

文章编号: 1672-8785(2015)11-0007-06

被动式红外光谱仪标定方法的对比研究

孙 美¹ 许 毅¹ 陈艳虹² 李 燕^{2*}

(1. 西安近代化学研究所, 陕西西安 710065;

2. 南京理工大学化工学院, 江苏南京 210094)

摘要: 采用加拿大 BOMEN 公司生产的 MR-254 型傅里叶变换红外 (Fourier Transform InfraRed, FTIR) 光谱仪, 探讨了标定方法对被动式红外光谱仪辐射测量精度的影响。以温度范围为 50 ~ 1000 °C 的高温黑体和温度范围为 300 ~ 1700 °C 的超高温黑体作为标准辐射体, 分别采用线性和非线性多点校准法对光谱仪进行了标定。结果表明, 采用多点非线性校准法的校准结果更加精确, 其校准后的辐射谱与理论辐射谱之间的平均相对偏差为 0.6%。

关键词: 傅里叶变换红外光谱仪; 标定; 黑体; 线性; 非线性

中图分类号: O6571.3 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.11.002

Study of Calibration Methods of Passive FTIR Spectrometer

SUN Mei¹, XU Yi¹, CHEN Yan-hong², LI Yan^{2*}

(1. Institute of Xi'an Modern Chemistry, Xi'an 710065, China; 2. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The influence of calibration methods on the radiation measurement precision of a passive Fourier Transform InfraRed (FTIR) spectrometer is studied by an MR-254 FTIR spectrometer from BOMEN Corp.. Taking a high temperature blackbody in the temperature range 50 °C to 1000 °C and a ultra high temperature blackbody in the temperature range 300 °C to 1700 °C as the standard radiators, the spectrometer is calibrated by using linear and nonlinear multipoint calibration methods respectively. The results show that the nonlinear multipoint calibration method is more accurate than the linear multipoint calibration method. The average relative difference between the calibrated radiation spectra and the theoretical radiation spectra is within 0.6%.

Key words: FTIR spectrometer; calibration; blackbody; linear; non-linear

0 引言

由于具有通量高、分辨率高、不干扰流场以及可进行非接触式遥感测量等优点, 被动式

FTIR 光谱仪在各种红外辐射源辐射特性的测量中得到了广泛应用^[1,2]。但 FTIR 光谱仪的探测器对红外辐射源的响应不规律, 在每个波长处仪器的响应函数也不同^[3-5], 导致测得的红外光

收稿日期: 2015-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21207066)

作者简介: 孙美 (1962-), 女, 陕西人, 高级工程师, 主要从事固体推进剂的特征信号检测与研究工作。

* 通讯作者: 李燕 (1975-), 女, 山西人, 副教授, 博士, 主要从事光谱分析和红外探测技术等方面的研究。

E-mail: yanli@njust.edu.cn

谱无法用于辐射亮度和辐射强度的定量分析，也使得人们更加无法获得复杂辐射源在各个波段的辐射能量分布。因此，为了使 FTIR 光谱仪能够获得更加准确的高灵敏度红外辐射测量数据，不仅需要在每次试验前都对被动式 FTIR 光谱仪进行标定试验^[6-8]，而且还需要提出一种更加合理的标定方法。我们以 MR-254 型光谱仪为例，对不同温度下的标准黑体源进行了红外光谱测量，并提出了一种采用多点线性和非线性校准法对光谱数据进行标定的方法。通过对标定方法及标定结果进行对比，可以确定较为合适的标定方法。本文为该仪器在后续辐射源辐射特性的精确测试提供了重要的参考价值。

1 FTIR 光谱仪的校准原理

1.1 校准的理论基础

理想黑体的辐射亮度可由普朗克函数给出：

$$L(\lambda) = C_1 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) \right]^{-1} \quad (1)$$

式中， C_1 为第一辐射常数， C_2 为第二辐射常数。

校准过程采用标准的绝对黑体测量光谱仪的探测器对黑体辐射的响应特性。理想的 FTIR 光谱仪应该是一种线性仪器，即光谱仪每个通道的测量信号都与探测器测得的光谱辐射功率成正比。在这种情况下，可以采用两点或多点线性校准方法。但由于在外场测试过程中，地物背景变化复杂，光谱仪在各个波段的辐射特性往往不是线性变化的，因此无法对光谱进行全波段线性校准，而应采用多点非线性校准方法。

