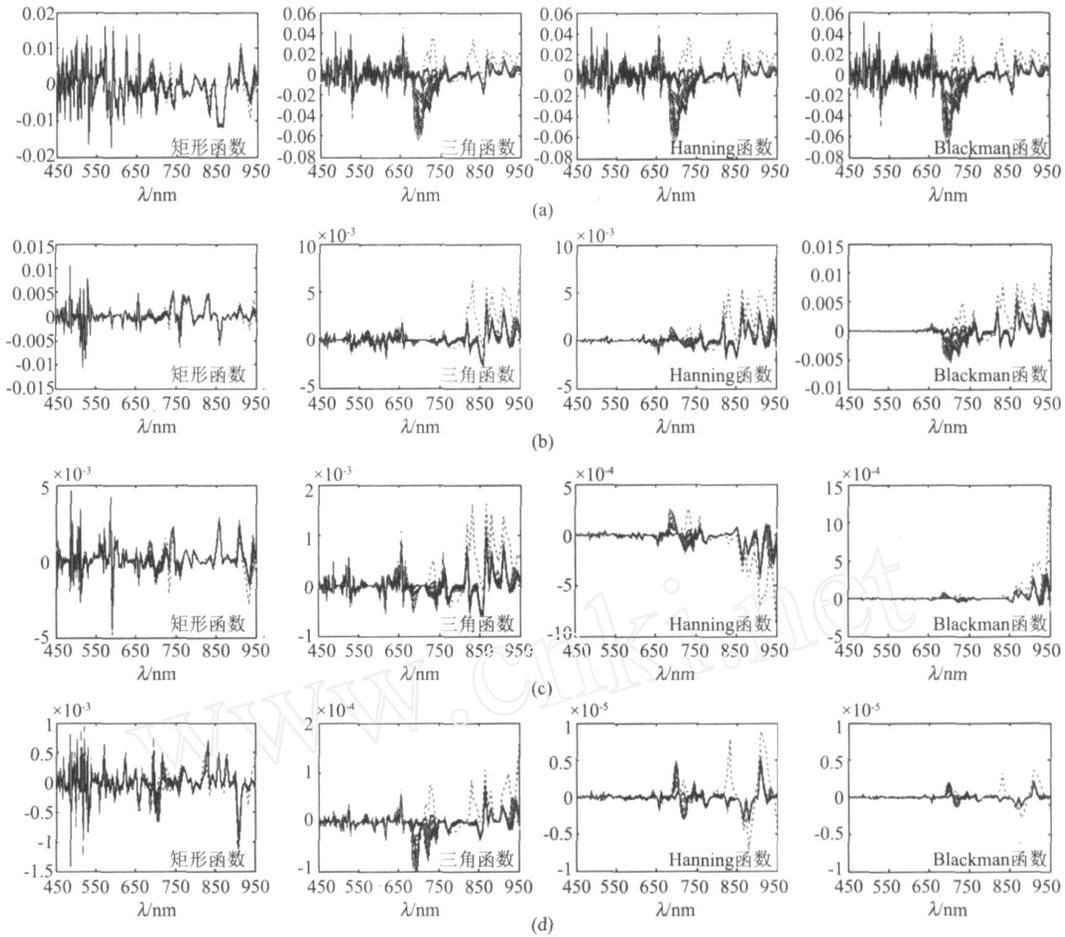


图 3 四种不同最大光程差设置的 24种典型地物的干涉成像光谱仪数据,经过四种不同切趾函数作用以及仪器线型函数标准化后的复原光谱相对误差图 (a) $L=0.0069\text{cm}$ (b) $L=0.05\text{cm}$ (c) $L=0.1\text{cm}$ (d) $L=0.4\text{cm}$

Fig 3 Relative errors of reconstructed spectra calculated by the improved algorithm with differentMPD and different apodization functions

函数作用后的复原光谱可见,切趾函数作用后的误差明显降低,其中,Hanning函数作用后的复原光谱在不同最大光程差时相对误差都较小.但对于HJY20-1-A,其它切趾函数作用后的复原光谱精度却稍微下降.

由上述分析可知,对干涉成像光谱仪进行光谱复原时,仪器线型函数标准化能有效提高复原光谱的精度,Hanning函数作用下的复原光谱在各个最大光程差时仍有很好的精度.

