

文章编号: 1672-8785(2019)06-0018-09

红外大气垂直探测通道优选方法的发展

宋 慈^{1,2} 尹 球^{3,4} 谢亚楠¹

(1. 上海大学通信与信息工程学院, 上海 200444;

2. 中原工学院理学院, 河南 郑州 450007;

3. 上海市气象局, 上海 200030;

4. 中国气象局气象卫星用户办公室, 上海 200030)

摘 要: 总结了红外大气探测技术从滤光片式、光栅式到干涉式, 从多光谱到高光谱的发展历程, 阐述了探测通道优选的必要性。就国内外学者在大气垂直探测通道优选方面所做的工作进行了系统分析, 包括基于信息熵的方法、基于权函数矩阵的方法和基于误差矢量的方法。从数学模型和物理含义角度分析了各方法的原理、特点及发挥的作用, 比较了各方法的差异和优缺点。该研究可为红外大气垂直探测通道优选方法的合理选用提供支持, 同时为红外大气垂直探测通道优选方法的进一步发展奠定基础。随着我国 FY-4A 静止气象卫星及 FY-3D 极轨气象卫星的发射, 本文结果将为我国风云(FY)卫星红外高光谱大气垂直探测数据应用以及仪器的设计和发展提供支持, 同时也为充分发挥我国风云(FY)气象卫星红外高光谱大气垂直探测技术的应用效益添砖加瓦。

关键词: 通道优选; 红外高光谱; 大气垂直探测; 信息熵; 雅可比矩阵; 误差矢量

中图分类号: P4 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.06.004

Development of Channel Selection Methods for Infrared Atmospheric Vertical Sounding

SONG Ci^{1,2}, YIN Qiu^{3,4}, XIE Ya-nan¹

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. College of Science, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China;

3. Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai 200030, China;

4. User Office of Meteorological Satellites, China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China)

Abstract: The development process of infrared atmospheric sounding technology from filter type, grating type to interference type, from multi-spectrum to hyper-spectrum is summarized, and the necessity of optimal channel selection is expounded. Domestic and foreign scholars have done a lot of work on channel selection of

收稿日期: 2019-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(11701595); 中国气象局专项业务项目预测预报业务(2200508)

作者简介: 宋慈(1987-), 女, 河南安阳人, 博士后, 讲师, 主要从事遥感信息处理与应用、遥感机理与辐射传输等方面的研究。

*通讯作者: E-mail: yin_qiu@cma.gov.cn

atmospheric vertical detection, including methods based on information entropy, Jacobi and error vector, which is summarized systematically in the paper. Furthermore, the principles, characteristics and application of each method are analyzed from the view of mathematical model and physical implication, and the differences, advantages and disadvantages of various methods are compared, which provides supports for the reasonable choice of channel selection methods as well as lays foundation for the further development of channel selection methods for infrared atmospheric vertical sounding. With the launch of FY-4A geostationary meteorological satellite and FY-3D polar orbit meteorological satellite in China, the result will provide support for the data application of infrared hyperspectral atmospheric vertical sounding, instrument design and development of FY satellites in China. At the same time, it also contributes to the application of FY meteorological satellite's infrared hyperspectral atmospheric vertical sounding in China.

Key words: channel selection; infrared hyperspectral; atmospheric vertical sounding; information entropy; Jacobi matrix; error vector

0 引言

卫星遥感具有覆盖范围广、频次多、时效快的特点,可以获得长时间序列、连续的全球范围观测数据。卫星红外大气垂直探测是获得晴空和云上大气温湿廓线的重要手段,已广泛应用于全球和区域三维温湿结构反演及数值天气预报业务。

卫星红外大气垂直探测技术经历了从滤光片式到光栅/干涉式的发展,探测通道从几十个增加到上千乃至几千个。对于滤光片式几十个通道的大气垂直探测仪(称为红外大气垂直探测分光计),在其设计时需要考虑如何在有限的通道数量下,通过具体探测通道的优选,获得相对较完整、较准确的大气垂直廓线信息。对于光栅/干涉式上千乃至几千个通道的大气垂直探测仪(称为红外高光谱大气垂直探测仪),由于其探测通道连续分布,获得的大气信息相比于红外大气垂直探测分光计丰富了很多。但是由于通道密集,若直接使用全部数据,通道之间的强相关性会导致严重的大气参数反演不稳定问题,使反演结果无效。因此,必须在数据使用之前,进行通道优选,在保持数据包含的大气信息不损失或微小损失的前提下,尽可能减小通道之间的相关性,从而使红外高光谱的优势能够实际发挥。红外高光谱大气垂直探测仪数据通道优选的另一个需求是由于其数据量太大,数据处理(信息反演或模式直接同化应用)的难度太大、成本过高、效率