1.2 线性校准

当光谱仪工作时，探测器探测到的光谱辐射功率来自于目标辐射、背景辐射以及仪器自身的辐射，即探测器探测到的辐射亮度 $L_m(\lambda)$ 由以下三部分构成：

$$L_m(\lambda) = K(\lambda) \cdot [L_o(\lambda) + L_i(\lambda)] + L_{bk}(\lambda) \quad (2)$$

式中， $K(\lambda)$ 为光谱仪的光谱响应函数； $L_o(\lambda)$ 为目标的光谱辐射亮度； $L_{bk}(\lambda)$ 为背景的光谱辐射亮度； $L_i(\lambda)$ 为仪器自身的光谱辐射亮度。

对于线性响应的仪器，扣除仪器自身的辐射以及背景辐射后，探测器探测到的辐射与目标辐射之间存在着线性关系^[9,10]，即仪器的光谱响应函数 $K(\lambda)$ 为

$$K(\lambda) = L_{m,0}(\lambda) / L_o(\lambda) \quad (3)$$

式中，

$$L_{m,0} = L_m(\lambda) - K(\lambda) \cdot L_i(\lambda) - L_{bk}(\lambda) \quad (4)$$

则校准后的目标辐射亮度为

$$L_e = K(\lambda) \cdot L_{m,0}(\lambda) \quad (5)$$

如果探测器在各个波段的响应相同，则可在全波段进行线性校准；如果探测器的响应分波段而异，则需要对各个波段分别进行校准。在标定过程中，利用黑体作为已知辐射源，测定不同温度下黑体的辐射亮度 $L_m(\lambda)$ ，此时即可得到仪器的光谱响应函数 $K(\lambda)$ 。根据探测器的响应特点，至少需要测量两个或两个以上不同温度下黑体的光谱辐射亮度（分别对应于两点校准和多点校准）。

1.3 非线性校准

一般说来，FTIR 光谱仪的探测器几乎都是非线性响应的，其探测到的辐射与每个光谱通道的像元信号之间不成正比关系^[11]，因此需要进行非线性校准^[6]。我们可以将测得的光谱信号表示成一个非线性函数：

$$\begin{aligned} L_m(\lambda) &= Q(\lambda) \cdot [L_o(\lambda) + L_i(\lambda)]^2 + K(\lambda) \\ &\times [L_o(\lambda) + L_i(\lambda)] + L_{bk}(\lambda) \end{aligned} \quad (6)$$

式中， $Q(\lambda)$ 为仪器的非线性响应函数； $K(\lambda)$ 为仪器的线性响应函数。

测量黑体在多个温度下的辐射亮度 $L_m(\lambda)$ ，然后利用最小二乘法即可得到仪器的非线性响应函数 $Q(\lambda)$ 和线性响应函数 $K(\lambda)$ 。这样，校准后的目标辐射亮度为

$$\begin{aligned} L_e &= \frac{-K(\lambda) + \sqrt{K^2(\lambda) + 4Q(\lambda) \cdot L_m(\lambda)}}{2Q(\lambda)} \\ &- L_i(\lambda) - L_{bk}(\lambda) \end{aligned} \quad (7)$$

2 实验部分

2.1 实验装置

本文采用加拿大 BOMEN 公司生产的 MR-254 型 FTIR 光谱仪, 其探测器为工作波段为 1800 ~ 4500 cm⁻¹ 的液氮制冷型 InSb 探测器。为了满足远距离目标的需求, 选用视场角为 4.9 mrad 的窄角度望远镜。图 1 为 MR-254 型 FTIR 光谱仪的外观图。

