空间调制型干涉光谱成像仪数据压缩方法研究

黄 旻[1,2]，相里斌[1,3]，袁 艳[4]，沈 中[5]，吕群波[1,2]，王忠厚[1]，刘学斌[1]

1. 中国科学院西安光学精密机械研究所光谱成像技术实验室，陕西 西安 710119
2. 中国科学院研究生院，北京 100049
3. 中国科学院光电技术研究院，北京 100190
4. 北京航空航天大学，北京 100083
5. 航天东方红卫星有限公司，北京 100094

摘 要 干涉型光谱成像技术是一种新型的光谱成像技术，近些年来发展迅速。在星载使用时，由于卫星数据传输容量的限制，需要对干涉成像光谱仪获得的原始干涉数据进行压缩，然后经过数据传输，到地面进行解压缩，再进行光谱复原处理，才能交给用户使用，干涉数据的压缩是一项新的技术，国内外很少有专门的文献进行介绍，基于该单位对此技术多年的研究，针对空间调制型干涉光谱成像仪数据的特点，结合环境与灾害监测预报小卫星星座A星超光谱成像仪的数据，提出了一种针对空间调制型干涉成像光谱仪的数据压缩方法，获得了很好的结果。

关键词 空间调制；干涉成像光谱；数据压缩
中图分类号： TH751 **文献标识码：** A **DOI：** 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)01-0278-05

引 言

干涉型光谱成像仪是一种新型的光学成像探测仪器，是光谱仪和成像仪的结合，近些年来发展十分迅速，我国首个环境与灾害监测预报小卫星和嫦娥一号探月卫星均选用了干涉型光谱成像仪作为其有效载荷。干涉型光谱成像技术从调制方式上可以分为3种形式：时间调制型、空间调制型和时空联合调制型，其中的空间调制型干涉成像光谱仪(spatial modulated imaging Fourier transform spectrometer, SMIFTS)发展最为成熟，上面所说的两个卫星有效载荷均采用空间调制型的方案。环境卫星超光谱成像仪主要技术指标为：空间分辨率为100 m；光谱范围为0.45～0.95 μm；谱段数为>110；量化等级为12 bit；压缩比为1.64∶1。

受数传通道的限制，超光谱成像仪数据需要进行压缩后才能下传，数据压缩质量的好坏，将直接影响反演光谱的质量，关系到对目标所属物质类型的确定[1]，本文将针对空间调制型干涉成像光谱仪获取的数据，结合环境与灾害监测预报小卫星星座超光谱成像仪获得的干涉数据，系统的提出一种针对空间调制型干涉成像光谱技术原理[2,3]的数据压缩技术，并给出相应的结果。

1 空间调制型光谱成像仪技术原理

如图1所示，空间调制型干涉光谱成像仪主要由6个部分组成，前置光学系统、狭缝、干涉仪、傅里叶透镜、柱面镜组件和探测器。

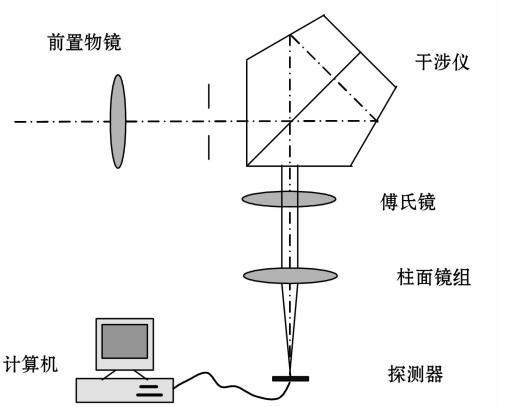

Fig. 1 Spatial modulating fourier transform imaging spectrometer

前置物镜将目标成像在一次像面狭缝上，狭缝位于傅氏

收稿日期： 2009-02-26，**修订日期：** 2009-05-28
基金项目： 国家自然科学基金项目(60532070)资助
作者简介： 黄 旻，1976年生，中国科学院西安光学精密机械研究所副研究员 e-mail：huangmin@opt.ac.cn

镜的前焦面上，狭缝出射的光经干涉仪后被平行的剪切成两束，经过傅里叶透镜扩束后，由柱面镜在一个方向上收集后，在探测器上形成具有一维空间和一维光谱的干涉图，如图 2，由仪器的推扫形成另一维空间图像。

