

晴空时大气红外遥感及其反演问题研究

II. 反演试验研究

李 俊 曾庆存

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 前文给出了卫星红外观测资料的反演处理方法, 并对方法作了理论上的分析, 在本文中, 我们将此方法应用到 TOVS、GOES-8 实际资料及 AIRS 模拟观测资料处理中并重点对 TOVS 资料进行试验。在反演中, 我们将大气温度廓线和水汽混合比 (lnq) 廓线用各自的经验正交函数 (EOF) 表示以提高反演的稳定性并缩短计算时间, 同时采用一种过滤操作以加速迭代的收敛速度。除了用本文提出的方法对 TOVS 资料进行处理外, 还用国际 TOVS 处理软件包 (ITPP-4.0) 对同样的资料进行反演。试验表明, 本文方法的反演结果优于 ITPP 的结果。AIRS 模拟反演结果表明, 高分辨率红外垂直探测器的遥感精度能够达到温度 1 K、水汽 10%。

关键词 红外遥感 反演

1 引言

自 60 年代美国发射第一颗气象卫星至今, 卫星红外遥感技术取得了很大的发展, 特别是在大气垂直探测仪器的研制上。目前业务上使用的大气垂直探测器主要是能够提供全球资料的装载在 NOAA 系列卫星上的 TIROS-N 业务垂直探测器, 简称 TOVS, 它主要包括高分辨率红外辐射探测器 (HIRS) 和微波探测器 (MSU)^[1], 用于遥感大气温湿廓线及云参数, 臭氧总含量等。TOVS 装载在系列卫星 NOAA-6, NOAA-7, ..., NOAA-14, 奇偶号一对卫星构成双星观测系统。奇数号为上行卫星, 于下午 3 时左右由南向北通过赤道, 偶数号为下行卫星, 于上午 9 时左右由北向南穿过赤道。目前由 NOAA-12, NOAA-14 提供全球性的实时观测资料。HIRS 波段分布在 $3.7 \sim 15 \mu\text{m}$ 之间, 共 19 个通道。MSU 波段位于 $50 \sim 60 \text{ GHz}$ 的 O_2 吸收带, 共有 4 个通道。HIRS 及 MSU 的星下点视场分别是直径 17.4 和 109.3 km 的圆, 其扫描宽度为 2220 及 2347 km。

另外, 美国地球静止卫星——地球静止业务环境卫星 (GOES) 上也装有类似于 HIRS 的红外垂直探测仪器, 目前 GOES-8 提供包括美国在内区域的实时资料, GOES-8 在提供实时资料以前, 被称为 GOES-1/M^[2]。和 HIRS 相比, GOES-8 的水平方向分辨率大为提高, 为星下点 8 km, GOES-8 有 18 个红外通道。

在今后几年内, TOVS 将发展成先进的 TOVS (ATOVS), 其显著的改进将是先进的微波探测器 (AMSU) 及微波湿度探测器 (MHS) 来代替目前的 MSU。AMSU

和 MHS 共有 20 个通道。

另一类仪器是未来几年将要安装到卫星或极轨平台上的先进的高分辨率红外垂直探测器, 其中大气红外探测器 (AIRS) 是代表, AIRS 是光栅式分光计, 连同 AMSU 及 MHS^[3]将在下个世纪初作为地球观测系统 (EOS) 的一部分安装在极轨平台上。AIRS 的光谱覆盖区为 3.7~15.4 μm , 具有同时探测和实时向地面传送 2400 个光谱通道测量值的能力, 其地面分辨率为 15 km, 光谱分辨率为 $\nu/\Delta\nu=1200$ 。AMSU 有 15 个通道, 分布在 23~89 GHz, MHS 有 5 个通道, 分布在 89~190 GHz。由于 AIRS 具有高测量精度和高光谱分辨率的特点, 因此具有观测大气精细尺度温湿结构的能力。