3.2 植被指数应用分析

植被遥感是 HJY20-1-A 的一个重要应用方向.本文以三种典型植被指数为例,针对 24 种典型地物,比较分析 HJY20-1-A 探测数据在不同切趾函数作用时,采用改进算法后复原光谱的植被指数反演精度,进而分析讨论不同切趾函数在 HJY20-1-A 具体应用中的影响.这 3 种典型植被指数是:

归一化植被指数^[7]:

$$NDVI = \frac{R_{762} - R_{680}}{R_{762} + R_{680}}, \quad (5)$$

叶绿素吸收反射率指数^[8]:

$$CARI = \frac{R_{700} / 670a + R_{670} + b / R_{670}}{\sqrt{a^2 + 1}}, \quad (6)$$

其中, $a = (R_{700} - R_{550}) / 150$, $b = R_{550} - 550a$

修正的三角植被指数^[9]:

$$MTVI_2 = \frac{1.5 / [2(R_{800} - R_{550}) - 2.5(R_{670} - R_{550})]}{\sqrt{(2R_{800} + 1)^2 - (6R_{800} - 5)\sqrt{R_{670} - 0.5}}}. \quad (7)$$

利用 3.1 节中 HJY20-1-A 对应 4 种切趾函数作用下的复原光谱,根据公式 (5) ~ (7) 以及相对误差公式,求得植被指数结果以及相对误差,其中,根据干涉成像光谱仪 HJY20-1-A 的波段设置,采用 668nm、681nm、700nm、762nm 替代公式中的 670nm、681nm、699nm 和 765nm.分析植被光谱曲线特性可知,这种邻近波段替代对植被指数求解影响很小.植

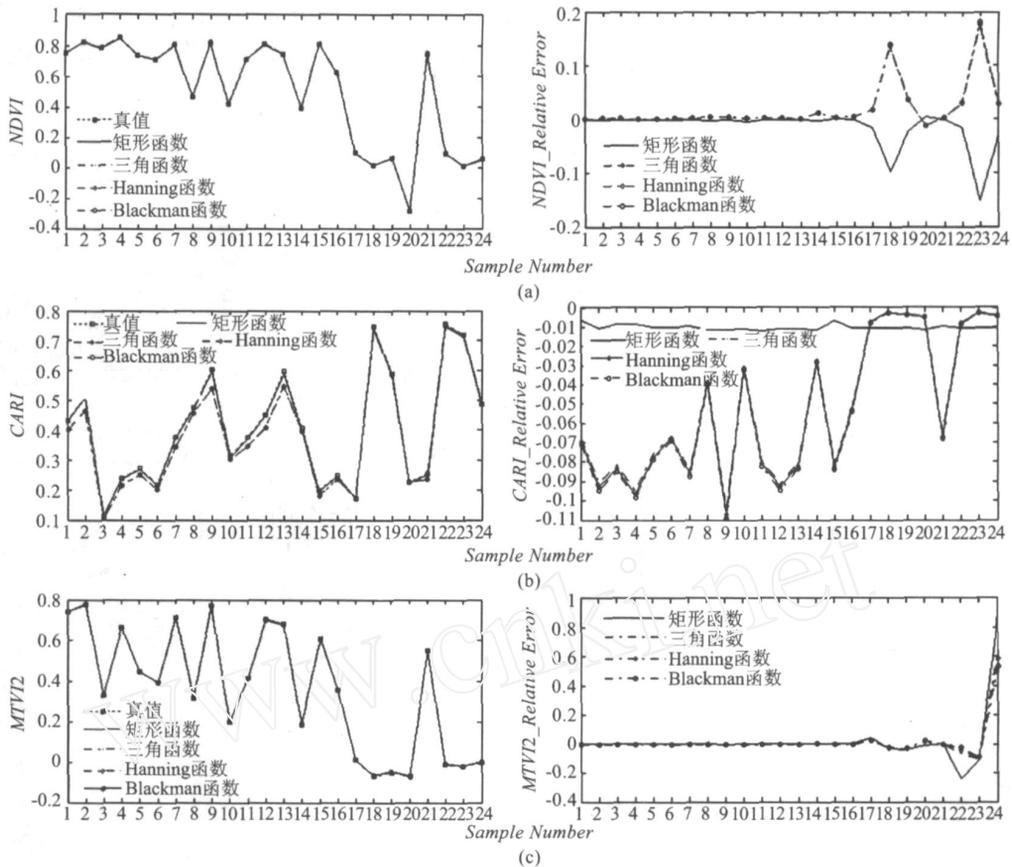


图 4 不同切趾函数作用下 HJY20-1-A 的 24 种典型地物复原光谱的三种植被指数结果以及相对误差图。左边是植被指数结果,右边为相对误差图 (a)NDVI (b)CARI (c) MTVI2

