

干涉图零光程差位置的确定方法

冯 绚¹, 郭 强^{1*}, 韩昌佩², 邹曜璞²

(1. 国家卫星气象中心, 北京 100081;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外探测与成像重点实验室, 上海 200083)

摘要:风云四号 A 星干涉式大气垂直探测仪在轨运行以来发现,受噪声、采样误差、条纹计数错误等影响,干涉图零光程点会发生定位偏差.干涉条纹平移引起的相位误差与波数成线性关系,对残余相位进行线性回归分析可以得到零光程差位置的偏移量.利用在轨实测数据,应用残余相位方法,分析了零光程点定位偏差校正前后对相位谱及辐射光谱的影响.该方法已经应用于风云四号 A 星干涉式大气垂直探测仪的在轨数据预处理中,并取得了很好的应用效果.

关键词:风云四号 A 星;干涉式大气垂直探测仪;干涉图;零光程差

中图分类号:TP732.2 **文献标识码:**A

Correction method of zero path difference position

FENG Xuan¹, GUO Qiang^{1*}, HAN Chang-Pei², ZOU Yao-Pu²

(1. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS) on board FY-4A is a Michelson interferometer infrared sounder. The interferogram is sampled at discrete points. The zero path difference (ZPD), which is the peak of the interferogram, is not sampled. This effectively shifts the interferogram and adds a linear phase to the spectrum. A linear regression on the residual phase of the calibrated spectrum will reveal the shift. This method has been used in the interferogram signal processing of the GIIRS, and has obtained a better results.

Key words: FY-4A, geostationary interferometric infrared sounder (GIIRS), interferogram, zero path difference (ZPD)

PACS: 42.30.Kq, 42.72.Ai

引言

风云四号 A 星于 2016 年 12 月 11 日成功发射,是我国首颗静止轨道上三轴稳定的定量遥感卫星,搭载了多通道扫描成像辐射计、干涉式大气垂直探测仪、闪电成像仪和空间天气监测仪等多种观测仪器,代表着当今气象卫星最先进水平.风云四号 A 星的成功发射,标志着我国静止轨道气象卫星实现了升级换代,将大幅度提高我国天气预报、气象防灾

减灾、应对气候变化、气候资源开发、生态环境监测和空间天气监测预报能力.

干涉式大气垂直探测仪是风云四号 A 星的主要载荷之一,是国际上第一台在静止轨道上以红外干涉分光方式探测三维大气垂直结构的精密遥感仪器,其核心部分是一个迈克尔逊干涉仪,主要功能是高频率地获取观测地区的大气温、湿度廓线和痕量气体含量,了解和掌握三维大气的动力、热力和组分结构及其变化的信息,为天气预报、气候和环境变化

收稿日期:2017-09-09,修回日期:2017-10-20

基金项目:国家自然科学基金(41275034,91338203)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (41275034,91338203)

作者简介 (Biography): 冯 绚 (1979-),女,河南人,博士,主要从事大气辐射传输、定量遥感和遥感仪器在轨定标方法的理论 and 应用研究.
E-mail: fengxuan@cma.gov.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: guoqiang@cma.gov.cn

Received date: 2016-09-09, revised date: 2017-10-20

预测的业务和科研应用服务.

干涉式大气垂直探测仪的工作波段为 $700 \sim 1130 \text{ cm}^{-1}$ (长波) 和 $1650 \sim 2250 \text{ cm}^{-1}$ (中波), 每个波段对应一个 32×4 像元的探测器. 探测仪采用驻留凝视观测, 对同一目标位置驻留观测的多帧干涉图进行叠加处理, 从而可以有效提高仪器的信噪比. 干涉图叠加必须将每一幅干涉图的零光程差位置对齐, 然后对相同光程差的采样点进行叠加. 理想情况下, 零光程差位置就是干涉图的最大值, 干涉图以零光程为中心左右对称, 但是在实际仪器采样过程中, 由于读出电路噪声、光学噪声、采样延迟等因素, 干涉图难以保证严格对称^[1]. 零光程位置不再是一个采样点, 而是干涉图的中心区域, 从而无法根据干涉图的最大值进行零光程位置的判断^[2]. 非对称的干涉图会有相位偏差, 本文将研究通过相位判断来确定各个干涉图的不同光程差的采样点.

