

星基大气探测资料信息容量研究^{*}

杜华栋[†] 黄思训[‡] 方涵先 龙智勇 王永琪

(中国人民解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

(2009 年 2 月 20 日收到, 2009 年 4 月 10 日收到修改稿)

通过引入信息容量的概念, 并借助 Bayesian 估计理论, 给出了星载探测资料中所包含的如温度、湿度、 O_3 、 SO_2 、 CH_4 等大气参数的信息容量的计算方案, 该方法充分考虑了仪器各通道对反演参数的敏感性、各通道的观测误差特性以及背景场的误差特性, 然后利用该方法对 HIRS、AMSU、AIRS、IASIS 四种仪器以及三种组合所包含的大气温度、湿度的信息容量进行了计算, 得到十分有价值的结果, 该方法预期在星载大气探测仪器的设计、各仪器的评估与比较、探测资料的应用等方面有重要的意义。

关键词: 大气探测资料, 信息容量, 权函数矩阵

PACC: 9260Y, 9265D, 4262E

1. 引言

自 20 世纪 70 年代末开始, NOAA 极轨卫星装载的 TOVS 仪器套装开始为业务天气预报提供温度、湿度廓线遥感资料。目前 TOVS 仪器的改进型 ATOVS 探测资料在业务天气预报中已起着重要的作用。在欧洲中期预报中心(ECMWF)关于观测资料对数值天气预报重要性的报告^[1]中曾指出, 在南半球、低纬以及北半球沙漠、海洋、高原等常规观测资料较少的地区, ATOVS 探测资料对业务预报的贡献要大于其他任何类型的资料。

但随着人们对业务天气预报的准确率和有效实效要求的提高, TOVS/ATOVS 探测资料的局限性越来越被气象工作者所认识到^[2]。世界气象组织(WMO)对卫星资料在天气预报中的应用价值进行评估的报告中指出, 天气预报准确率的进一步提高, 全球温湿度探测精度必须达到气球探空的精度, 也就是 1 km 气层厚度的温度探测精度达到均方根误差小于 1 K, 对流层湿度探测精度达到 10%。而目前业务中采用的 ATOVS 反演产品精度约为 2.0 K 和 20%^[3]。为了满足业务预报对遥感的要求, 国外于上

世纪 90 年代初开始红外高光谱分辨率大气遥感的理论和实验室模拟研究并进行机载试验。美国航空航天局(NASA)于 2002 年发射的 AQUA 太阳同步轨道卫星上搭载的高光谱分辨率大气红外探测器(AIRS), 采用红外光栅阵分光技术, 光谱分辨率 $\nu/\Delta\nu$ 约为 1200, 共有 2378 个通道; 而 2006 年开始发射的欧洲极轨气象卫星(METOP)系列上搭载的红外大气探测干涉仪(IASI), 采用 Fourier 变换分光技术, 光谱分辨率在长波红外处约为 1200, 而在短波红外处可达 5400, 共有 8461 个通道。此外, 未来美国下一代极轨气象卫星 NPOESS 系列卫星上搭载的跨轨红外探测器(CHS), 以及静止气象卫星 GOES-R 上搭载的超光谱环境传感器(HES), 也都属于高光谱探测器。国内在卫星探测器研制方面进展很快, 目前除在新一代极轨气象卫星 FY-3 上搭载了红外大气探测器(IRAS)、微波温度探测器(MWTS)、微波湿度探测器(MWHS)三种探测器外, 还开始了高光谱探测器大气探测干涉仪(ASI)的研究与论证^[4]。国外的研究表明, 采用这类仪器后, 温、湿廓线垂直探测精度分别可达 1K 和 10%^[5-7]。

各种探测器探测资料所反演大气参数的精度之所以不同, 从信息论的角度来讲, 是由于不同探测器

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 40775023)和解放军理工大学气象学院博士科研启动基金、江苏省气象灾害重点实验室基金(批准号: KLMF0606)和国家重大公益性技术前期预研基金(批准号: GYHY200806029)资助的课题。

[†] E-mail: dhd_1979@yahoo.com.cn

[‡] E-mail: huangxp@yahoo.com.cn

能够探测到的大气信息量不同.但在遥感中,对于探测器探测资料所包含有效信息量的大小,长期以来缺乏对其进行定量描述的方法和指标.而若能通过信息容量的概念对各仪器的探测能力进行描述,包括对不同仪器观测资料中所包含的不同大气参数,如温度、湿度以及微量气体成份如 O_3 、 CH_4 等信息量的多少分别进行描述,将对仪器的设计、资料的应用以及反演方法的设计等方面有重要的意义.

在本文中,将利用信息容量的概念对各种星载大气探测器关于各种参数的信息进行定量计算.主要包括各种大气探测器的简要介绍;将信息容量引入到遥感大气探测中,并给出具体的计算方案;最后将对目前业务运行中所涉及的几种大气探测器及几种探测器组合所包含的温度与湿度信息的容量进行计算.