Fig 4 Vegetation index values and relative errors about HJY20-1-A reconstructed spectra calculated by the improved algorithm. The left scale for vegetation index values and the right scale for relative errors

被指数及其相对误差结果如图 4 所示,图中横坐标对应于图 1 中的 24 种典型地物。

由图 4 可见,图 4(a)和图 4(c)中不同切趾函数对应的植被指数精度相当,而图 4(b)中矩形函数对应的植被指数精度最高,这与图 3(a)中矩形函数对应的复原光谱精度最高相符。总体而言,采用改进算法后求得的四种不同切趾函数作用下的 HJY20-1-A 的复原光谱对应的植被指数精度较高,尤其前 16 种地物(均为典型植物)的误差非常小。植被指数的精度依赖于复原光谱的精度以及相应的植被指数公式,改进的算法显著提高了 HJY20-1-A 复原光谱精度,进而提高了 HJY20-1-A 在植被方面的应用潜力。

4 结论

比较分析 24 种典型地物对应四种最大光程差、四种切趾函数作用下的复原光谱,以及基于仪器线型函数标准化的光谱复原改进算法后复原光谱,得

到以下结论:

(1) 已有的复原光谱算法中,同一切趾函数作用下的复原光谱精度不随地物类型变化。各个切趾函数作用下的复原光谱相对误差总体都随着波长增大而增大,这是随着波长变大波长分辨率变低的一种表现。

(2) 已有的复原光谱算法中,切趾函数的作用虽然可以提高复原光谱精度,但复原光谱精度受干涉成像光谱仪最大光程差值的影响更大。而对于空间调制型干涉成像光谱仪,由于受到硬件工艺限制,通常最大光程差很难设置的很大。因此,在最大光程差较小的情况下,如何提高复原光谱精度,对于空间调制型干涉成像光谱仪尤其重要。

(3) 使用基于仪器线型函数标准化的改进算法后,同一最大光程差、同一切趾函数作用下的复原光谱精度明显提高,同时还削弱了复原光谱相对误

(下转 240 页)

约为 3%,这就需要无论在进行成像模拟还是大气订正工作中,邻近贡献是不可忽略的。

建立的邻近效应模型虽然考虑了地表的非均匀性,但还是基于地表朗伯体假设而建立的;若想更为精确地定量描述邻近像元对目标像元的辐射贡献,需要考虑地表双向性反射率分布函数(BRDF)特性,后续工作将在此方面展开研究。

REFERENCES

- [1] XIAO Qin, LU Qin-Huo, LI Xiao-Wen, et al. Analysis correction of atmospheric cross radiation for high geometric resolution airborne remote sensing data [J]. *Journal of Remote Sensing* (肖青, 柳钦火, 李小文, 等. 高分辨率机载遥感数据的交叉辐射影响及其校正. 遥感学报), 2005, 6: 3—11.
- [2] Hu Bao-Xin, Li Xiao-Wen, Zhu Chong-Guang. Deriving the anisotropic atmospheric Point Spread Function of off-nadir remote sensing [J]. *Journal of images and graphics* (胡宝新, 李小文, 朱重光. 大倾角光学遥感中大气点扩散函数的近似模型. 中国图象图形学报), 1996, 1: 19—29.
- [3] NIU Zheng, ZHU Chong-Guang, WANG Chang-Yao. Analysis of atmospheric cross radiation in a slant viewing angle [J]. *Journal of Remote Sensing* (牛铮, 朱重光, 王长耀. 斜视角度下大气交叉辐射影响分析. 遥感学报), 1997, 2: 8—13.
- [4] CHEN Liang-Fu, ZHUANG Jia-Li, XU Xi-Ru, et al. The simulation of thermal radiant directionality of continuous

vegetation using Monte Carlo method [J]. *Journal of Remote Sensing* (陈良富, 庄家礼, 徐希孺, 等. 用 Monte Carlo 方法模拟连续植被热辐射方向性. 遥感学报), 2000, (4): 261—265.