前面一文^[4]给出了卫星红外观测资料的反演处理方法, 包括牛顿非线性迭代法和权重函数的计算方法, 并指出了水汽遥感的两个特点。本文将此方法应用到 TOVS、GOES-8 实际观测及 AIRS 模拟观测资料的反演处理中, 为了提高反演的稳定性, 我们将大气温度廓线和水汽混合比 ($\ln q$) 廓线用各自的 EOF 表示以减少反演参数, 同时采用一种过滤操作以加速迭代的收敛速度。在 TOVS 反演试验中, 我们还引入了地面观测资料。除了用本文提出的方法对 TOVS 资料进行处理外, 还用国际 TOVS 处理软件包 4.0 版本^[5]对同样的资料进行反演, 并将两种反演结果与无线电探空仪观测资料 (RAOB) 进行比较, 得到各自温度和露点温度的均方根偏差 (RMSD)。试验结果表明, 本文方法的反演结果优于国际 TOVS 处理软件包 4.0 版本的结果。AIRS 模拟反演结果表明, 高分辨率红外垂直探测器的遥感精度能够达到现代数值天气预报的要求, 即温度 1 K、水汽 10%。

2 附加信息: 地面观测资料的引入

附加信息, 例如常规地面观测资料, 能很容易地加入到反演过程中, 它对提高反演精度, 主要是近地面温度、水汽有一定帮助, 特别在初始猜值较差的情况下。为了将地面观测资料加入到反演中, 我们在求解方程组 (线性化形式) 后增加如下两个方程:

$$T_{\text{ob}} - T^0(P_s) = \sum_{j=1}^{2L-1} w_j^{T_{\text{ob}}} \delta x_j, \quad (1)$$

其中

$$w_j^{T_{\text{ob}}} = \begin{cases} 1 & \text{如果 } j \leq L \text{ 并且 } P(j) = P_s \\ 0 & \text{其他} \end{cases},$$

以及

$$\ln q_{\text{ob}} - \ln q^0(P_s) = \sum_{j=1}^{2L-1} w_j^{q_{\text{ob}}} \delta x_j, \quad (2)$$

其中

$$w_j^{q_{\text{ob}}} = \begin{cases} 1 & \text{如果 } j > L \text{ 并且 } P(j-L_s) = P_s \\ 0 & \text{其他} \end{cases},$$

T_{ob} 和 q_{ob} 分别代表地面温度和水汽混合比观测值。

3 反演稳定性的提高—— T 、 $\ln q$ 的 EOF 表示

由于大气变量特别是温度场和水汽场存在自相关性, 因此仅需一些有限的相互独立

的变量就能代表大气温度结构和大气水汽结构的变化^[6], 其用来表示大气温度或水汽结构变化的独立的结构函数可以从大量的大气观测样本 (例如无线电探空仪资料·RAOB 资料) 中得到。本文研究中采用 TOVS 初始猜值反演 (TIGR)^[7]数据集计算出来的经验正交函数或特征向量。

假定 TIGR 中温度的协方差矩阵为 C_T , 其特征值为 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_L \geq 0$, 则

$$\sum_{i=1}^L \lambda_i = \sum_{i=1}^L \overline{(T'_i)^2} = \sigma_T^2. \quad (3)$$

其中 T'_i 是 P_i 层上温度对均值的偏差, 假定反演中允许的最大误差为 ΔT , 并且只用前 $\tilde{L}_T$ 个 EOF 来表示温度廓线, 则只要满足条件

$$\sigma_T^2 - \sum_{i=1}^{\tilde{L}_T} \lambda_i \leq L(\Delta T)^2 \quad (4)$$

温度的均方根误差将不会超出 ΔT , 也就是说前 $\tilde{L}_T$ 个 EOF 在精度 ΔT 内可以表示 $T(p)$ 。

用 EOF 来表示大气温度廓线和水汽廓线可以使要反演的变量数大为减少, 假定

$$\delta X = \Phi A, \quad (5)$$

其中 $A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M)$,

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_T & 0 & 0 \\ 0 & \Phi_q & 0 \\ 0 & 0 & \Phi_{T_s} \end{bmatrix}$$

Φ_T 是由前 $\tilde{L}_T$ 个温度 EOF 组成的 $L \times \tilde{L}_T$ 矩阵, Φ_q 是由前 $\tilde{L}_q$ 个水汽混合比 (lnq) EOF 组成的 $L \times \tilde{L}_q$ 矩阵, $\Phi_{T_s} = 1$ 。显然,

$$\Phi^T \Phi = I, \quad (6)$$

其中 I 为单位矩阵。

因此目标函数将变为

$$J(A) = \delta Y^T E^{-1} \delta Y + \gamma A^T B_A^{-1} A, \quad (7)$$

其中

$$B_A^{-1} = \Phi^T B^{-1} \Phi. \quad (8)$$

定义 $\tilde{F} = F \cdot \Phi$, 则根据本文第 1 部分^[4]方程(5)、(8)和(10)的方法, 我们得到另外一种迭代形式

$$A_{n+1} = (\tilde{F}_n^T \cdot E^{-1} \cdot \tilde{F}_n + \gamma B_A^{-1})^{-1} \cdot \tilde{F}_n^T \cdot E^{-1} \cdot (\delta Y_n + \tilde{F}_n \cdot A_n), \quad (9)$$