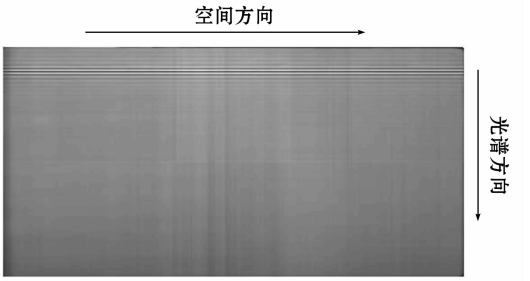

Fig. 2　The interferogram obtained by spatial modulating fourier transform imaging spectrometer

2　数据压缩图像质量评价方法

干涉成像光谱仪获得的数据是间接数据，仪器采集到的是干涉图，如图 2 所示，需要进行一系列复杂的数据反演过程才能获得可以使用的光谱数据，数据压缩过程是在干涉图上进行的，因此，压缩质量的好坏将直接影响获得的光谱图像数据的质量，压缩方法选取十分重要，压缩图像的质量评价方法也同样十分重要。

根据干涉成像光谱仪获取数据的特点，在环境与灾害监测预报小卫星星座超光谱成像仪的工程实现上可从两个方面来评价数据压缩后的图像质量，即在光谱维上引入失真度的评价标准，即相对光谱二次误差(relative spectral quadratic error，RQE)的概念[4]，在空间图像方面，引入了峰值信噪比(PSNR)的概念，下面分别进行介绍。

失真度是用是用复原光谱与原始光谱之间在整个光谱维上的相对偏差来计算，其公式为：

$$\mathrm{RQE}=\frac{\sqrt{\int_0^{0.5}|\hat{S}(\tilde{f})-S(\tilde{f})|^2\mathrm{d}\tilde{f}}}{\int_0^{0.5}S(\tilde{f})\mathrm{d}\tilde{f}} \tag{1}$$

式中 $S(\tilde{f})$ 为原始光谱，$\hat{S}(\tilde{f})$ 经压缩解压缩后重建的光谱，$\tilde{f}=\frac{1}{\lambda f_e}$ 为规一化频率，$0<\tilde{f}<0.5$，λ 为波长(单位为 μm)，f_e 为采样频率。

而峰值信噪比的公式定义为

$$\mathrm{PSNR}=10\log\frac{(512\times256)\times(A-1)^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i)^2} \tag{2}$$

式中：A 为峰值，在环境卫星超光谱成像仪中采用的是 12 bit 量化，因此峰值为 4 095；x 为原始图像；y 为压缩解压缩后重建的图像。512 表示环境卫星超光谱成像仪空间方向有 512 个像元，光谱方向有 256 个像元。在工程实践中，则认为采用上述两个标准可以很好的评价压缩解压缩后的图像质量。

3　基于自回归模型的压缩方法

干涉光谱成像仪的数据压缩技术在国际上还是一个新的研究课题，国内外曾提出一些压缩算法，如：基于分类的算法[5]、各种预测[6]、变换相结合的算法[7]等，法国人还提出了一种基于自回归模型[4]的方法(AR 模型法)，属有损压缩，效果不错，下面将重点介绍(见图 3)。

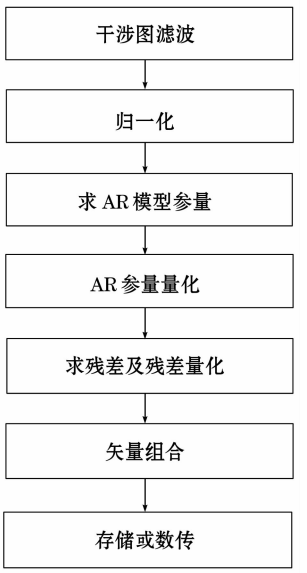

Fig. 3　The flow chart of the AR model of data compression

首先，对干涉图建立参量模型，解算一组表征干涉图的参量。模型化只是表示干涉图的一种方法，用这种方法比用未经处理的样本直接表示的方法要简洁得多，失真随同压缩也相应产生，即在对参量、残差的量化和编码的过程中出现。