低下,且数据传输和存储资源要求高,不利于业务应用。

总之,无论对于几十个通道的红外大气垂直探测,还是上千乃至几千个通道的红外大气垂直探测,探测通道优选都是一个必须面对的重要问题。其中,对于红外高光谱大气垂直探测仪数据应用,通道优选问题更为突出。

我国于 2016 年 12 月成功发射了 FY-4A 静止气象卫星,在国际上首次装载了静止轨道红外高光谱大气垂直探测仪,并于 2017 年 11 月成功发射了 FY-3D 极轨气象卫星。其装载的红外高光谱大气垂直探测仪是继美国和欧洲之后,第三个在极轨卫星上装载的红外高光谱大气垂直探测仪。用足、用好红外高光谱大气垂直探测数据,是气象遥感科研和业务面临的重要而迫切的需求。

本文拟在系统调研国内外红外大气垂直探测技术发展、各种通道优选方法及其应用情况的基础上,就各种通道优选方法的数学物理特点、优势和不足进行全面的总结和分析比较,为红外大气垂直探测通道优选方法的合理选用提供支持,为红外大气垂直探测通道优选方法的进一步发展奠定基础,为充分发挥我国风云(FY)气象卫星红外高光谱大气垂直探测技术的应用效益添砖加瓦。

1 红外大气垂直探测技术

从 20 世纪 60 年代开始,利用美国的滤光片式大气探测仪 VTPR/ITOS 卫星系列能获得

星下点晴空天气时的大气温度垂直分布。70 年代末,业务垂直探测器(TIROS-N Operational Vertical Sounder, TOVS)包括高分辨率红外探测仪(High Resolution Infrared Sounder, HIRS)、微波探测仪(Microwave Sounding Unit, MSU)和平流层探测仪(Stratospheric Sounding Unit, SSU),有 27 个光谱通道,以 HIRS/2 红外辐射探测仪为主探测器,实现了从定性遥感到定量水文参数被动遥感的质的转变,并开始为业务天气预报提供全球温、湿廓线资料。到 90 年代末,改进型的 TOVS 探测系统(Advanced TOVS, ATOVS)包括 AMSU-A、AMSU-B 和 HIRS,共 40 个通道,其携带的红外探测仪 HIRS/3 是 HIRS/2 的改进型,大气温、湿度反演精度有明显改进,温度反演精度从 2.5 K 提高到 2 K,湿度反演精度从 30% 提高到 20%,基本实现了对地球大气的全天候观测。1987 年,世界气象组织(World Meteorological Organisation, WMO)提出,天气预报要得到重大改进,全球大气温、湿度探测精度必须达到无线电探空水平,即对流层大气温度的均方根误差小于 1 K,湿度的均方根误差小于 10%,垂直分辨率达到 1 km^[1-6]。然而由于技术的限制,这些滤光片式探测仪无法满足此要求,因此需要发展红外高光谱大气探测技术。

2002 年 5 月 4 日,美国 EOS-AQUA 卫星成功发射,其携带的大气红外探测器(Atmospheric Infrared Sounder, AIRS)是第一个极轨气象卫星高光谱分辨率红外大气探测仪。其采用红外光栅分光技术,共有 2378 个通道,覆盖的光谱范围为 650 ~ 2700 cm⁻¹ (3.7 ~ 15.5 μm),光谱分辨率 $\nu/\Delta\nu=1200$,垂直分辨率为 1 km,温度探测精度为 1 K,湿度探测精度为 10%,达到了 WMO 所提出的无线电探空水平^[1,6],为提高天气预报,尤其是数值天气预报的准确率提供支撑。