所用高温黑体为美国 Barnes Engineering 公司生产的 11-210-1 型标准绝对黑体, 其温度变



图 1 MR-254 型 FTIR 光谱仪的外观图



(a) 50~1000°C 黑体



(b) 300~1700°C 黑体

图 2 黑体炉的外观图

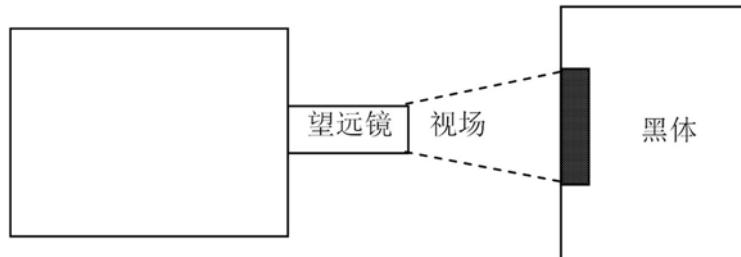


图 3 标定过程中光谱仪与黑体的位置关系

化范围为 50 ~ 1000 °C。所用超高温黑体为美国 Mikron 公司生产的 MIKRON330 型黑体, 其温度变化范围为 300 ~ 1700 °C, 孔径为 25 mm。图 2 为这两种黑体的外观照片。

2.2 实验方法

考虑到空气吸收的影响, 在校准过程中始终将黑体和光谱仪放置在近距离上, 并使黑体辐射充满仪器视场, 即把黑体放置在仪器探测器的前方, 如图 3 所示。FTIR 光谱仪的光谱分辨率设置为 4 cm⁻¹, 每条光谱的扫描次数为 32 次。

对于高温黑体, 将其温度调节在 100 ~ 1000 °C 之间, 并每隔 100 °C 采集一张谱图; 对于超高温黑体, 将其温度调节在 500 ~ 1600 °C 之间, 并每隔 100 °C 采集一张谱图。

3 结果与讨论

3.1 校准结果分析

3.1.1 温度范围为 100 ~ 1000 °C 时的校准结果

我们测量了黑体温度分别为 100 ℃、200 ℃、300 ℃、400 ℃、500 ℃、600 ℃、700 ℃、800 ℃、900 ℃ 和 1000 ℃ 时的辐射谱，然后将这些辐射谱用于多点线性和非线性校准，并用温度为 550 ℃ 的黑体的辐射谱来检验校准结果。

图 4 和图 5 所示分别为经过线性校准和非线性校准后得到的黑体辐射谱。可以看出，两者

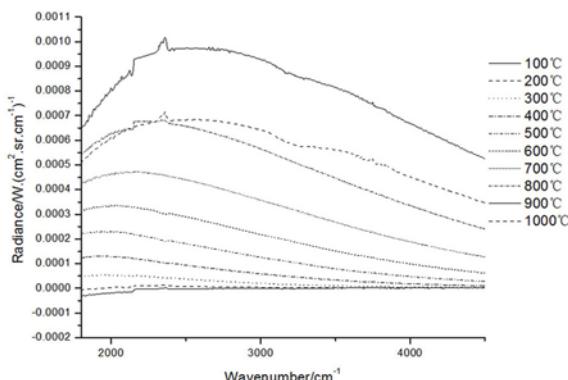


图 4 经线性校准后的黑体辐射谱 (100 ~ 1000 ℃)

之间并无明显区别。将仪器测得的黑体辐射谱图扣除背景后与相应温度下的黑体理论辐射谱数据一起代入式(2)，即可分别得到 InSb 探测器的线性和非线性校准函数。图 6 和图 7 所示分别为经过(非)线性校准后得到的 550 ℃ 黑体的温度曲线和辐射谱。