2. 仪器介绍

2.1. HIRS

高分辨率红外探测器(HIRS)是美国 TIROS 业务垂直探测器仪器组合(TOVS)中的红外探测器,最早搭载于 TIROS-N 卫星上,目前在国外所有的极轨气象卫星中,包括美国的 NOAA 系列,欧洲的 METOP 系列,均搭载该仪器.它采用的是滤光片分光技术,由 19 个红外通道、1 个可见光通道组成.其中 7 个通道位于 $15\text{ }\mu\text{m}$ 长波 CO_2 吸收带,5 个位于 $4.3\text{ }\mu\text{m}$ 短波 CO_2 吸收带,主要用于探测大气温度的垂直分布.位于 $6.7\text{ }\mu\text{m}$ 水汽吸收带的 3 个通道主要用于探测大气湿度的垂直分布.位于 $9.7\text{ }\mu\text{m}$ O_3 吸收带通道主要用于探测大气中 O_3 总含量.此外,位于 $11\text{ }\mu\text{m}$ 、 $4.3\text{ }\mu\text{m}$ 和 $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 的三个窗区通道主要探测地表温度和进行云检测.对于 HIRS 仪器,各通道观测噪音的均方根误差(RMSE)以及 AMSU、AIRS、IASI 仪器各通道误差,本文取自 EUMETSAT 卫星资料数值天气预报应用研究组(NWP SAF)所开发的一维变分物理反演软件(NWP SAF 1D-Var, <http://www.metoffice.gov.uk/research/interproj/nwpsaf/metoffice-1dvar/index.html>),详细取值见图 1.

2.2. AMSU

先进的微波探测单元(AMSU)包括 AMSU-A,

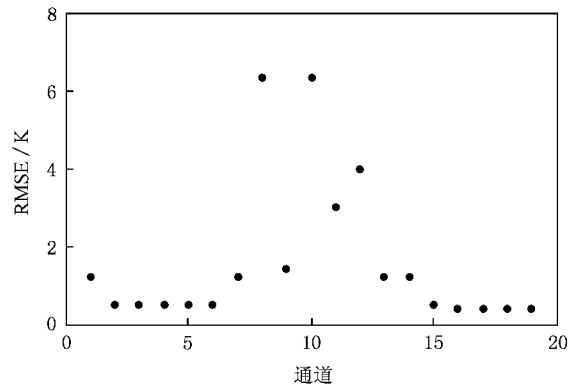


图 1 HIRS 各通道误差图(数据来自 NWP SAF 1D-Var)

AMSU-B 两个仪器.主要搭载于包括 NOAA15—NOAA18 在内的美国第五代极轨卫星、地球观测系统(EOS)系列卫星中的 AQUA 卫星以及欧洲极轨气象卫星(METOP)系列中.

AMSU-A 为全功率型微波辐射计,波段为 23—89 GHz,由两个分离部件组成,共 15 个通道.其中 AMSU-A2 上有 2 个通道,分别为 23.8 和 31.4 GHz; AMSU-A1 在从 50.3 到 57.29 GHz 氧气吸收带处有 12 个通道,加上 89 GHz 处 1 个通道共有 13 个通道.12 个氧气吸收带通道(通道 3—14)提供从地表到约 40 km(即从 1000 到 2 hPa)全球大气微波垂直温度探测.其余的 3 个窗区通道(通道 1,2,15)辅助温度探测,作表面发射率、大气液态水以及总降水量的吸收订正.

AMSU-B 是一个 5 通道微波辐射计,处于 AMSU 的第 16—20 通道,包括两个中心分别位于 89、150GHz 的窗区通道,以及三个定于 183.31 GHz 水汽谱线的 $183 \pm 1, \pm 3, \pm 7$ GHz 通道.分布于最强水汽吸收线 183.31 GHz 处的三个通道(即通道 18—20)可用来反演全球大气不同高度的湿度廓线,而 89、150 GHz 处的两个窗区通道(通道 16,17)可以纵深穿透大气层到达地球表面.

对于 AMSU 仪器各通道观测噪音的均方根误差(RMSE),见图 2.

2.3. AIRS

AIRS 搭载于美国 EOS 系列中的 AQUA 卫星.它是采用光栅分光技术的高光谱分辨率大气探测仪器,共包括 2378 个红外通道,其光谱分辨率($\nu/\Delta\nu$)高于 1200,辐射测量绝对精度优于 0.2 K.在 3.74—

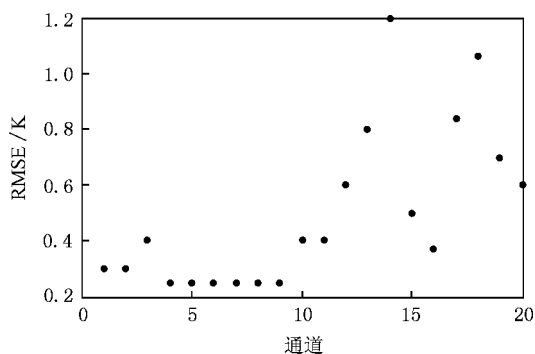


图2 AMSU 各通道误差图(数据来自 NWP SAF 1D-Var)

15.4 μm 红外光谱区域,主要覆盖三个谱段,分别是 3.74—4.61 μm , 6.20—8.22 μm , 8.80—15.40 μm . 这三个谱段包含了 CO_2 强吸收带(中心在 15.5 和 4.3 μm 附近),水汽吸收带(中心在 6.3 μm 附近), O_3 吸收带(中心在 9.6 μm 附近), CH_4 吸收带(中心在 7.7 μm 附近)以及 N_2O 吸收带(中心在 7.8 和 4.5 μm 附近). CO_2 强吸收带主要用来探测大气温度,水汽吸收带用于探测大气湿度和云的特性, O_3 , CH_4 , N_2O 等吸收带可以探测相应的 O_3 和其他微量气体. 对于 AIRS 各通道的均方根误差噪声(RMSE),见图 3.