1 探测仪工作原理

典型的迈克尔逊干涉仪分光系统如图 1 所示. 目标辐射经过分束片分成两束, 经定镜和动镜反射后再次通过分束片而互相干涉, 干涉光会聚在红外探测器上, 动镜的运动会造成两束相干光光程差的变化, 继而探测器上会给出干涉强度和光程差之间的关系, 这就是干涉图^[3].

理想情况下, 目标辐射与干涉图为余弦傅里叶变换对^[4]:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} L_v \cos 2\pi v x dv \quad , \quad (1a)$$

$$L_v = \int_{-\infty}^{+\infty} F(x) \cos 2\pi v x dx \quad . \quad (1b)$$

由于光学、电子或采样的影响, 得到的干涉图是有相位偏差的. 入射辐射与测量的干涉图之间事实上为复数傅里叶变换关系:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} L_v \exp(i2\pi v x) dv \quad , \quad (2a)$$

$$L_v = \int_{-\infty}^{+\infty} F(x) \exp(-i2\pi v x) dx \quad . \quad (2b)$$

2 星上辐射定标

根据 Revercomb *et al.*^[5], 对于高光谱分辨率的干涉仪器, 入射光谱辐射 L_v 的干涉图为 $F(x)$, 且有:

$$F(x) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} C'_v \exp(i2\pi v x) dx \quad . \quad (3)$$

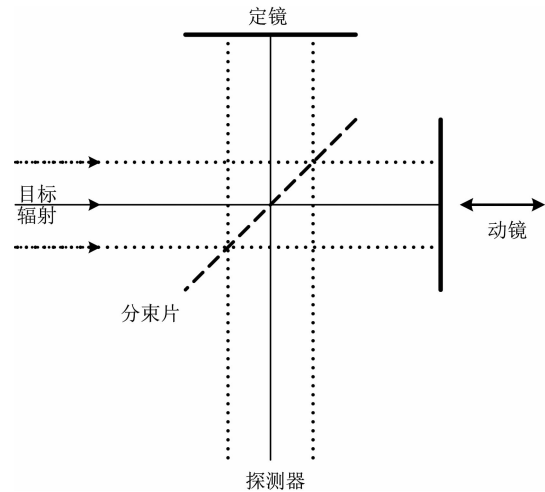


图 1 典型迈克尔逊干涉仪分光系统
Fig. 1 Michelson interferometer

测量的干涉图及其对应的复光谱由两部分组成: 来自辐射源的正常相位和来自仪器本身的异常相位. 尽管来自仪器的辐射可能由多个具有不同相位特征的部分组成, 它们可以被混合作为一项.

因此, 没有经过校正的复光谱为:

$$C'_v = \tilde{F} = r_v \{ L_v + L_v^0 \exp[i\phi^0(v)] \} \exp[i\phi(v)] \quad , \quad (4)$$

式中, x 为光程差; v 为波数; $\phi(v)$ 为仪器的相位响应; $\phi^0(v)$ 为与仪器自身辐射有关的异常相位; r_v 为仪器的响应率; L_v^0 表示来自仪器的辐射偏差; \tilde{F} 表示傅里叶复变换.

在仪器稳定的基本假设下, 利用参考黑体, 采用两点定标公式:

$$C'_v - C'_{cv} = r_v [L_v - B_v(T_c)] \exp[i\phi(v)] \quad , \quad (5)$$

$$C'_{hv} - C'_{cv} = r_v [B_v(T_h) - B_v(T_c)] \exp[i\phi(v)] \quad , \quad (6)$$

式中, B_v 是黑体辐射值, h, c 分别表示高温、低温黑体.