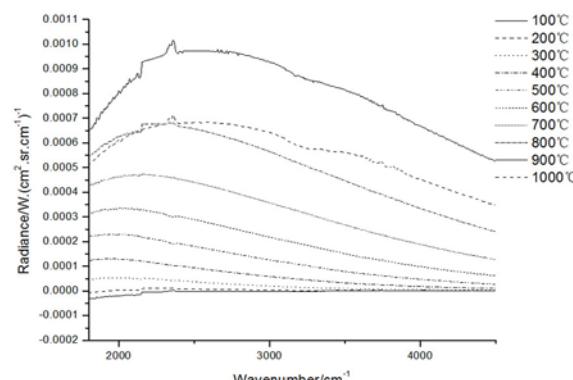


图 5 经非线性校准后的黑体辐射谱

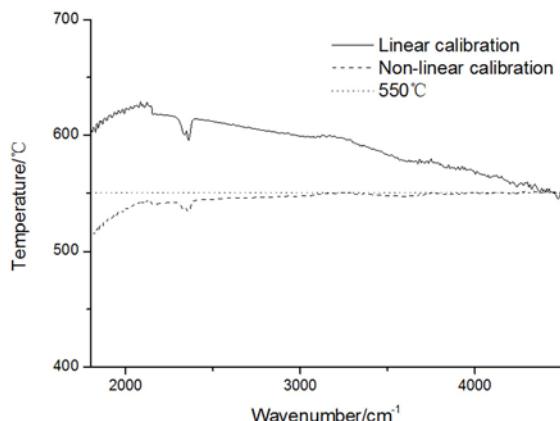


图 6 校准后的黑体温度曲线 (550 ℃)

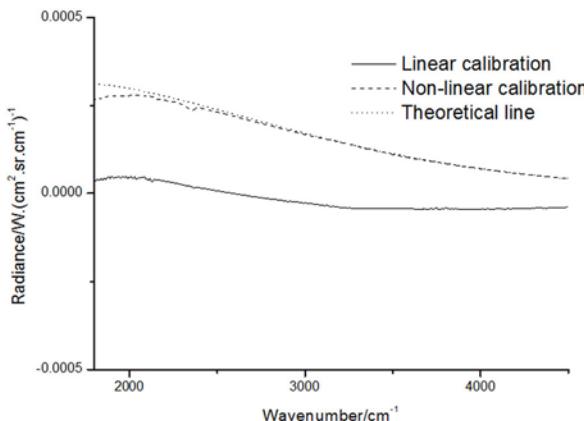


图 7 校准后的黑体辐射谱 (550 ℃)

从图 6 和图 7 中可以看出，在校准前，由于探测器的响应在各个波段并不相同，测量谱与理论谱之间相差很大，因此未校准的测量谱无法用于定性和定量分析。而上述线性校准法也会出现一定的误差。通过对比可以看到，采用非线性校准法得到的谱图比采用线性校准法得到的要精确，其数据也更加可靠。从图 6 中可以明显看出，校准后的温度曲线与真实温度曲线非常接近，表明多点非线性校准法比多点线性校准法更加准确、可靠。

3.1.2 温度范围为 500 ~ 1600 ℃ 时的校准结果

我们测量了黑体温度分别为 500 ℃、600 ℃、800 ℃、900 ℃、1000 ℃、1100 ℃、1300 ℃、1400 ℃、1500 ℃ 和 1600 ℃ 时的辐射谱，然后将这些辐射谱用于多点线性和非线性校准，并用温度为 1200 ℃ 的黑体的辐射谱来检验校准结果。图 8 和图 9 所示分别为经过线性校准和非线性校准后的黑体辐射谱。图 10 和图 11 所示分别为经过(非)线性校准后得到的 550 ℃ 黑体的温度曲线和辐射谱。

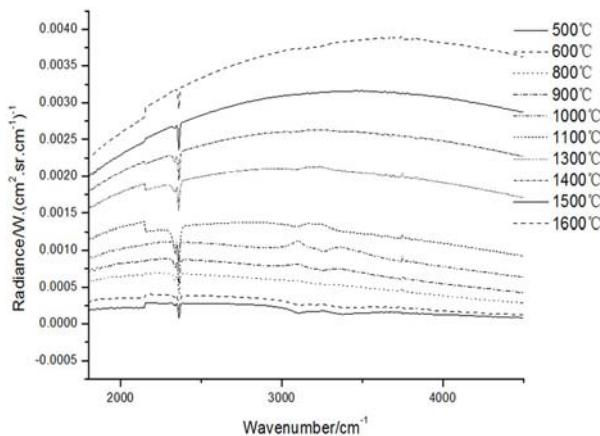


图 8 经过线性校准后的黑体辐射谱 (500 ~ 1600 °C)