图 4 表示对原始的干涉数据进行模型化后的结果，即在干涉图左边调制大的部分不变，因为这部分信号强度大，决定了复原光谱的质量，后面部分用一个中心代替，然后用干涉信号减去这条直线，就可得到参差，参差的幅值很小，用此较少的位数就可以表示。图 4 的(b)就是将参差用比较小的位数表示后叠加的结果，这样就得到了压缩的作用。图 4 的横坐标表示干涉图的点数，纵坐标表示干涉图的幅值。进行仿真试验的结果是：压缩比为 4.8∶1，相对误差(RQE)为 0.69%，压缩结果比较好。

4　基于 DPCM 的压缩方法

基于 AR 模型的数据压缩方法获得的干涉数据压缩结果比较好，但是在工程实施上这种算法计算过程比较复杂，硬件实现的难度比较大，本文将基于本单位对干涉成像光谱技术长期的研究，根据干涉数据的特点，提出一种新的干涉数据的压缩方法，原理十分简单，获得了较好的压缩结果。

环境卫星超光谱成像仪采用的是单边过零的采样方式，光谱方向共有 256 个采样点，零光程差位置为第 28 点。如

图 5所示，其中横坐标为干涉图的点数，纵坐标为灰度值。从干涉图上可以看出，零光程差附近，干涉图的调制度比较大，事实上，零光程差附近的干涉图携带的信息非常丰富，它决定了复原后的光谱曲线的基本形状，其他位置的干涉信息则主要决定复原光谱的细节信息。根据上述特点，提出了一种新的干涉数据压缩方法，可以利用现行工程上的成熟方法。

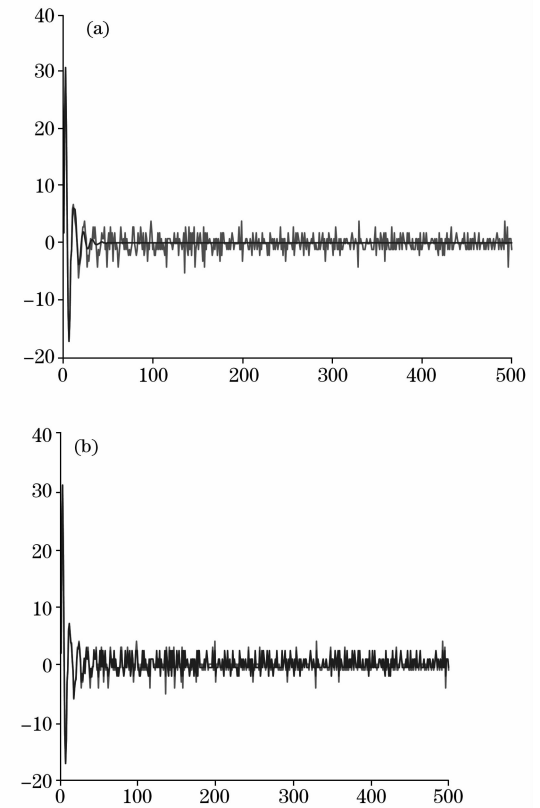

Fig. 4 The result of model (a) and the result of adding noise (b)

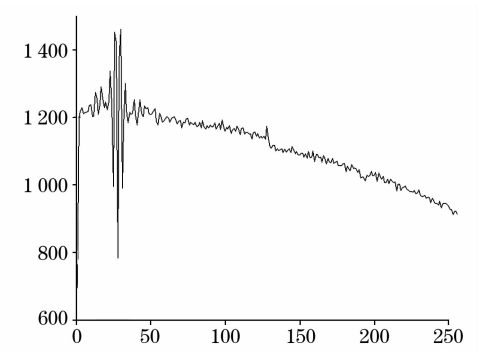

Fig. 5 The interferogram of EDIS

该方法的核心思想是：保持零光程差附近的数据不动(根据环境卫星超光谱成像仪数据特点，单边过零 28 个点，对称选取 56 个点)，对其余的 200 个点采用图像压缩中通用的 DPCM 压缩方法进行 2∶1 压缩，这样，工程实现非常简单，而且硬件实现的可靠性很高。