根据式(5-6), 可以得到基本的定标公式:

$$L_v = \text{Re} \left[\frac{(C'_v - C'_{cv}) / (C'_{hv} - C'_{cv})}{[B_v(T_h) - B_v(T_c)] + B_v(T_c)} \right] \quad . \quad (7)$$

3 零光程差位置确定

通常假定辐射定标中所用到的黑体、冷空及地球视场测量具有相同的相位关系, 即以相同间隔对所有测量进行采样, 而采样间隔用参考激光脉冲作为外时钟来确定. 式(7)的比值形式消除了复光谱

的相位,因此在轨辐射定标不需要进行专门的相位校正^[6].但是,如果对同一目标的干涉图叠加时,相同光程差的采样点没有对齐,则反演得到的光谱数据将会出现错误.

根据干涉仪原理,双边采样干涉图是以零光程差采样点为中心,左右两边对称的波形图.图 2 给出了干涉式大气垂直探测仪实际在轨运行以来得到的几种干涉图.其中,图 2(a)为正常的干涉图,幅值只有一个最大值点,即为零光程差位置;图 2(b)由于相邻峰值的幅值比较接近,在噪声影响下,邻峰的幅值(3307)超过了零光程差位置的幅值(3288);图 2(c)在零光程差位置附近出现了“平头”现象,即由于采样误差,使得这两个采样点的幅值相同;图 2(d)为同一个驻留位置的两幅干涉图,其中实线为正确的干涉图,由于干涉条纹计数错误,使得虚线所示干涉图的零光程差位置发生较大偏移.

干涉图叠加是将每一幅干涉图的零光程差位置对齐,然后对相同光程差的采样点进行叠加.如果同一驻留位置的干涉图出现如图 2(a)~图 2(d)的问题,则会造成零光程差位置定位错误,从而引起干涉图叠加错误,并直接导致光谱变换错误.

根据式(2b),测量的干涉图与入射辐射为复数傅里叶变换关系,

L_v 一般为复数,可以表示为:

$$L_v = \text{Re}(v) + i\text{Im}(v) \quad , \quad (8)$$

相位 θ_v 为:

$$\theta_v = \arctan \frac{\text{Im}(v)}{\text{Re}(v)} \quad , \quad (9)$$

如果干涉图发生位置平移 a ,则有^[7]:

$$L_v e^{-2\pi i v a} = \tilde{F}\{F(x - a)\} \quad . \quad (10)$$

根据式(2b),以干涉图的最大值为中心进行复数傅里叶变换,对得到的光谱值根据式(7)进行星上辐射定标,然后根据式(9)分析其残余相位.由于干涉条纹平移引起的相位误差与波数是线性关系,对残余相位进行线性回归分析就可以找到干涉条纹相对于零光程差位置的偏移量 a .

4 结果与分析

图 3(a-d)给出了由于零光程点定位偏差引起的干涉图及光谱图错误结果.图 3(a)为冷空和地球目标的干涉图,图中用黑点标出了零光程差点的正确位置.对于冷空干涉图,在噪声影响下,邻峰的幅值超过了零光程差位置的幅值,导致零光程点定位