相对光栅分光技术,傅里叶变换分光技术可以获得更高的光谱分辨率^[2-5]。早在 1969

年,采用傅里叶变换原理的探测仪被装载在美国“雨云”号气象卫星 Nimbus 上,但因故障工作 2 h 就停机了。直到 2006 年 10 月 19 日,欧洲发射的第一颗极轨卫星 EUMETSAT METOP-A 上搭载了干涉式红外大气探测仪(Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI),采用傅里叶变换分光技术,光谱覆盖范围为 645 ~ 2760 cm⁻¹ (3.62 ~ 15.50 μm),共有 8461 个通道,光谱分辨率为 0.25 cm⁻¹,是目前业务上使用的光谱分辨率最高的红外大气垂直探测仪。2011 年 10 月 28 日发射的 Suomi NPP 卫星上搭载的跨轨红外探测仪(Cross-track Infrared Sounder, CrIS),光谱范围为 650 ~ 2250 cm⁻¹ (长波红外 9.14 ~ 15.38 μm,中波红外 5.71 ~ 8.26 μm,短波红外 3.92 ~ 4.64 μm),共 1305 个通道。2016 年 11 月 19 日,美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)最新一代气象卫星首星 GOES-R 发射成功,但是计划配置在 HES 的大气探测载荷,因过于复杂而未能实现。欧洲原计划发射的第三代静止轨道气象卫星红外探测仪 MTG-S,由于技术难度大,一直未能上天^[7]。

我国第二代极轨气象卫星 FY-3 系列包括 FY-3A、FY-3B、FY-3C 及 FY-3D,可获取全天候全球范围的多光谱、三维、定量的高精度资料。其中 A、B 星是 01 批试验卫星,C 星是 02 批业务卫星,携带的红外分光计 IRAS 可探测全球大气温和湿廓线,大气温、湿度资料的分辨率为 50 km,精度分别为 1.5 ~ 2.5 K、15% ~ 25%。红外大气探测仪(Infrared Atmospheric Sounder, IRAS)采用滤光片式分光技术,在光谱范围 0.69 ~ 15 μm 内共有 26 个通道。2017 年 11 月 15 日发射的 FY-3D 搭载了干涉式红外高光谱大气探测仪(Hyperspectral Infrared Atmospheric Sounder, HIRAS),光谱范围为 650 ~ 2550 cm⁻¹ (长波红外 8.8 ~ 15.38 μm,中波红外 5.71 ~ 8.26 μm,短波红外 3.92 ~ 4.64 μm),共有 1370 个通道^[8-10]。2016 年 12

月 11 日, 中国第二代静止气象卫星 FY-4A 星发射成功, 是国际上第一个装载红外高光谱大气垂直探测仪 (Geostationary Interferometric Infrared Sounder, GIIRS) 的静止气象卫星。该仪器采用傅里叶变换分光方式 (干涉式), 光谱覆盖范围为中短波红外 4.44~6.06 μm 、长波红外 8.85~14.28 μm , 光谱分辨率为 0.625 cm^{-1} , 共有 1650 个通道。与 AIRS 和 IASI 每日 4 次

的时间分辨率相比, 最高可达 35 min/次 ($10^3 \text{ km} \times 10^3 \text{ km}$)。已发射的各种红外大气垂直探测仪的具体技术参数见表 1^[7,11]。

2 通道优选方法

为了提高大气温、湿度反演精度, 国内外学者针对通道选择不断地研究和探讨, 提出了多种不同方法, 并应用这些方法做了很多卓有成效的工作。目前形成的红外大气垂直探测通