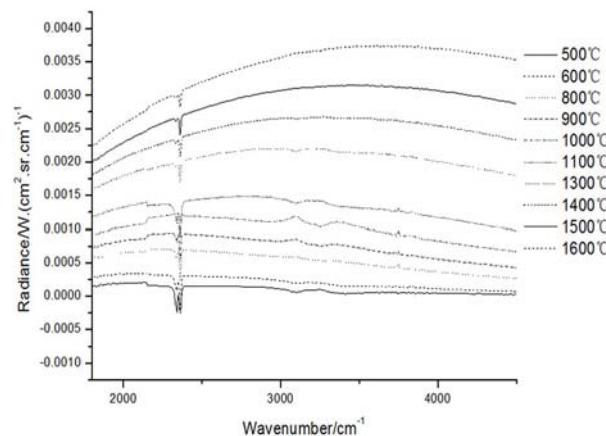


图 9 经过非线性校准后的黑体辐射谱

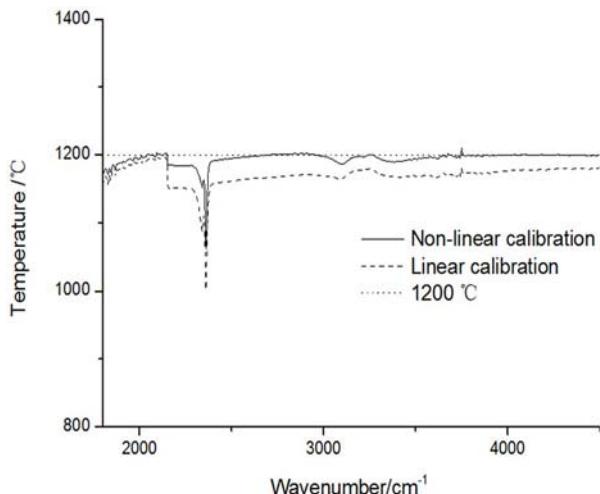


图 10 经过非线性校准后 1200 °C 黑体的温度曲线

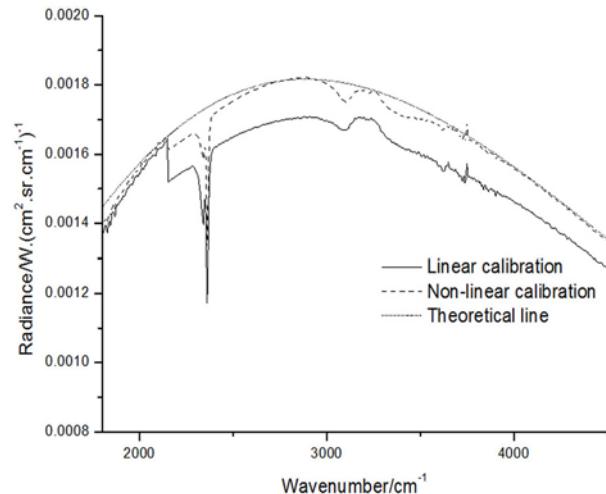


图 11 经过非线性校准后 1200 °C 黑体的辐射谱

下面比较一下高温黑体光谱辐射的两种校准方法。从图 11 中可以明显看到，基于非线性校准的辐射谱能够较好地表征红外光谱辐射特性。标定后，黑体辐射谱的杂峰相对较少，与黑体的理论普朗克辐射谱很接近，且与理论辐射谱之间的平均相对偏差集中在 0.6% 附近，其最大偏差不超过 1.0% (见图 12)。而线性校准法在长波段与理论谱之间存在一定的误差。而非线性校准法相对减少了因大气中水、二氧化碳等气体的吸收峰引起的数据误差，同时也减少了由于探测器在各个波段的响应不同而带来的非线性误差。因此，对于 MR-254 型 FTIR 光谱仪，采用多点非线性校准方法可以更好地消除由仪器响应不规律引起的非线性误差，从而实现辐