DPCM 压缩法原理框图如图 6 所示。预测编码是根据相邻像素之间存在相关性。由预测器预测当前编码像素，则得到的预测误差序列就消除了大部分冗余。预测误差的概率分布可用 Laplace 分布来近似。大部分误差集中在零值附近，熵减小，码率得到压缩。DPCM 系统是带反馈的非线性系统，其优化往往分别针对预测器和量化器进行。预测越准，码率得到进一步压缩。通常，根据图像类型和实现复杂度来选择预测模型，根据最小均方准则和“大误差”出现概率最小来选择预测系数。量化器的设计按最小均方误差准则来设计。为保证恢复谱图的质量，零光程差附近 56 个点不做处理，其余 200 个点按照 2∶1 压缩为 6 bit 传输。

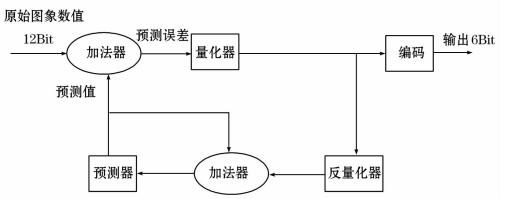

Fig. 6 The principle chart of DPCM

采用该方法进行压缩，最终全压缩比为 1.64∶1，解压缩后复原获得的光谱与未经压缩解压缩的结果相比，RQE＜1%，峰值信噪比也比较高。

以下是压缩解压缩后的结果(图 7)。

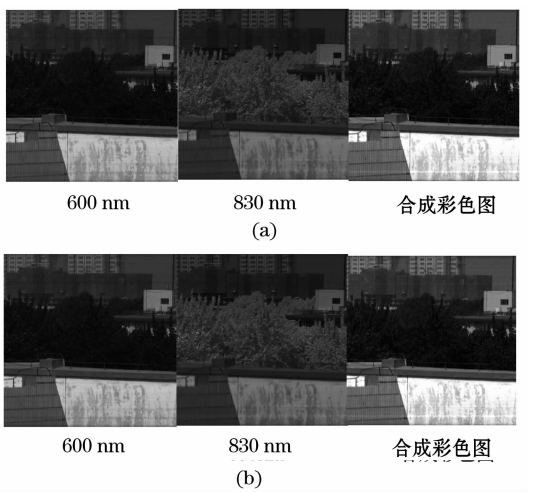

Fig. 7 The picture without compression and with compression

图 7 中(a)为没有经过压缩的数据直接反演获得的图，分别为中心波长在 600 和 830 nm 的单色图以及合成的彩色图；(b)为经过压缩与解压缩后反演获得的图，从图像上很难看出差别。

图 8 为从中提取的某一点的光谱曲线，图中两条曲线为压缩解压缩复原的结果与未经压缩的结果的比较。纵坐标为光谱曲线的幅值，横坐标为波长，单位是 nm。

经过比较，两条曲线的 RQE 为 0.137%。

图 9 为 RQE 分布图，表示平面的点数，图像大小为 512×512 个点，共计有 262 144 个点，纵坐标表示这些点的 RQE(失真度)值。从 RQE 分布图上可以统计出，全部图像

的 RQE 范围为：0.036 2%～1.242 2%，全图平均的 RQE 为 0.155%，图中大于 1%点数共计有 24 个点。压缩图像的峰值信噪比 PSNR 大于 60DB。

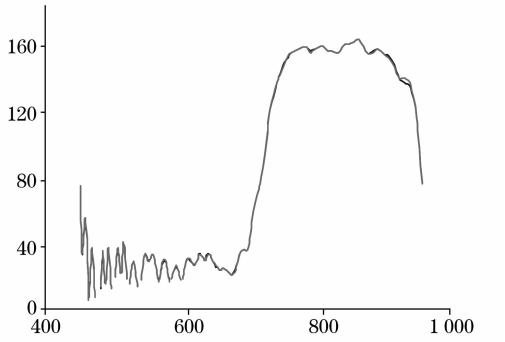

Fig. 8　The spectrum of the point of (175, 271)