表 1 红外大气垂直探测仪的技术参数*

遥感器	卫星平台	分光方式	光谱范围/ μm	光谱分辨率/ cm^{-1}	星下点分辨率/ km	灵敏度 (NET 或 NEN)	通道数
VTPR	ITOS-D 系列	滤光片	12~19	15	/	/	8
HIRS/1	NIMBUS	滤光片	0.6~15	15	/	/	17
HIRS/2	TIROS-N 系列	滤光片	0.6~15	15	/	/	20
VAS	GOES-4~7	滤光片	0.6~15	10~150	/	/	13
SOUNDER	GOES-8~15	滤光片	3~15	13~80	/	/	19
HIRS/3	NOAA-K 系列	滤光片	0.6~15	3~50	/	/	20
IRAS	FY-3(01)	滤光片	0.69~15	3~50	/	/	26
AIRS	EOS-Aqua	光栅	长波 15.4~8.8 中波 8.22~6.2 短波 4.61~3.74	0.55 1.2 2.0	13.5	0.15~0.35 K	2378
IASI	Metop 1~3	干涉	长波 15.5~8.26 中波 8.26~5.0 短波 5.0~3.62	0.35 0.45 0.55	12	0.2~0.35 K	8461
CrIS	Suomi-NPP	干涉	长波 15.38~9.14 中波 8.26~5.71 短波 4.64~3.92	0.625 1.25 2.5	14	0.1~0.5 K	1305
GIIRS	FY-4A	干涉	长波 14.28~8.85 短/中波 6.06~4.45	0.625	16	0.5~1.1 K 0.1~0.14 K	1650
HIRAS	FY-3D	干涉	长波 15.38~8.8 中波 8.26~5.71 短波 4.64~3.92	0.625 1.25 2.5	16	0.15~0.4 K 0.1~0.7 K 0.3~1.2 K	1370

* 干涉式红外高光谱大气垂直探测仪可根据灵敏度要求适当调整光谱分辨率和相应的通道数目

表 2 各通道优选方法的特点

方法	特点	参考文献
基于信息熵的优选方法	信息熵-分步迭代法	关注通道组合对信息熵减小的作用, 每次迭代更新背景场误差协方差矩阵 [12-15, 20-29]
	常量迭代法	关注通道组合对信息熵减小的作用, 保持背景场误差协方差矩阵不变 [27]
基于权函数矩阵的优选方法	雅可比矩阵法	关注各探测通道对反演参数的敏感性 [27]
	主成分分析法	对雅可比矩阵进行主成分分析 [16-17]
基于误差矢量的优选方法	Twomey 方法	考虑了权函数相关性和测量误差对通道选择的影响 [30]
	Yin 等方法	综合考虑了权函数相关性、测量误差、权函数干扰和测量盲区对通道选择的影响 [31]

道优选方法或基于信息熵(信息熵-分步迭代法、常量迭代法), 或基于权函数矩阵(雅可比矩阵法和主成分分析法), 或基于误差矢量(Twomey 方法和 Yin 等方法)。各通道优选方法的特点见表 2。下文将围绕各个通道优选方法的数学物理特点、优势和不足进行全面的总结、分析和比较。

2.1 基于信息熵的优选方法

信息熵(又称 Shannon 熵)是用来衡量一个随机变量出现的期望值, Rodgers 在 1976 年首次提出用基于信息熵的通道选择思想反演大气参数, 并于 1996 年在信息量(ER)的基础上定义了新的评价指标信号自由度(DFS), 采用分步迭代法筛选 AIRS 通道^[12-15]。Rabier 等在 2002 年为了检验迭代法的鲁棒性, 又提出了常量迭代法, 其反演效果和时间成本都介于迭代法和雅可比方法之间, 而且同一通道组合可用于不同的大气参数廓线, 有较强的实用性^[16]。Fourrie 等在 2003 年提出手动选取通道的思想, 并采用 AIRS 近实时数据进行了评估, 比常量迭代法更符合实际情况^[17]。Collard 等在 2003 年和 Cameron 等在 2005 年从同化 AIRS 观测亮温的角度出发, 采用信息熵-分步迭代法, 给出了所选的通道组合^[18-19]。Collard 在 2007 年为了改进温度、湿度、O₃、CO₂ 这些状态矢量, 考虑了信息冗余、干扰因素、

背景误差协方差和大气状态选择的鲁棒性对通道选择的影响, 应用信息熵-分步迭代法选出了基于 IASI 的 300 个通道^[20]。Noh 等在 2017 年提出了一种利用 1D-Var 分析的通道选择方法, 并定义了评价指标 CSI, 采用迭代法计算每个累加通道对输出分析的影响^[21]。

国内也有相应的研究, 杜华栋等在 2008 年基于信息容量, 应用信息熵-分步迭代法选择通道, 利用 IASI 高光谱分辨率资料反演大气温、湿度廓线^[22-23]。张水平在 2009 年应用相同的方法选择 AIRS 通道, 并进行了大气温湿度廓线反演试验^[24]。杨雨晗等在 2018 年针对中国 FY-4A 的垂直探测仪 GIIRS 的探测资料应用, 开展了通道选择研究, 除了应用全球平均大气廓线, 还针对不同下垫面、不同季节和不同纬度带选择相应廓线, 应用信息熵-分步迭代法分别选择合适的通道组合, 并进行了对比分析^[25]。