以及

$$\delta X_n = \Phi A_n. \quad (10)$$

对于低分辨率红外垂直探测仪器 (例如 TOVS, GOES-8), 由于不能分辨大气温度、水汽垂直分布的细微结构, 因此只要有限的几个 EOF 就可以了, 对于 TOVS 和 GOES-8 来说, 假定允许的误差为 $\Delta T = 1.5$ K, 则大约 6~7 个温度 EOF 就够了, 同样, 假定 $\Delta \ln q = 20\%$, 则 3~4 个水汽混合比 (lnq) EOF 就能表示水汽垂直结构的变

化,也就是说,用19个红外通道(HIRS)和4个微波通道(MSU)来反演10个左右相互独立的大气参数,这样就大大地提高了反演稳定性;对于高分辨率红外垂直探测器来说,由于有几千个通道,大气温度廓线和水汽廓线可以不用EOF表示,但为了减少反演计算时间,特别是减少求逆矩阵计算时间,用EOF表示温度和水汽廓线可以使要求逆的矩阵的维数大为减少,当然,在减少计算时间的同时也提高了反演的稳定性。另外,由于高分辨率红外垂直探测仪器能分辨大气温湿垂直分布的比较细微的结构,因此可以用较多一些EOF来表示大气温湿廓线,例如对于AIRS,假定可允许的误差为 $\Delta T=1.0$,则大约可用11~13个温度EOF来表示温度,同样假定 $\Delta \ln q=10\%$,则可用7~9个水汽混合比($\ln q$)的EOF来表示水汽变化。另外,在实际反演中,如对样本资料进行分类,从而得到不同季节,不同区域的EOF,则用起来效果会更好些。

4 加速迭代收敛的方法——过滤操作

协方差矩阵 B_A^{-1} 和 E^{-1} 有时并不能完全反映观测空间或变量空间中各分量之间的权重和尺度,甚至相关性^[8],因而会导致迭代求解过程中收敛速度慢,如果选用一个合适的对角形尺度因子矩阵来对其进行过滤操作,会使迭代收敛速度得到提高。假定 P_A^{-1} 是对 A 的尺度因子矩阵, P_Y^{-1} 是对 Y 的尺度因子矩阵,则迭代方程(9)变为

$$A_{n+1} = (\tilde{F}_n^T \cdot P_Y^{-1} \cdot E^{-1} \cdot \tilde{F}_n + \gamma P_A^{-1} \cdot B_A^{-1})^{-1} \cdot \tilde{F}_n^T \cdot P_Y^{-1} \cdot E^{-1} \cdot (\delta Y_n + \tilde{F}_n \cdot A_n). \quad (11)$$

通常情况下, E^{-1} 能较好地反映各通道在反演过程中的权重,因此取 $P_Y^{-1} = I$ 。 P_A^{-1} 的选取对收敛速度有很大影响,试验结果表明,当 P_A 取 $J(A)$ 对 A 的二阶导数矩阵即Hessian矩阵的对角线时,迭代收敛速度能得到明显加快,显而易见,计算 $J(A)$ 对 A 的二阶导数比较复杂,在业务上不实用,本文试验结果表明,用EOF方差也就是特征值之倒数所组成的对角形矩阵来作为尺度因子矩阵 P_A^{-1} ,同样能起到加速迭代收敛的作用。这种处理方法有明显的物理意义,由于第一个EOF的特征值最大,其倒数最小,表示给第一个EOF在求解反演过程中变化的约束最小,或者说第一个EOF在反演中的自由度最大,第二个EOF次之,以此类推。在不用尺度因子矩阵时,一般要迭代4~5次才收敛,加了尺度因子矩阵 P_A^{-1} 后,一般只要2~3次就收敛了。