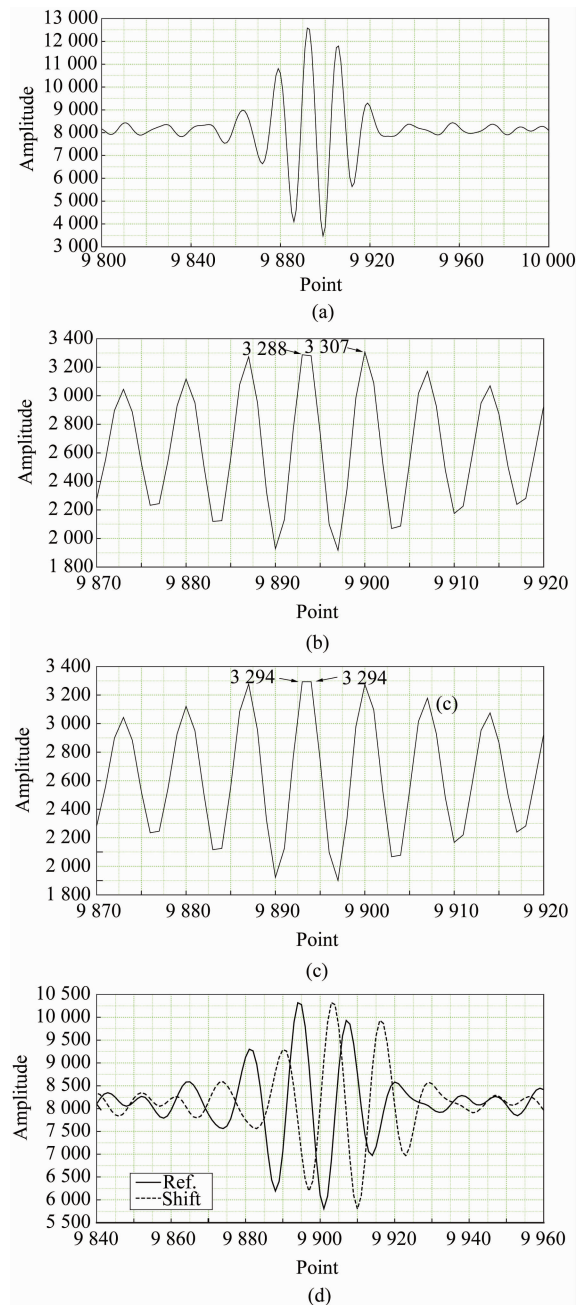


图 2 干涉式大气垂直探测仪实际测量的干涉图
Fig.2 Interferograms from GIIRS

偏差.图 3(b)为地球目标干涉图减去冷空背景后得到的干涉图,可以看到,由于冷空干涉图的零光程差点定位偏差,导致两者相减后得到的干涉图不对称.对图 3(b)进行傅里叶变换,根据式(9)计算相位谱,如图 3(c)所示;并得到经过辐射定标后的光谱图,如图 3(d)所示.

图 4(a-d)给出了相对于图 3(a-d)的正确结果.图 4(a)为冷空和地球目标的干涉图,图中用黑点标出了零光程差点的正确位置.如图 4(b)所示,由于

冷空和地球目标干涉图的零光程差点均定位准确, 两者相减后得到的干涉图左右基本对称. 对图4(b)进行傅里叶变换, 根据式(9)计算相位谱, 如图4(c)所示; 并得到经过辐射定标后的光谱图, 如图4(d)所示.