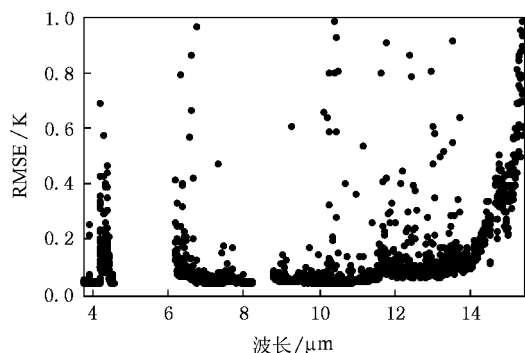


图3 AIRS 各通道误差图(数据来自 NWP SAF 1D-Var)

2.4. IASI

IASI 搭载于 2006 年 10 月 17 日发射成功的 METOP-A 上,在 METOP 的后续两颗卫星上将继续搭载该仪器.它是一个横跨跟踪扫描系统,从卫星运行方向左侧开始扫描,其扫描范围在星下点两侧分别为 $\pm 48^\circ 20'$,从 30 个方位覆盖地球. IASI 拥有 8461 个光谱通道,在 $645.0\text{—}2760\text{ cm}^{-1}$ (15.5—3.63 μm) 区间呈现出三个不相关的带状分布.光谱分辨率为 $0.35\text{—}0.5\text{ cm}^{-1}$,采样间隔为 0.25 cm^{-1} . IASI 分光

计主要用以获取大气辐射谱,以提供高精度的温度和湿度测量数据以及垂直剖面.此外,它还可用于测量微量气体如 O_3 , CH_4 , N_2O , CO_2 , SO_2 等的含量以及陆地和海洋表面温度、辐射度和云特征等.对于 IASI 仪器各通道的均方根误差噪音,见图 4.

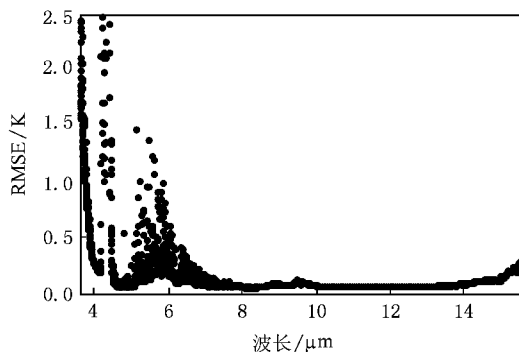


图4 IASI 各通道误差图(数据来自 NWP SAF 1D-Var)

3. 信息容量的引入

1948 年,Shannon 在创立信息论时,找到一个唯一的量来度量信源的不确定性,后来人们称其为信息熵或 Shannon 熵.由 Shannon 信息熵可知,若观测或反演前系统的概率分布用 $P_1(x)$ 表示,观测后系统的概率分布用 $P_2(x)$ 表示,则观测的信息容量可以定义为这两个状态的熵之差^[8]:

$$H = \mathcal{S}(P_1) - \mathcal{S}(P_2). \quad (1)$$

系统的概率分布为高斯分布时,由信息论中知识有系统的熵定义为

$$\mathcal{S}[P] = \frac{1}{2} \ln |S|, \quad (2)$$

其中 S 为描述系统高斯分布的误差协方差矩阵.若记描述观测前大气参数估计值准确性的误差协方差矩阵为 S_a 、观测后大气参数估计值准确性的协方差矩阵为 $\hat{S}$,则观测过程所包含的信息容量为

$$\begin{aligned} H &= \frac{1}{2} \ln |S_a| - \frac{1}{2} \ln |\hat{S}| \\ &= \frac{1}{2} \ln |S_a \hat{S}^{-1}| \\ &= -\frac{1}{2} \ln |\hat{S} S_a^{-1}|. \end{aligned} \quad (3)$$

由(3)式知,要利用信息容量 H 对仪器的观测能力进行描述,则须知道观测前协方差矩阵 S_a 以及观测后协方差矩阵 $\hat{S}$.对于观测前协方差矩阵 S_a 通常可以采用统计方法来获取^[9,10].而对于观测

后协方差矩阵 $\hat{S}$, 由于卫星遥感观测是辐射率或亮温, 属于间接观测, 因此无法直接利用观测资料求出观测后大气参数估计值的误差协方差矩阵 $\hat{S}$. 而 Bayes 方法可结合背景场信息, 将观测的概率密度函数与大气参数的概率密度函数联系起来, 实现将观测概率密度函数映射到大气参数状态空间, 从而实现对观测后误差协方差矩阵 $\hat{S}$ 的估计. 下面对利用 Bayes 方法进行 $\hat{S}$ 估计的方案进行简要介绍.