5 初始猜值的获取——统计反演法及试验

前面讲到的牛顿迭代法是一种物理反演法,即从大气辐射传输方程的物理本质出发来求解。另外一种办法是不考虑大气辐射传输过程的物理特性,而通过大量的观测样本来建立起卫星观测与大气分布之间的对应关系,并用于业务反演。在反演中常用的统计方法有两种,第一种方法是同时积累大量的无线电探空仪观测资料(温度垂直分布、水汽垂直分布等)以及相对应的卫星遥感观测值,直接建立大气温度、水汽与卫星观测值之间的对应关系,该方法的优点是对应关系直接简单,缺点是回归系数会受到卫星实测资料噪声的影响,而且30 hPa以上无线电探空仪资料有时误差较大,这都会给反演精

度带来影响,因此通常采用另外一种统计回归法,即首先得到大量的大气温度、水汽等垂直分布的资料,其资料应有代表性,基本上应能包括全球不同区域、不同季节下的大气参数分布特别是温度和水汽的垂直分布的情况,然后利用辐射传输方程对每一条大气廓线都算出所有通道上的亮度温度值,加上仪器噪声作为卫星观测到的亮度温度,再建立相对应的统计回归关系,求出回归系数,并利用其回归系数进行反演。一般来说,统计反演法求解过程比较稳定,但由于反演本身并不考虑大气辐射传输过程的物理本质,因此反演精度会受到影响。不过统计反演的结果可以作为物理反演过程的初始猜值。

6 反演实际试验(一)——TOVS

卫星资料和其他资料是通过人机交互数据获取系统(MelDAS)来显示和处理的,我们取 NOAA-11 和 NOAA-12 覆盖美国区域的 TOVS 资料,具体覆盖区是从北边的美国-加拿大边境到南面的美国-墨西哥边境。

反演处理过程包括从美国国家气象中心(NMC)的 NGM 模式预报中产生初始猜值。根据方程(9)或(11),反演过程需要下列资料和参数:TOVS 亮度温度,卫星观测误差协方差矩阵,初始猜值及其误差协方差矩阵。其中亮度温度包括 HIRS 19 个通道和 MSU 4 个通道的亮度温度值,有云时的资料已作晴空订正^[9]。假定各通道的观测误差相互独立,并且观测误差协方差矩阵中还包含了 0.2 K 的模式误差。初始猜值是 NMC 模式的结果,其温度垂直层次为 10, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 700, 850, 1000 hPa 15 层,水汽分层为 300, 400, 500, 700, 850, 1000 hPa 6 层,这些层上的温度和水汽被线性内插到 TOVS 反演廓线的 40 层上。另外,根据卫星经过的时间,将 NGM 预报产品内插到该时间,例如,假定卫星过境时间为 13UTC,则将 NGM 0 点开始的 12 小时预报和 18 小时预报进行内插得到 13 点的预报产品。

虽然初始猜值的误差协方差矩阵可以从 RAOB 和 NGM 模式的比较中得到,但该矩阵时空变化性较大,为了业务上使用方便,我们简单假定各层的误差相互独立,其标准偏差为

4 K², 对每一层温度;

25%, 对每一层水汽;

9 K², 对表层温度。

对于 TOVS, GOES-8 这样低分辨率垂直探测器资料,由于通道较少,反演不稳定性较大,因此需要在反演过程中给予较强的控制, γ 可取 10⁻¹ 量级,而对于高分辨率红外垂直探测器如 AIRS 资料,由于通道较多,反演不稳定性较小,应在反演过程中给予较小的控制, γ 取 10⁻³ 量级。进一步分析可以看出 γ 的物理意义,以方程(9)为例,显然当 $\gamma \rightarrow \infty$ 时,则反演结果即为初始猜值。因此在高分辨率红外垂直资料处理时,应尽量利用卫星观测资料提供的信息, γ 应适当取小的值。

另外,根据第 4 节提到的那样,利用 EOF 的特征值倒数作尺度因子矩阵。EOF 从 TIGR 中得到。在利用 RAOB 作标准进行反演结果比较时,有两个参数很重要,第一是 RAOB 与卫星观测资料之间的时间差,第二是两者之间的水平距离。卫星经过美国

时与 RAOB 有 2~3 小时的时间差距, 在进行比较时两者水平距离取 1 经纬度(大约 110 km)。我们取 7 次 TOVS 资料, 这些资料是用来进行 TOVS 风场研究的^[10]。

图 1 是所有 7 次资料的温度反演 RMSD 统计结果, 图 2 是相应露点温度(水汽)反演的 RMSD 统计结果, 显然, 不管是温度还是水汽, 新的反演方法和 ITPP 的反演方法相比, 反演精度有明显提高。