基于信息熵的通道选择是通过定义信息量即观测前后信息熵的变化(ER=观测前-观测后), 以 ER 值的大小判断一个通道是否最优。

$$ER = \frac{1}{2} \ln |S_a| - \frac{1}{2} \ln |S| = -\frac{1}{2} \ln |SS_a^{-1}| \quad (1)$$

式中, S_a 为初估场或背景场的误差协方差矩阵。S 为观测后的误差协方差矩阵。S_a 可通过

历史资料的统计平均得到, 而 S 则可通过 Bayes 统计方法获得:

$$S = S_0 - S_0 K^T (K S_0 K^T + S_e)^{-1} K S_0 \quad (2)$$

式中, S_e 为观测误差协方差矩阵, K 为权函数矩阵。

信息量作为衡量标准的应用也存在一些问题。状态向量的一个高精度标量元素与几个较低精度元素所包含的信息量是相同的, 而在大部分的大气层中, 通常更倾向于获得的精度与元素个数的平衡。所以 Rodgers 又引入了信号自由度 ($DFS = Tr(I - SS_0^{-1})$) 作为一个评价指标。但是经过验证, 通过这两个评价指标选择的通道反演大气温、湿度的效果相当。另外, 由于计算信息量时采用的都是背景场和分析场的完全误差协方差, 这也是必须的, 然而在实际应用 1D-Var 分析时就很难评估通道对待反演大气参数的直接影响, Noh 等在 2017 年为了评估一组特定的 IASI 通道, 改进 1D-Var 分析参数的总体影响, 定义了评价指标 CSI ($CSI = \sum_{j=1}^N \left(1 - \frac{RMSE_{a,i,j}}{RMSE_{b,j}}\right) \omega_j$)。其中, $RMSE_{a,i,j}$ 和 $RMSE_{b,j}$ 分别表示大气参数的分析值、背景值与真值的均方根误差; ω_j 为大气参数的权重, 表示分析廓线相对背景廓线的改进程度^[21]。在选择 IASI 通道时, ER 方法相对 CSI 较慢, 即若两种方法选出的通道数相同时, CSI 方法选出的通道包含的信息量相对较多。而且在反演大气湿度时, 相对于业务通道, 应用该方法筛选的通道由于增加了在对流层上层对水汽敏感的通道, 对流层上层的湿度偏差明显降低。

通道选择的原则是在给定待选择通道的条件下找出一个通道组合, 使反演结果最优。设计分步迭代法进行通道选择, 一方面可以避免计算量太大, 另一方面还可以记录所选通道的顺序。迭代过程中, 以指标 (ER/DFS/CSI) 取值最大为选择标准, 每次选出一个通道, 并将此次计算的 S 作为下次迭代时的 S_0 (常量迭代法保持 S_0 不变), 本

次未选中的通道作为下次的待选通道, 直到选出所需的通道组合。

2.2 基于权函数矩阵的优选方法

Rabier 等在 2002 年应用信息熵-分步迭代法实现了对 IASI 的通道选择, 并提出基于数据分辨率矩阵 (Data Resolution Matrix, DRM) 的方法及雅可比方法^[16]。刘辉等在 2008 年通过计算权重函数的峰值位置, 找出最优化的权重函数选择通道进行反演^[26]。张建伟等在 2011 年提出了基于主成分累计影响系数的通道选择方法, 通过计算每个主成分的累计影响系数进行通道排序, 选择 AIRS 最优通道组合, 并分析不同通道组合对反演大气温、湿度的影响^[27]。王根等在 2014 年在主成分分析的基础上, 用逐步回归法对所选 AIRS 通道进一步的筛选和剔除, 而对模式层进行分区又使逐步回归法能够达到全局最优并兼顾局部, 从而更好的反演大气温、湿度^[28]。

雅可比矩阵法是根据雅可比矩阵自身特点, 按照气压层的顺序逐层选择通道。首先用背景误差协方差矩阵和观测误差协方差矩阵对雅可比矩阵进行标准化, 而每一个通道的权重函数在某个气压层有峰值, 选择每层的最大峰值所对应的通道为最优通道, 即对大气参数最敏感的通道。与信息熵-分步迭代法作对比, 虽然效果略逊于迭代法, 但计算相对省时。