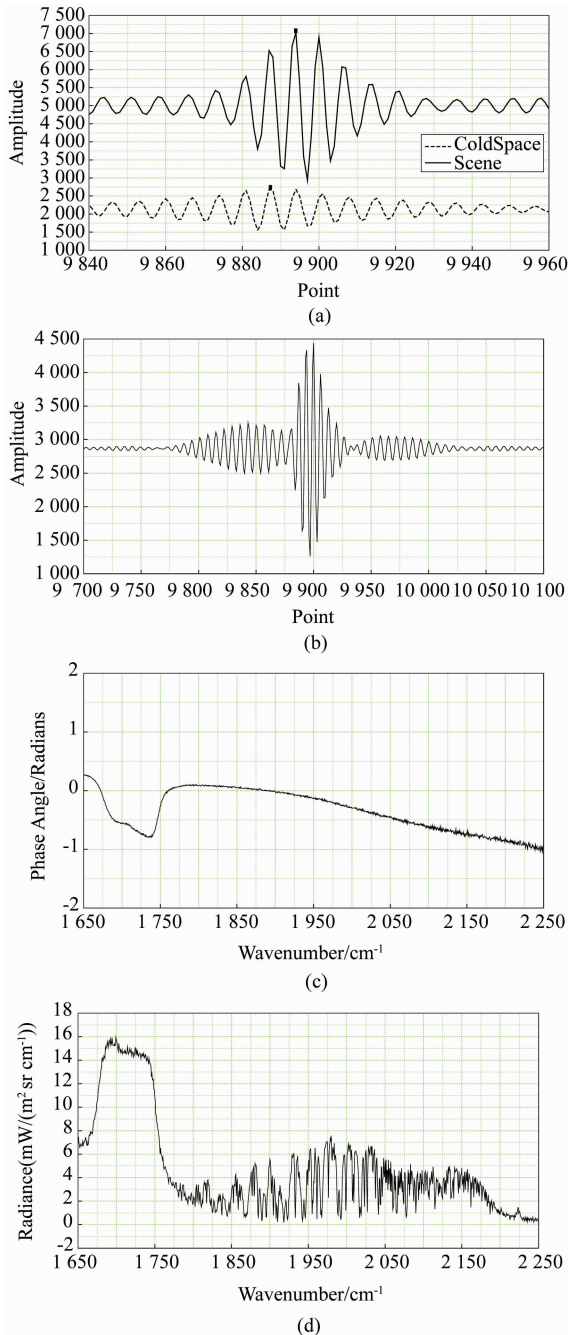


图3 零光程差点定位错误的干涉图
Fig. 3 Interferograms from wrong ZPD

对比图3(c)和图4(c)可以发现, 通过校正零光程位置, 图3(c)中相位较大的部分在图4(c)已经不存在, 图4(c)的相位谱比较平缓, 且基本在零

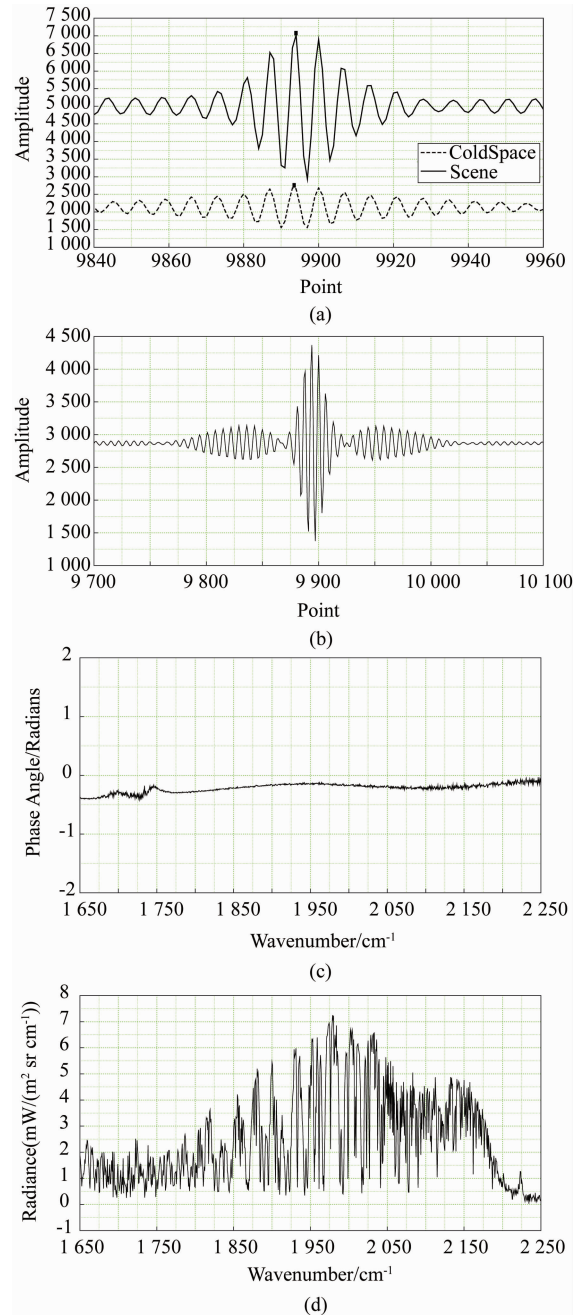


图4 零光程差点定位校正后的干涉图
Fig. 4 Interferograms from calibrated ZPD

值附近. 进一步, 对比图3(d)和图4(d)发现, 图3(d)中1650~1750 cm⁻¹的辐射光谱值异常突起, 通过校正零光程位置, 得到如图4(d)所示的正常辐射光谱值.

5 结论

干涉图零光程差点的定位偏差会造成同一驻留位置的干涉图叠加错误, 同时会在辐射定标过程中引入额外的残余相位, 直接导致光谱结果错误. 由于 (下转第804页)