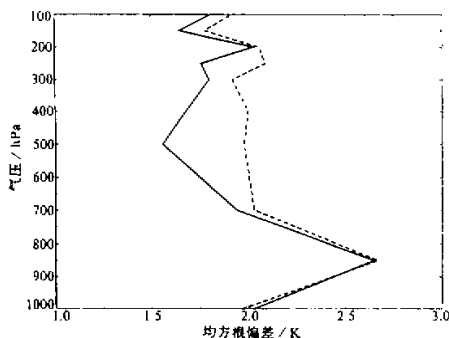


图 1 所有 7 次卫星轨道的 TOVS 观测资料温度反演 RMSD 统计结果, 共 349 次比较, 虚线代表 ITPP4.0 的反演结果, 实线代表新方法的反演结果

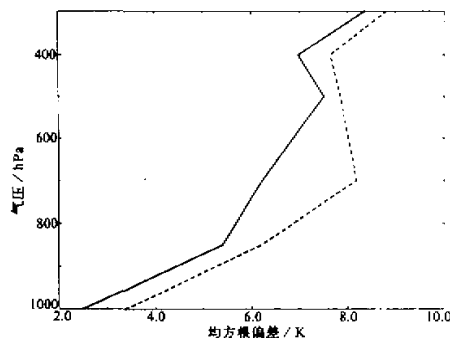


图 2 所有 7 次卫星轨道的 TOVS 观测资料露点温度反演 RMSD 统计结果, 共 349 次比较, 虚线代表 ITPP4.0 的反演结果, 实线代表新方法的反演结果

7 反演实际试验 (二) ——GOES-8

上一节给出了 TOVS 的实际观测资料反演结果, 并从统计意义上说明本文反演方法对反演精度的提高。本节对另一种低分辨率红外垂直探测器 GOES-8 的实际观测资料进行反演, 我们将侧重点放在反演廓线与 RAOB 廓线的比较上, 另外对反演前后的亮度温度剩余值进行比较和分析。

GOES-8 仪器是安装在新一代地球静止卫星上的, 覆盖区域大部分是北美地区, 其通道性能和 HIRS 类似, GOES-8 是 1994 年 4 月发射的, 同年 6 月 4 日开始向地面传送实际红外通道观测值。

图 3 是 6 月 6 日 GOES-8 第一条温度反演廓线, 图 4 是相应的水汽廓线, 地点在麦迪逊, 其中 RAOB 是格林贝站的, 距麦迪逊有上百公里, GOES-8 观测时间与 RAOB 观测时间有 2 小时的时差。从图 3 和 4 可以看到, GOES-8 的反演结果与 RAOB 观测结果很相近。

我们再来研究一下在反演前后 $Y'' - Y(X)$ 的变化, 在我们的求解反演中, 目的是要得到 X 使 $Y(X)$ 与 Y'' 尽可能接近, 即所谓辐射量吻合。表 1 是 GOES-8 麦迪逊反演前后亮度温度剩余值的变化, 其中 TBBO 是实际观测到的亮度温度, CH 是通道序号, USE 列中“1”表示在反演中使用该通道, “0”表示在反演中不用该通道。由于最后 4 个通道仪器噪声较大, 同时受到太阳反射部分的影响, 因此在反演中没有使用这几个通道。