主成分分析方法是直接对待反演大气参数的雅可比矩阵进行主成分分析, 提取主要信息, 并定义累计影响系数:

$$S_j = s_{j1} + s_{j2} + \dots + s_{jm} \quad (3)$$

式中, s_{jm} 为第 j 个变量对第 m 个主成分的影响系数 (特征向量 \times 方差贡献率), S_j 为第 j 个变量在 m 个主成分中的累计影响系数。根据每个通道对主成分累积影响系数的大小进行通道排序, 选择最优通道组合。王根等在 2014 年在主成分分析的基础上, 用逐步回归法进一步获取对主要信息较敏感的通道, 而且采用模式层分区的思想, 不仅从全局考虑, 也兼顾了局部最优。相比信息熵-分步迭代法整体反演效

果较好,但在底层的反演效果较差^[28]。

2.3 基于误差矢量的优选方法

Twomey 在 1974 年分析了反演问题中权函数协方差矩阵的特征值与有效信息量之间的关系,即对权函数的协方差矩阵进行特征值分析,从而估计有效信息量,确定最优通道组合^[29]。Twomey 权函数协方差矩阵特征值分析从物理本质上与权函数相关性导致的测量误差放大相联系;从应用效果来看,需要通过各种约束防止反演不稳定。黎光清和董超华在 1986 年认为权函数误差是反演过程中出现不稳定解的根本原因^[30]。

Yin 等在 1996 年分析了仅采用权函数相关性选择通道导致反演不稳定的原因,指出除了考虑核函数相关性以外,还需从测量误差、权函数干扰、测量盲区几方面来考虑选择通道,并将之应用于由多光谱气溶胶光学厚度测量确定气溶胶粒径分布的通道优选^[31]。

Yin 等从第一类线性 Fredholm 积分方程出发,定义评价指标显性度 (Degree of Pre-dominance, DP),即综合考虑测量误差、权函数相关性、权函数干扰及测量误差四个因素:

$$DP = [1 + (R_{\tilde{f}_a}^2 - 1)R_d^2]^{-1/2} \quad (4)$$

而

$$R_{\tilde{f}_a}^2 = R_c^2 [R_b^2 + R_a^2 (1 + R_b^2)] \quad (5)$$

式中, R_a 表示测量相对误差, R_b 为权函数误差所导致的“测量相对误差”, R_c 为权函数的相关性, R_d 为反演函数可视区占比。将以下原则作为判断标准来选择通道:

- (1) 通道数相同时,选择 DP 值较大者;
- (2) DP 值在可接受范围内时,选择通道数较多的。

从反演误差角度来看,

$$R_{\tilde{f}}^2 = 1 + (R_{\tilde{f}_a}^2 - 1) R_d^2 = R_{\tilde{f}_a}^2 R_d^2 + (1 - R_d^2) \quad (6)$$

$$R_{\tilde{f}_a}^2 = R_c^2 [R_b^2 + R_a^2 (1 + R_b^2)] = R_c^2 (R_a^2 + R_b^2 + R_a^2 R_b^2) \quad (7)$$

即反演相对误差 $R_{\tilde{f}}$ 是由可视区反演相对误差

在可视区的占比和测量盲区占比组成。而 $R_{\tilde{f}_a}$ 为可视区反演相对误差,表示测量误差被叠加上权函数误差,权函数相关性又放大了测量误差,三者之间比彼此相互作用。

3 通道优选方法的对比分析

从各位学者所做的工作及上述各种方法的分析可知,基于信息熵的方法和基于权函数矩阵的方法是从信息统计学角度出发,而基于误差矢量的方法是从反演参数误差物理原因出发。出发点不同,结果则有相通之处。