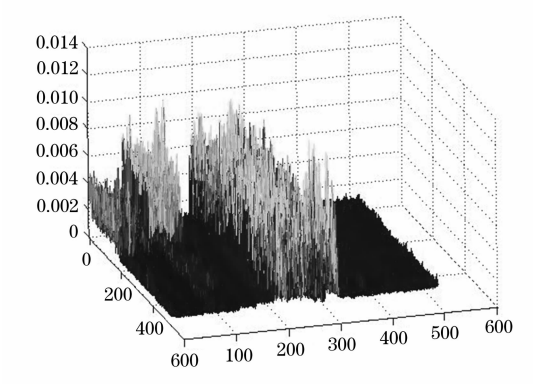

Fig. 9　The distribution chart of the RQE

目前，环境与灾害监测预报小卫星星座超光谱成像仪中采用的就是这种数据压缩方法，已经获得了较好的结果，下面，将给出在轨飞行经过压缩解压缩后的结果。

图 10 就是对环境与灾害监测预报小卫星超光谱分像仪发回的数据进行数据处理后得到的数据立方体，也就是经过压缩解压缩后的结果。图中 x 和 y 坐标表示图像的空间位置，λ 表示波长方向。

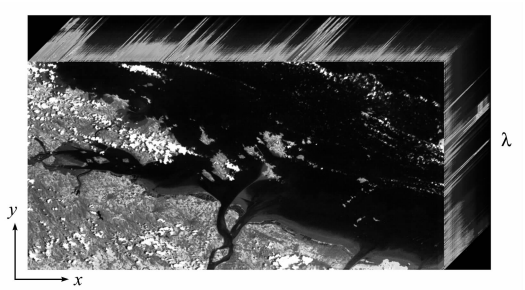

Fig. 10　Hyperspectrum data cube obtained on orbit

5　结　论

干涉型超光谱成像技术是一项新兴的技术，具有很多方面的优势，相对于传统的色散型光谱成像技术，它又带来了数据量大的问题，目前的卫星数据传输的通道不能满足要求，需要很好的解决数据压缩的问题，同时，由于航天任务的特殊性，需要数据压缩具有高可靠性，如何很好的解决这一矛盾，需要进行深入的研究，采用 DPCM 压缩方法可以很好的解决目前的需求，即可以实现压缩要求，又结合了目前航天任务中成熟的技术，易于实现，同时具有较高的可靠性。采用这一压缩技术，目前看来，当目标的反射率较低时，即目标信号较弱时，压缩解压缩后的失真度稍大，在将来的研究中，作者将继续改进优化。

参　考　文　献

[1]　Aiazzi B, Alparone L, Baronti S, et al. Proc. of SPIE, 2002, 4881: 701.
[2]　Rafert J B, Sellar R G. SPIE, 1995, 2480: 410.
[3]　XIANGLI Bin, ZHAO Bao-chang, XUE Ming-qiu(相里斌，赵葆常，薛鸣球). Acta Optica Sinica(光学学报), 1998, 18(1): 16.
[4]　Mailhes Corinne, Vermande Paul, Castanie Francis. J. Optics-Nouvlle Revue D Optique, 1990, 21(3): 121.
[5]　LÜ Qun-bo, XIANGLI Bin(吕群波，相里斌). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2004, 33(6): 68.
[6]　Mielikainen J, Toivanen P. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(12): 2943.
[7]　LÜ Qun-bo, YUAN Yan, XIANGLI Bin(吕群波，袁　艳，相里斌). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2008, 37(3): 573.

Spatially Modulated Fourier Transform Imaging Spectrometer Data Compression Research

HUANG Min[1,2], XIANGLI Bin[1,3], YUAN Yan[4], SHEN Zhong[5], LÜ Qun-bo[1,2], WANG Zhong-hou[1], LIU Xue-bin[1]

1. Laboratory of Spectral Imaging Technique, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
4. Beihang University, Beijing 100083, China
5. Dong Fang Hong Satellite Co. Ltd., Beijing 100094, China

Abstract Fourier transform imaging spectrometer is a new technic, and has been developed very fast in recent ten years. When it is used in satellite, because of the limit by the data transmission, the authors need to compress the original data obtained by the Fourier transform imaging spectrometer, then, the data can be transmitted, and can be incepted on the earth and decompressed. Then the authors can do data process to get spectrum data which can be used by user. Data compression technic used in Fourier transform imaging spectrometer is a new technic, and few papers introduce it at home and abroad. In this paper the authors will give a data compression method, which has been used in EDIS, and achieved a good result.

Keywords Spatial modulation; Fourier transform imaging spectrometer; Data compression

(Received Feb. 26, 2009; accepted May 28, 2009)