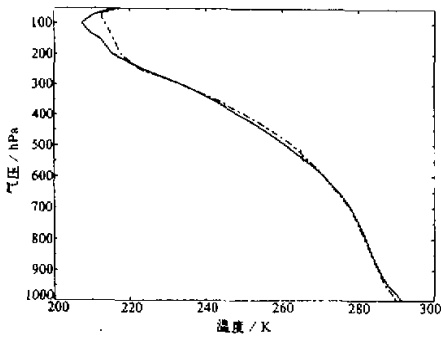


图3 GOES-8 第一条温度反演
廓线及与 RAOB 的比较
实线代表反演廓线，
点划线代表 RAOB 廓线

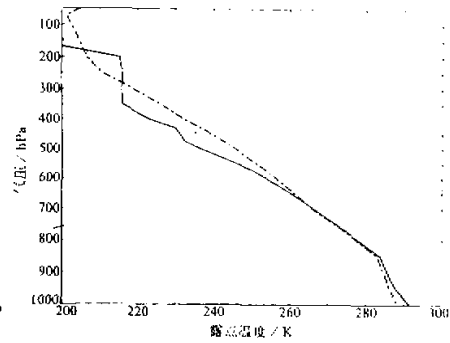


图4 GOES-8 第一条露点温度反演
廓线及与 RAOB 的比较
实线代表反演廓线，
点划线代表 RAOB 廓线

从表 1 中可以看到各个通道其亮温剩余值在反演后普遍减少，通道 8（窗区通道）仍呈现较大的亮温剩余值，说明其表层温度反演仍有调整的空间或余地。

表 1 GOES-8 反演前后亮度温度剩余值的变化

CH	TBBO	反演前剩余值	反演后剩余值	USE
1	255.53	-0.6314	0.2436	1
2	222.26	-0.8312	0.4894	1
3	235.22	-0.8154	-0.3838	1
4	252.52	-0.2730	0.1166	1
5	263.93	-1.5553	-0.5228	1
6	284.28	-1.4527	0.7407	1
7	288.28	-0.8431	0.1242	1
8	289.33	-0.8877	-0.9987	1
9	260.38	1.5327	0.0586	0
10	261.49	-1.9798	-0.3707	1
11	253.77	-1.3208	0.4958	1
12	233.95	-3.4818	-0.3752	1
13	277.30	3.3178	-1.1233	1
14	261.60	2.2622	0.4455	1
15	237.46	-1.7341	-1.7961	1
16	284.61	1.8579	-6.1772	0
17	296.60	6.8681	-3.8495	0
18	302.63	12.2938	3.2377	0

8 反演模拟试验——AIRS

对 TOVS 和 GOES-8 实际观测资料进行了反演试验，这两种资料都是低分辨率垂直探测资料。本节对高分辨率的红外垂直探测资料进行了试验，由于高分辨率的垂直探

测仪器一般要若干年以后才能装在卫星或极轨平台上,例如 AIRS 要到 2000 年以后,因此目前除了 HIS 能提供飞机观测资料外,没有其他高分辨率红外垂直探测器的实际观测资料。这里我们先作一些模拟反演研究,在下文中会对 HIS 的实际观测资料进行反演分析。利用 NASA 提供的模拟的 AIRS Flat-test 观测资料(已包含观测误差)进行反演,反演的初始猜值是统计回归的反演结果,在 AIRS 试验中大气从 1~1050 hPa 分成 66 层,所用的通道是 Susskind 选出的 220 个最优通道。我们用 NASA 提供的模拟观测资料 F4C 进行反演试验,F4C 只提供 Level 1(亮度温度)资料,我们将反演结果做好后送到 NASA,然后由 AIRS 工作组的专门人员将反演结果与真实廓线比较,得到统计结果,并将此结果返回给我们。

由于我们在反演时不知道答案,因此 F4C 的结果令人感兴趣,因为它能真正反映反演算法的可靠性。图 5 是 F4C 76 条大气廓线的温度反演结果,其温度总的误差由初始猜值的 1.397 K 降到反演后的 0.927 K,小于 1 K,图 6 是 F4C 的水汽反演误差统计结果,水汽总的误差由反演前的 18.66% 降到反演后的 8.167%,好于 10%,这说明本文反演算法是可行和可靠的。值得指出的是,在 TOVS 资料反演处理中,我们用 HIRS 和 MSU 资料同时反演大气参数,而在 AIRS 资料试验中,我们并没有用到 AMSU 和 MHS。如果将 AIRS, AMSU 和 MHS 一起使用来反演大气参数,其结果还会更好,特别对于高层温度反演。

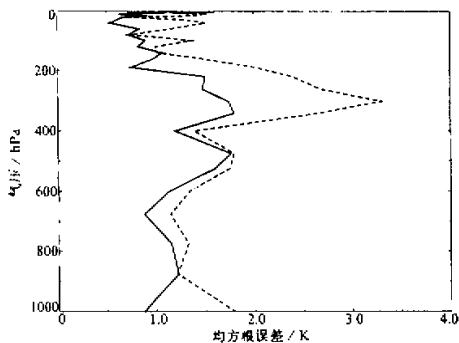


图 5 AIRS F4C 温度反演的 RMSE 统计结果,共 76 条廓线
虚线代表初始猜值的 RMSE 分布,
总的 RMSE=1.397 K,
实线代表反演的 RMSE 分布,
总的 RMSE=0.927 K