基于权函数矩阵的方法都是仅从权重函数出发选择通道,基于信息熵方法则从权重函数、背景场和观测误差协方差矩阵进行通道选择。应用选出的通道进行大气温、湿度反演,对比发现基于信息熵的分步迭代法效果更好,而且在选择通道时可以记录所有被选中通道的顺序。另外,基于信息熵方法是最早被提出且应用最广泛的方法,AIRS 和 IASI 的业务数据发布通道都是应用该方法选择。与信息熵-分布迭代法相比,雅可比方法虽然效果略逊一筹(只在对流层中层反演效果较好),但计算相对省时。常量迭代法的反演效果和时间成本都介于迭代法和雅可比方法之间,而且不同的大气参数廓线可以用同一通道组合,实用性较强。而应用基于主成分分析的通道选择方法可以一次性选出所需的最优通道组合,并且降低通道之间的相关性,但是这类方法往往在中下层的反演效果较差,即使叠加双区逐步回归法,在底层的反演效果仍然不理想。这些方法筛选的通道对于不同的大气参数反演效果稍有差别,即使反演同一种大气参数,不同方法筛选的通道在不同气压层的效果也有差异。总的来说,这些都是基于概率统计思想的通道选择方法,各有利弊。

Twomey 和 Yin 等的最终目的都是使反演误差达到最小,但是 Twomey 仅仅考虑了权函数相关性和测量误差对通道选择的影响,而 Yin 等综合考虑测量误差、权函数相关性、权函数干扰及测量误差进行通道选择。不论是基

于信息熵方法还是基于权函数矩阵方法,应用信息统计分析方法进行通道选择的观测误差协方差矩阵及权函数矩阵相联系。然而,在选择通道时,这些方法本身并不考虑权函数干扰影响,而是采用预筛选的方法进行处理,如事先黑名单、人工剔除等,没有具体的量化表达式,也未考虑测量盲区的影响,从物理上来说可能会导致一些不合理的结果。所以,基于误差矢量方法的物理依据更充分。

由于高光谱红外大气探测仪(AIRS、IASI、CrIS、GIIRS)的通道数以千计,其光谱分辨率高,覆盖波段范围宽,影响通道优劣的因素复杂,包括不确定因素。因此,通道预筛选与上述各种通道优选方法的结合有助于实现通道优选目的,提升通道优选效果。预筛选主要基于如下原则:(1)剔除噪声较大和痕量气体的强敏感通道;(2)考虑非局部热动平衡(Non-local Thermal Dynamic Equilibrium, non-LTE)效应,剔除 $2220\sim 2287\text{ cm}^{-1}$ 的通道;(3)考虑模式顶层的不确定性及同化系统的时效性,剔除长波区域 CO_2 通道和 H_2O 的高层通道;(4)考虑地表信息的不确定性,剔除权重函数峰值在近地表的通道。

4 总结

本文在总结红外大气垂直探测技术发展的基础上,对大气垂直探测通道优选方法进行了系统的分析研究。

基于信息熵的通道优选方法,从信息统计学出发,它关注通道组合对信息熵减小的作用,被用于 AIRS 和 IASI 的业务数据发布。这类方法可能会产生测量精度很低/很高的通道组合,从信息熵角度是组好的测量,但从物理角度,这是不恰当的。基于雅可比的通道优选方法,也是从信息统计学出发,关注各探测通道对各高度参数的敏感性,其中又衍生出了主成分分析法。

基于误差矢量的通道优选方法从反演参数误差物理原因出发,关注权函数相关性对测量误差的放大作用。其中, Yin 等进一步考虑了

影响误差放大的其它物理因子,除测量误差和权函数相关性外,还考虑了权函数干扰和测量盲区的作用。迄今为止,这类方法主要应用在多光谱通道优选,对于红外高光谱探测通道优选的应用,或者说针对光谱细分特点的适用性以及进一步发展有待进一步研究。