4. 观测误差协方差矩阵的估计

对于遥感探测, 记观测值(即辐射率或亮温)为 m 维矢量 y , 大气廓线矢量(包括大气温度、湿度廓线等参数)为 n 维矢量 x , 则 y 与 x 之间的关系(在遥感中即辐射传输过程)可记为

$$y = F(x) + \varepsilon, \quad (4)$$

其中 F 为观测算子, 它与辐射传输原理以及仪器通道的光谱响应特性等有关. 误差项 ε 为观测噪声或观测误差, 对应的误差协方差协矩阵记为 S_ε . 当观测误差满足高斯分布时, 有条件概率分布 $P(y|x)$ 为^[11]

$$-2\ln P(y|x) = (y - F(x))^T S_\varepsilon^{-1} (y - F(x)) + c_1, \quad (5)$$

其中 c_1 为常数; S_ε 为观测误差协方差矩阵; $P(y|x)$ 为 y 关于 x 的条件概率密度函数, 它表示大气参数为 x 时, 观测值 y 取值在区域 $(y, y + dy)$ 内的概率为 $P(y|x)dy$.

若大气参数初始猜测值 x_a 为高斯分布, 对应的误差协方差矩阵为 S_a , 则大气廓线真实值取为 x 的概率满足

$$-2\ln P(x) = (x - x_a)^T S_a^{-1} (x - x_a) + c_2, \quad (6)$$

其中 c_2 为常数.

由概率论基本定理^[11]

$$\int P(x, y) dy = P(x), \quad (7)$$

$$P(y|x) = \frac{P(x, y)}{\int P(x, y) dy}, \quad (8)$$

可推出

$$P(x|y) = \frac{P(y|x)P(x)}{P(y)}, \quad (9)$$

式中 $P(x|y)$ 为给定观测 y 后大气参数 x 的后验概率密度函数. 这相当于利用观测来修正大气参数的先验概率密度函数. (9) 式右侧中分母 $P(y)$ 是唯一

未知的一项, 理论上可以通过对 $P(y|x)P(x)$ 关于 x 积分而获取, 而在实际中由于其仅起正规化作用而通常被忽略掉, 于是可得

$$P(x|y) \cong P(y|x)P(x). \quad (10)$$

将 (5) 式和 (6) 式代入 (10) 式可得到描述观测后大气参数高斯分布的概率密度函数为

$$\begin{aligned} & -2\ln P(x|y) \\ &= (y - F(x))^T S_\varepsilon^{-1} (y - F(x)) \\ &+ (x - x_a)^T S_a^{-1} (x - x_a) + c_3, \end{aligned} \quad (11)$$

其中 c_3 为常数.

当 F 为非线性时, 将其 Taylor 展开有

$$F(x) \cong F(x_a) + K(x - x_a), \quad (12)$$

其中 $K = \partial F / \partial x$ 为权函数矩阵, 又称为 Jacobian 矩阵, 它表示各通道观测值相对于待反演大气参数的敏感性. 将 (12) 式代入 (11) 式有

$$\begin{aligned} & -2\ln P(x|y) \\ &= (y - Kx)^T S_\varepsilon^{-1} (y - Kx) \\ &+ (x - x_a)^T S_a^{-1} (x - x_a) + c_3, \end{aligned} \quad (13)$$

(13) 式中关于 x 是二次的, 因此一定可以化为 x 的二次型

$$-2\ln P(x|y) = (x - \hat{x})^T \hat{S}^{-1} (x - \hat{x}) + c_4, \quad (14)$$

即后验概率分布函数同样为高斯分布, 其期望值为 $\hat{x}$, 协方差矩阵为 $\hat{S}$.

令 (13) 式和 (14) 式中的二次项相等有

$$\hat{S}^{-1} = K^T S_\varepsilon^{-1} K + S_a^{-1}. \quad (15)$$

对 (15) 式进行变换可得误差协方差矩阵为

$$\hat{S} = S_a - S_a K^T (K S_a K^T + S_\varepsilon)^{-1} K S_a. \quad (16)$$

将 (16) 式代入 (3) 式, 即可求出卫星遥感仪器所包含的某种大气参数的信息容量.

5. 试验方案及结果

在本文中, 对 AMSU, HIRS, IASI, AIRS 四种仪器以及三种仪器组合所包含温度、湿度的信息容量 H 进行估计. 这三种组合分别为 ATOVS, IASI-300Ch, AIRS-324Ch, 其中 ATOVS 表示 AMSU 和 HIRS 套装; IASI-300Ch 表示从 IASI 的 8461 通道中选择 300 个通道进行计算, 而这 300 个通道为欧洲卫星气象中心 (EUMETSAT) 利用 AAPP 软件进行 IASI 预处理后进行一级产品发布时所保留的 300 个通道, 具体分布见图 6; AIRS-324Ch 表示从 AIRS 的 2378 个通道中

选择了 324 个通道进行计算 ,其中这 324 个通道为 NWP SAF 1D-Var 在利用 AIRS 进行温湿廓线反演时所采用的通道组合 ,具体分布见图 5。