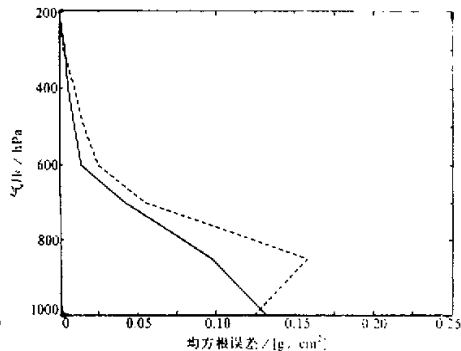


图 6 AIRS F4C 水汽混合比反演的 RMSE 统计结果,共 76 条廓线
虚线代表初始猜值的 RMSE 分布,总的 RMSE =
0.251 g/cm²,总的百分比误差为 18.66%,
实线代表反演的 RMSE 分布,总的 RMSE =
0.110 g/cm²,总的百分比误差为 8.167%

9 结论

(1) 大气温度和水汽廓线用各自的经验正交函数的线性组合表示,减少了要反演的参数,提高了了解的稳定性,同时减少了反演计算时间。

(2) 和线性迭代法 (例如 ITPP 的方法) 相比, 牛顿非线性迭代法能提高反演精度。

(3) 高分辨率红外垂直探测仪器 AIRS 模拟反演结果表明, 其遥感精度能够达到未来数值天气预报的要求, 即温度反演误差小于 1 K、水汽反演误差小于 10%。

(4) 利用统计反演法可以为牛顿非线性迭代法提供比较稳定和可靠的初始猜值。

参 考 文 献

- 1 Smith, W.L., H.M. Woolf, C.M. Hayden, D.Q. Wark and L.M. McMillin, 1979, TIROS-N operational vertical sounder, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **60**, 1177~1187.
- 2 Koenig, E.W., 1989, Characteristics of the GOES I-M imager sounder, *Proceedings of the GOES I-M Operational Satellite Conference*, Crystal City, 168~175.
- 3 Aumann, H.H. and R.J. Pagano, 1994, Atmospheric infrared sounder on the earth observing system, *Optical Engineering*, **33**(3), 776~784.
- 4 李俊、曾庆存, 1997, 晴空时大气红外遥感及其反演问题研究, I. 理论研究, *大气科学*, **21**, 1~9.
- 5 Smith, W. L. et al., 1985, The simultaneous export retrieval package, *Tech. Proc. 2nd International TOVS Study Conf. Igls*, Australia, 18-22 Feb. 1985, report of CIMSS, University of Wisconsin-Madison, 224~253.
- 6 曾庆存, 1974, 大气红外遥测原理, 北京: 科学出版社, 1~174.
- 7 Chedin, A. et al., 1985, The improved initialization inversion method: a high resolution physical method for temperature retrievals from the TIROS-N series, *J. Climate Appl. Meteorol.*, **24**, 128~143.
- 8 Lorenc, A.C., 1992, Iterative analysis using covariance functions and filters, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **118**, 569~591.
- 9 McMillin, L.M. and C. Dean, 1982, Evaluation of a new operational technique for producing clear radiances, *J. Appl. Meteorol.*, **21**, 1005~1014.
- 10 Achtor, H.T., J. Li and N. Nalli, 1993, A comparison of satellite derived thermal-gradient winds and radiosonde winds at mandatory atmospheric levels, A proposal from CIMSS, University of Wisconsin-Madison, 1~25.

Infrared Remote Sensing of Clear Atmosphere and Related Inversion Problem. Part II: Experimental Study

Li Jun and Zeng Qingcun

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The inversion method was described in part I of this paper for retrieval of the atmospheric parameters from satellite observed infrared radiances under clear conditions. In this part, the method is applied to the real satellite observed and simulated data, especially to the TIROS-N Operational Vertical Sounder (TOVS) data. The atmospheric temperature and water vapor mixing ratio profiles, are expressed as a linear combination of their Empirical Orthogonal Functions (EOFs) in order to improve the stability of inversion procedure and reduce the computation time. Also, a filtering operation is used to speed up the iterative convergence. The Root Mean Square Deviation (RMSD) between retrieval and radiosonde observations is compared with that between International TOVS Processing Package (ITPP4.0) retrieval and radiosonde observations. Experiments show that the new method is superior to the ITPP version 4.0 schemes.

Key words infrared remote sensing retrieval