参考文献

- [1] 董超华,李俊,张鹏,等. 卫星高光谱红外大气遥感原理和应用 [M]. 北京:科学出版社, 2013.
- [2] 张志清,陆风,方翔,等. FY-4 卫星应用与发展 [J]. 上海航天, 2017, 34(4): 8-19.
- [3] 刘辉,董超华,张文建. 国际卫星红外大气探测器发展新特点 [J]. 气象科技, 2006, 34(5): 600-605.
- [4] 张鹏,董超华,黎光清,等. 高光谱红外大气探测仪器原理、现状和未来 [G]. 国家卫星气象中心:气象卫星大气综合探测, 2003.
- [5] 邢廷,龚惠兴. 大气探测傅里叶变换光谱仪 [J]. 遥感技术与应用, 1999, 14(1): 5-10.
- [6] 鲍艳松,汪自军,陈强,等. FY-4A 星 GIIRS 大气温度廓线反演模拟试验研究 [J]. 上海航天, 2017, 34(4): 28-37.
- [7] 华建文,毛建华. “风云四号”气象卫星大气垂直探测仪 [J]. 科学, 2018, 70(1): 24-29.
- [8] 漆成莉,顾明剑,胡秀清,等. 风云三号卫星红外高光谱探测技术及潜在应用 [J]. 气象科技进展, 2016, 6(1): 88-93.
- [9] 杨忠东,张鹏,谷松岩,等. FY-3 卫星应用和发展 [J]. 上海航天, 2017, 34(4): 1-7.
- [10] 杨军,董超华,卢乃锰,等. 中国新一代极轨气象卫星——风云三号 [J]. 气象学报, 2009, 67(4): 501-509.
- [11] 孙允珠,蒋光伟,李云端,等. 高光谱观测卫星及应用前景 [J]. 上海航天, 2017, 34(3): 1-13.
- [12] 杜华栋,黄思训,石汉青. 高光谱分辨率要赶资料通道最优选择方法及试验 [J]. 物理学报, 2008, 57(12): 7685-7691.
- [13] 张水平. AIRS 资料反演大气温度廓线的通道选择研究 [J]. 气象科学, 2009, 29(4): 4475-

- 4481.
- [14] 杜华栋, 黄思训, 方涵先, 等. 星基大气探测资料信息容量研究 [J]. *物理学报*, 2010, **59**(1): 683–690.
- [15] 杨雨晗, 尹球, 束炯. FY-4A 大气垂直探测仪 (GIIRS) 温度探测通道优选 [J]. *红外与毫米学报*, 2018, **37**(5): 603–610.
- [16] 张建伟, 王根, 张华, 等. 基于主成分累计影响系数法的高光谱大气红外探测器的通道选择试验 [J]. *大气科学学报*, 2011, **34**(1): 36–42.
- [17] 王根, 陆其峰, 张建伟, 等. 高光谱大气红外探测器通道选择方法及试验研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2014, **29**(5): 795–802.
- [18] 刘辉, 董超华, 张文建, 等. AIRS 晴空大气温度廓线反演试验 [J]. *气象学报*, 2008, **66**(4): 513–519.
- [19] 黎光清, 董超华. 核函数误差对气象卫星测温反演的影响 [J]. *气象*, 1986, **12**(11): 26–29.
- [20] Shannon C E. A Mathematical Theory of Communication [J]. *The Bell Technical Journal*, 1948, **27**: 379–423.
- [21] Rodgers C D. Retrieval of Atmospheric Temperature and Composition from Remote Measurements of Thermal Radiation [J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1976, **14**(4): 609–624.
- [22] Rodgers C D. Information Content and Optimization of High Spectral Resolution Remote Measurements [J]. *Advances in Space Research*, 1996, **21**(97): 136–147.
- [23] Rodgers C D. Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2000.
- [24] Collard A D. Selection of IASI Channels for Use in Numerical Weather Prediction [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, **133**: 1977–1991.
- [25] Noh Y C, Sohn B J, Kim Y, et al. A New Infrared Atmospheric Sounding Interferometer Channel Selection and Assessment of Its Impact on Met Office NWP Forecasts [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, **34**(11): 1265–1281.
- [26] Fourrie N, Thepaut J. Evaluation of the AIRS Near-real-time Channel Selection for Application to Numerical Weather Prediction [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2003, **129**: 2425–2439.
- [27] Rbier F, Fourrie N, Chafai D, et al. Channel Selection Methods for Infrared Atmospheric Sounding Interferometer radiances [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2002, **128**: 1011–1027.
- [28] Collard A, Saunders R, Cameron J, et al. Assimilation of Data from AIRS for Improved Numerical Weather Prediction [C]. Adele: 13th International TOVS Study Conference, 2003.
- [29] Cameron J, Collard A, English S. Operational Use of AIRS Observations at the Met Office [C]. Beijing: 14th International TOVS Study Conference, 2005.
- [30] Twomey S. Information Content in Remote Sensing [J]. *Applied Optics*, 1974, **13**: 842–945.
- [31] Yin Q, Zhang Z X, Kuang D B. Channel Selection of Atmospheric Remote Sensing [J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(36): 7136–7143.