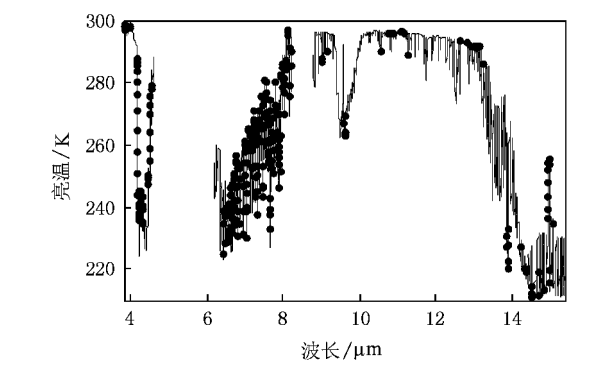


图 5 RTTOV 中 324 个 AIRS 通道分布图

由 (3) 式和 (16) 式可知 ,要对仪器的观测能力进行估计 ,只需知道背景场误差协方差矩阵 S_a 、仪器观测误差协方差矩阵 S_e 以及权函数矩阵 K 即可。下面对这三者的获取或计算方法进行简要介绍。

5.1. 观测误差协方差矩阵的计算

在卫星遥感探测中 ,观测误差主要来源于观测资料误差 (仪器误差)和观测算子误差 (辐射传输模式误差)。各通道误差通常认为是互不相关的^[12,13] ,观测误差协方差矩阵 S_e 为对角线矩阵 ,且对角线各元素取值为各通道观测均方差误差的平方。

5.2. 背景场误差协方差矩阵的计算

对于背景场误差协方差矩阵 S_a ,本文通过对气候平均值与真实值之间的偏差进行统计而获得。具

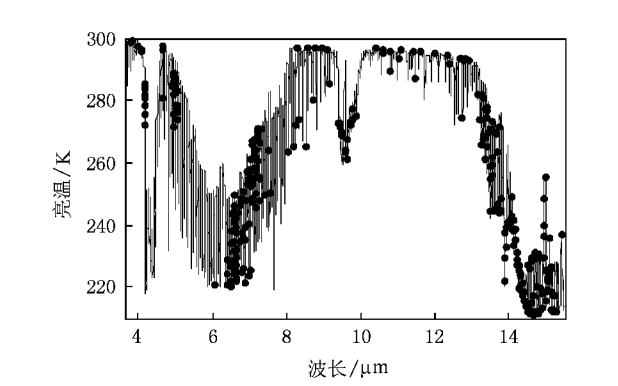
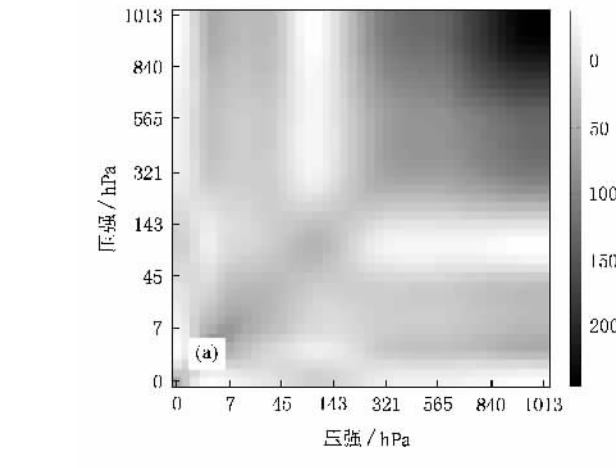


图 6 AAPP 中 300 个 IASI 通道示意图

体方法是对大气廓线集中所有廓线进行平均 ,得到气候平均值作为大气廓线估计值或背景场 ,然后将大气廓线集中每条廓线减去气候平均值 ,得到估计值误差 ,记为矩阵 $X'_{n,t}$,其中 n 为大气廓线的维数 , t 为样本数 ,则误差协方差矩阵为

$$S_a = \frac{X'_{n,t}(X'_{n,t})^T}{t-1}.$$
 (17)

本文中所用的大气廓线资料集为 ECMWF 再分析资料抽样大气廓线集 (垂直分层为 60 层)^[14]。该资料共包括全球不同区域、不同季节条件下 13495 条大气廓线 ,主要用于辐射传输模拟以及大气廓线遥感反演算法研究。 S_a 具体计算结果见图 7。

5.3. 权函数矩阵 K 的计算

对于前面各公式中所提及的模式 F 及其权函数矩阵 K ,本文采用 Tiros 业务垂直探测器辐射传输模式 (RTTOV) 进行计算。它是由 ECMWF 开发的用于模拟多种气象卫星平台上红外与微波探测资料的