- [5] YANG Gui-Jun, LU Qin-Huo, HUANG Hua-Guo, et al. Methods for simulating infrared remote sensing images based on scene models [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨贵军, 柳钦火, 黄华国, 等. 基于场景模型的热红外遥感成像模拟方法. 红外与毫米波学报), 2007, 26 (1): 1—7.
- [6] HE Li-Ming, YAN Guang-Jian, LI Xiao-Wen, et al. Atmospheric correction for AMTIS single-channel multi-angular thermal-infrared imagery [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (何立明, 阎广建, 李小文, 等. AMTIS 单通道多角度热红外图像的大气订正. 红外与毫米波学报), 2006, 25 (6): 429—433.
- [7] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN4 USER'S MANUAL, AIR FORCE RESEARCH LABORATORY Space Vehicles Directorate. June 1999.
- [8] Bömer A, Wiest L, et al. SENSOR: a tool for the simulation of hyperspectral remote sensing systems [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 55 (6): 299—312.
- [9] Wout Verhoef, Heike Bach. Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87: 23—41.
- [10] Sadot D, Kopeika N S. Thermal imaging through the atmosphere: atmosphere MTF theory and verification [J]. *Opt Eng*, 1994, 33 (3): 880—887.

(上接 232页)

差随波长的变化性。

(4) 不管采用哪种算法,最大光程差一定时,矩形函数作用下的复原光谱相对误差最大,其它切趾函数作用后的复原光谱精度则明显提高。此外,相对于其他切趾函数, Hanning 函数作用后的复原光谱在各个最大光程差下相对误差都较小。

(5) 根据 HJY20-1-A 复原光谱对三种典型植被指数求解,进一步证明了基于仪器线型函数标准化的光谱复原改进算法的有效性。

文中选用了 4 种最大光程差以及 4 种切趾函数,与目前众多的切趾函数类型相比,采用的样本数量还不够丰富。因此下一步将对其他类型的切趾函数进行分析研究,从而更为全面地分析切趾函数处理带来的影响以及验证改进算法的有效性。

REFERENCES

- [1] Bell R J. *Introductory Fourier Transform Spectroscopy* [M]. New York: Academic Press, 1972.
- [2] Filler A H. Apodization and interpolation in fourier transform spectroscopy [J]. *J. Opt Soc Am*. 1964, 54: 762—767.
- [3] Norton R H, Beer R. New apodizing functions for fourier spectrometry [J]. *J. Opt Soc Am*. 1976, 66: 259—264.

- [4] Norton R H, Beer R. Errata - new apodizing functions for fourier spectrometry [J]. *J. Opt Soc Am*. 1977, 67: 419.
- [5] Amato U, Canditiis D D, Serio C. Effects of apodization on the retrieval of geophysical parameters from fourier transform spectrometers [J]. *Applied Optics* 1998, 37: 6537—6543.
- [6] Gao Lian-Ru, Zhang Bing, Zhang Xia, et al. Infrared spectral analysis of architectural materials covered by different paints [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (高连如, 张兵, 张霞, 等. 油漆涂层对板材红外光谱特性影响分析. 红外与毫米波学报), 2006, 25: 411—416.
- [7] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation [J]. *Remote Sensing of Environment* 1979, 8: 127—150.
- [8] Kim M S, Daughtry C S T, Chappelle E W, et al. The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation (APAR) [C]. Proceedings of the 6th Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing. France: VoD'Isere, 299—306, 1994.
- [9] Haboudane D, Miller J R, Tremblay N, et al. Hyperspectral vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application and validation in the context of precision agriculture [J]. *Remote Sensing of Environment* 2004, 90: 337—352.
- [10] Li Bao-Sheng, LU Yong, WANG An. Uniform sampling method of optical fiber fourier transform spectrometer [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李保生, 刘勇, 王安. 光纤傅里叶光谱仪干涉图均匀抽样方法. 红外与毫米波学报), 2007, 26 (3): 201—204.