射源辐射特性的准确测试。

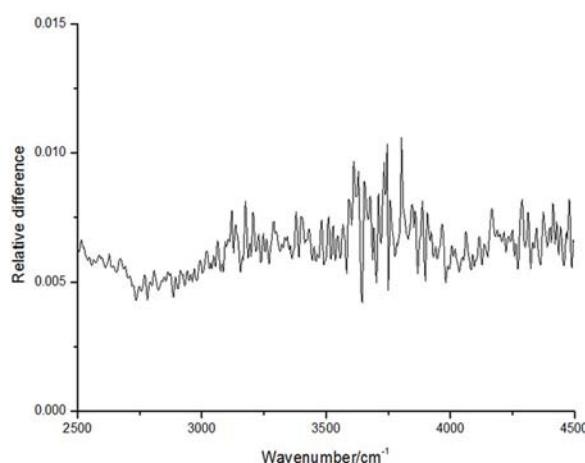


图 12 相对偏差

4 结束语

在利用被动式 FTIR 光谱仪测试辐射特性时, 必须对光谱仪的标定方法进行系统研究, 以找出合适的标定方法。试验结果表明, 对于 MR-254 型 FTIR 光谱仪, 采用多点非线性标定方法能够准确、高效地校准 FTIR 光谱仪。以温度分别为 550 ℃ 和 1200 ℃ 的黑体辐射为例, 经过多点非线性标定后, 实测的温度曲线和辐射谱更接近于理论谱线, 而且经过非线性校准后的辐射谱与理论辐射谱之间的相对偏差不超过 1.0%。该结果对后续高温辐射对象的测定具有重要的理论意义。

参考文献

- [1] Edgar Flores, Klaus Schafer, John Black, et al. Remote Sensing of Aircraft Exhaust Temperature and Composition by Passive Fourier Transform Infrared (FTIR) [C]. SPIE, 2007, **6745**: 67451Q.
- [2] 罗明东, 吉洪湖, 黄伟, 等. 用 FTIR 光谱仪测量排气系统中红外光谱辐射强度的方法 [J]. 航空动力学报, 2007, **22**(9): 1423–1429.
- [3] 张黎明, 张琳, 李燕, 等. 被动式遥感 FTIR 测量时的仪器响应函数校正 [J]. 光谱学与光谱分析, 2006, **26**(1): 45–46.
- [4] 韩维敏, 刘红平. 主动遥测大气成分红外探测器非线性校正方法 [J]. 核电子学与探测技术, 2013, **33**(6): 778–781.
- [5] 罗明东, 桑建华, 黄伟, 等. FTIR 光谱仪 8 ~ 14 μm 红外波段校准方法及测试应用 [J]. 测控技术, 2013, **32**(Z): 171–175.
- [6] 冯明春, 徐亮, 高闽光, 等. 傅里叶变换红外光谱辐射校准方法的研究 [J]. 红外技术, 2012, **34**(6): 366–370.
- [7] 童晶晶, 刘文清, 高闽光, 等. 基于机载 FTIR 的辐射校准研究 [J]. 红外, 2010, **31**(12): 12–15.
- [8] 龚忠清, 孙晓兵, 张莽, 等. 偏振傅里叶变换红外光谱仪校准研究 [J]. 量子电子学报, 2011, **28**(2): 142–146.
- [9] 张建萍, 杨词银. 红外目标模拟器辐射校准方法的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2013, **34**(9): 2045–2050.
- [10] 张天舒, 刘文清, 高闽光, 等. 傅立叶变换红外光谱仪复数光谱误差分析及辐射校准方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2006, **26**(3): 430–433.
- [11] 刘志明, 高闽光, 刘文清, 等. 傅里叶变换红外光谱(FTIR)非线性多点校准方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, **28**(9): 2077–2080.

(上接第 6 页)

- [17] 蒋德明, 董超华. 大气廓线物理反演的最优化方法进展 [J]. 地球科学进展, 2010(02): 133–139.
- [18] Smith W L, Feltz W F, Knuteson R O, et al. The Retrieval of Planetary Boundary Layer Structure Using Ground-based Infrared Spectral Radiance Measurements[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1999, **16**(2-3): 323–333.
- [19] Turner D D, Löhnert U. Information Content and Uncertainties in Thermodynamic Profiles and Liquid Cloud Properties Retrieved from the Ground-Based Atmospheric Emitted Radiance Interferome-

- ter (AERI)[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014, **53**(3): 752–771.
- [20] 李俊, 曾庆存. 晴空时大气红外遥感及其反演问题研究 II. 反演试验研究 [J]. 大气科学, 1997(02): 87–95.
- [21] Microphysical Properties of Single and Mixed-phase Arctic Clouds Derived from Ground-based AERI Observations [D]. University of Wisconsin-Madison, 2003.
- [22] K. Ebelt E O A H. Combining Ground-based with Satellite-based Measurements in the Atmospheric State Retrieval: Assessment of the Information Content [J]. Journal of Geophysical Research, 2013, **118**(13): 6940–6956.