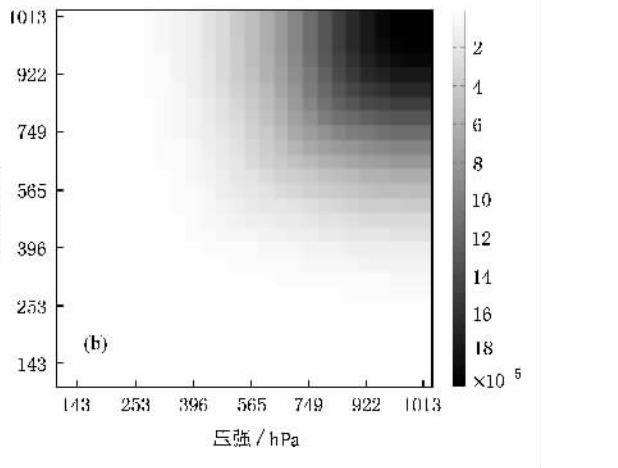


图 7 观测前误差协方差矩阵 (a)为温度误差协方差矩阵 ,右侧灰度条为矩阵的取值 ,单位为 K^2 (b)为湿度误差协方差矩阵 ,右侧灰度条为矩阵的取值

快速辐射传输模式,该模式最早由 Eyre 等^[15]提出, 又由 Eyre^[16],Rayer^[17],Rizzi 等^[18],Saunders 等^[19], Matricardi 等^[20]作逐步修改与提高,目前已发展为可考虑大气温湿廓线、云廓线、雨廓线影响的辐射传输模式,同时还包括切线性模式、伴随模式以及权函数矩阵模式.在垂直方向上 0.1 hPa 到 1013.3 hPa 模式共分为 43 层.

利用星基探测器对大气进行遥感时,由于仪器权函数矩阵要随大气状态矢量本身变化的影响等原

因,使得在不同地区、不同天气条件下探测到的信息容量要发生变化.因此,为比较各仪器在不同大气条件下的观测信息容量,本文从 RTTOV 中选择了四条可代表全球不同区域、不同季节大气典型特征的温湿廓线,这四条廓线分别为赤道廓线(Tropical),亚极地夏天廓线(Sub Arctic Summer),中纬冬天廓线(Mid Latitude Winter),亚极地冬天廓线(Sub Arctic Winter).对于四条区域条廓线的温度与湿度取值分布,见图 8.

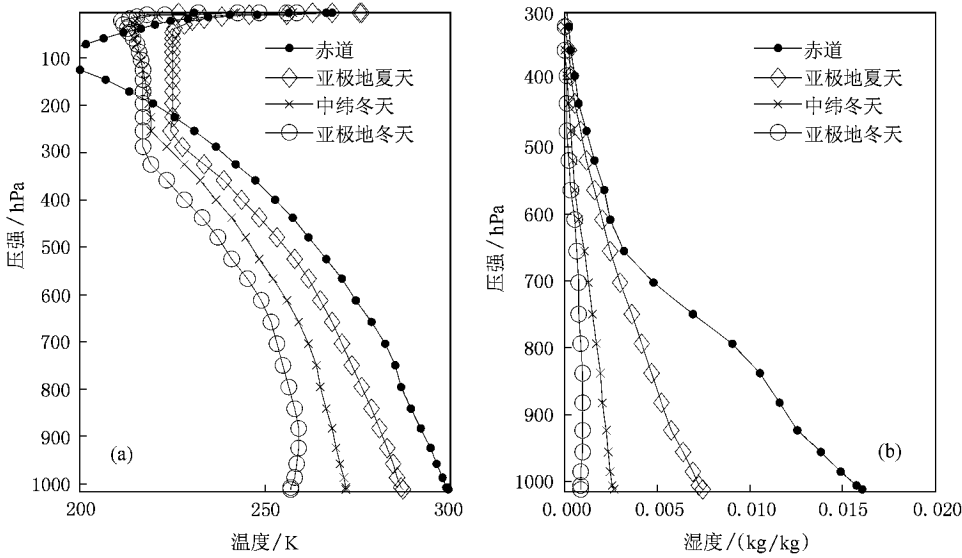


图 8 四个典型区域温湿廓线分布 (a)为温度分布 (b)为湿度(比湿)分布

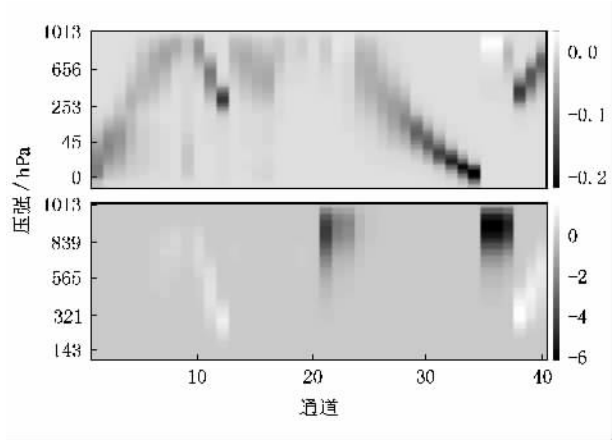


图 9 ATOVS 权函数矩阵(其中上部为温度权函数矩阵,右侧灰度条为权函数矩阵的取值,下部为湿度权函数矩阵,右侧灰度条为权函数矩阵的取值)

将四条廓线输入辐射传输模式 RTTOV 中的权函数矩阵模式,即可计算出各仪器的权函数矩阵.其中,当参考大气为赤道地区大气时,计算所得的各仪器权函数矩阵,分别见图 9—图 11.在图 9 中,通道

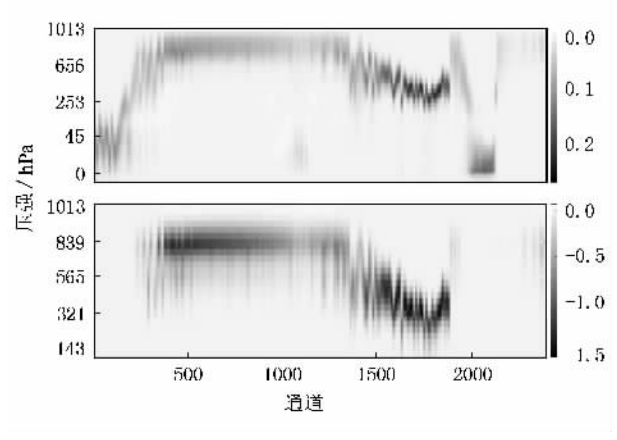


图 10 AIRS 权函数矩阵(各子图含义同图 9)

1—19 为 HIRS 的 19 个红外通道的权函数矩阵(由于 HIRS 的第 20 通道为可见光通道,不能直接对大气进行探测,因此在图中通道 20 处的权函数矩阵值用零填充),通道 21—40 为 AMSU 20 个通道的权函数矩阵.而对于利用其他三条参考大气廓线计算所得的权函数矩阵,由于篇幅关系,在文中未作显示.

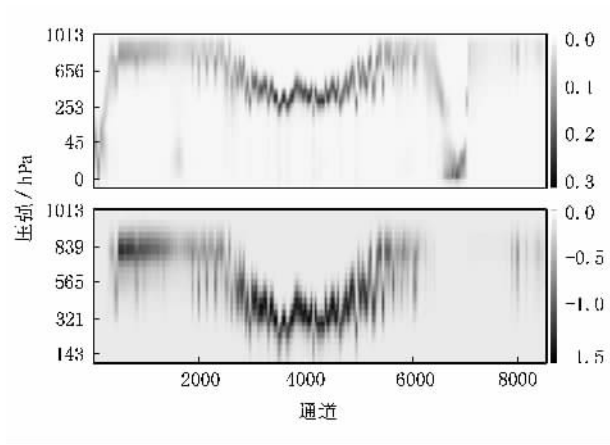


图 11 IASI 权函数矩阵(各子图含义同图 9)

5.4. 计算结果

利用上面计算所得的误差协方差矩阵与权函数矩阵,计算所得的四种仪器及三种组合关于温度和湿度的信息容量,分别见表 1 和表 2. 从表中可看出:

表 1 温度信息容量							
	AMSU	HIRS	ATOVS	IASI	IASI-300Ch	AIRS	AIRS-324Ch
赤道	12.0	6.9	13.0	64.0	46.9	58.3	50.0
亚极地夏天	11.9	6.7	12.7	60.4	44.7	55.6	48.4
中纬冬天	12.0	6.6	12.7	57.5	43.0	53.9	47.6
亚极地冬天	12.0	6.5	12.8	55.2	41.4	52.5	47.0

表 2 湿度信息容量							
	AMSU	HIRS	ATOVS	IASI	IASI-300Ch	AIRS	AIRS-324Ch
赤道	53.5	44.3	61.9	178.9	145.1	170.2	159.0
亚极地夏天	49.6	39.3	56.5	165.6	132.8	157.2	147.3
中纬冬天	45.1	35.3	50.6	152.2	121.8	145.2	136.1
亚极地冬天	43.6	32.5	48.8	142.2	110.3	136.6	127.3

3)ATOVS 所包含的温度信息容量和湿度信息容量要小于 AMSU 与 HIRS 两者各自信息容量之和,这主要是由于 AMSU 和 HIRS 包含有重复信息的原因.

4)采用合适的方法,从高光谱探测资料中选择出由一定数量通道所组成的通道子集,所包含的信息容量与原高光谱探测器所有通道包含的信息相差无几.如 AIRS-324Ch 子集中 324 个通道所包含的信息比 AIRS 的 2378 个通道的信息少不到 10%.这为在业务应用中高光谱资料的存储、大气廓线参数的

1)在所有仪器及组合中,无论所包含的温度信息容量还是湿度信息容量,由小到大均依次是 HIRS,AMSU,ATOVS,IASI-300Ch,AIRS-324Ch,AIRS,IASI.

2)在红外和微波的某些波段,由于水汽对辐射的吸收作用,使得其含量的变化对通道关于温度和水汽的敏感性产生影响,当水汽含量增加时,大气对辐射吸收的成份增加,通道关于温度和湿度的权函数增大.因此,在表 1 和表 2 中,由上到下,对应大气参考廓线由湿热到干冷,各仪器所包含的信息容量均依次减小.在两表中唯一例外的是 AMSU 仪器所包含的温度信息容量,其取值不随参考廓线水汽含量变化而增加或减小,基本取为 12.0.分析其原因,这主要是由于 AMSU 探测资料中,大气温度廓线的信息主要来自 AMSU-A 中 12 个 O₂ 吸收通道,因此 AMSU 中,水汽含量的变化对温度信息容量的大小无明显影响.

反演等领域进行通道选择提供了理论基础与选择指标.

6. 结 论

文中结合信息容量的概念,提出了一种对星载大气探测器所包含大气参数信息容量进行定量描述的方法.该方法充分考虑了仪器各通道对待反演参数的敏感性、各通道的观测误差特性以及初始猜测值的误差特性.利用该方法,对 AMSU,HIRS,AIRS,

IASI 四种仪器及三种组合所包含的关于大气温度、湿度的信息容量进行了计算. 从计算结果上看, HIRS ,AMSU ,ATOVS ,IASI-300Ch ,AIRS-324Ch ,AIRS , IASI 所包含的信息容量依次增加 ,此外 ,随着大气廓

线由湿热到干冷变化 ,各仪器所包含的信息容量依次减小. 该方法有望在星载大气探测仪器的设计、各仪器的评估与比较、探测资料的应用等领域有重要意义.

[1] Bouttier F , Kelly G 2001 *Quart . J . Roy . Meteor . Soc .* **127** 1469

[2] Andersson E , Hollingsworth A , Kelly G , Lönnberg P , Pailleux J , Zhang Z 1991 *Mon . Wea . Rev .* **119** 1851

[3] Li J , Wolf W , Menzel W , Zhang W , Huang H , Achtor T H 2000 *J . Appl . Meteor .* **39** 1248

[4] Meng Z , Sun Y , Dong Y 2002 *Proceedings of 53rd IAC and World Space Congress* p10

[5] Li J , Wang F 2004 *Proceeding of SPIE* **5658** 57

[6] Susskind J , Barnet C , Blaisdell J 2003 *IEEE Trans . Geosci . Remote Sens .* **41** 390

[7] Wu X , Li J , Zhang W , Wang F 2005 *Advan . Atmos . Sci .* **22** 647

[8] Rodgers C D 2000 *Inverse Methods for Atmospheres : Theory and Practice* (World Scientific Publishing) p240

[9] Rabier F , McNally A P 1998 *ECMWF Res . Dept . Tech . Memo .* **195** 1

[10] Cao X Q , Huang S X , Du H D 2008 *Acta Phys . Sin .* **57** 659 (in Chinese)[曹小群、黄思训、杜华栋 2008 物理学报 **57** 659]

[11] Xu B 2007 *Probability Theory and Mathematical Statistics* (Hangzhou : Zhejiang University Press) p189 (in Chinese)[许 冰 2007 概率论与数理统计(浙江大学出版社)第 189 页]

[12] Du H D , Huang S X 2008 *Acta Phys . Sin .* **57** 7685 (in Chinese) [杜华栋、黄思训 2008 物理学报 **57** 7685]

[13] Li J , Huang S X 2001 *Sci . China D* **31** 70 (in Chinese)[李 俊、黄思训 2001 中国科学 D **31** 70]

[14] Chevallier F 2000 *NWP-SAF report* **1** 1

[15] Eyre J R , H M Woolf 1988 *Appl . Opt .* **27** 3244

[16] Eyre J R 1991 *ECMWF Res . Dept . Tech . Memo .* **176** 1

[17] Rayer P J 1995 *Appl . Opt .* **34** 7387

[18] Rizzi R , Matricardi M 1998 *Quart . J . Roy . Meteor . Soc .* **124** 1293

[19] Saunders R , Matricardi M , Brunel P 1999 *ECMWF Res . Dept . Tech . Memo .* **282** 1

[20] Matricardi M , Chevallier F , Tjemkes S 2001 *ECMWF Res . Dept . Tech . Memo .* **345** 1

Study of the information content contained in remote sensing data of atmosphere^{*}

Du Hua-Dong[†] Huang Si-Xun[‡] Fang Han-Xian Long Zhi-Yong Wang Yong-Qi

(*Institute of Meteorology , University of Science and Technology of People 's Liberation Army , Nanjing 211101 , China*)

(Received 20 February 2009 ; revised manuscript received 10 April 2009)

Abstract

By introducing the concept of information content and using Bayesian estimation theory , a scheme for calculating information contents in temperature , humidity , O_3 , SO_2 , CH_4 and other atmospheric parameters in the remote sensing data is given . The scheme takes into account the channel sensitivity to the atmospheric parameters , the observation error of each channel as well as the error characteristics of the background atmosphere . The temperature and humidity information contents in the observation of HIRS , AMSU , AIRS , IAIS and three combinations of the instruments are calculated using the scheme . The results show that the scheme may have valuable applications in instrument designing , evaluating and comparing different instruments and usage of remote sensing data etc .

Keywords : remote sensing data of atmosphere , information content , weight matrix

PACC : 9260Y , 9265D , 4262E

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40775023) , the Scientific Foundation for Doctor of University of Science and Technology of People 's Liberation Army , China , the Foundation of Key Laboratory of Meteorology Disaster of Jiangsu Province , China (Grant No. KLM0606) and the Advanced Research Foundation for National Major Utility Technology of China (Grant No. GYHY200806029) .

[†] E-mail : dhd_1979@yahoo.com.cn

[‡] E-mail : huangexp@yahoo.com.cn