

卫星区域大气探测业务处理系统

董超华 张凤英 郑波 冉茂农
吴保锁 罗东风 刘全华 黎光清

(国家气象局卫星气象中心)

提 要

本文简要介绍目前卫星区域大气探测资料业务处理系统的软件结构、算法和生成的产品。将系统处理结果与常规观测值作比较分析的结果表明:大气温度反演平均均方根误差为 2.15°C ,水汽混合比平均均方根误差为 1.47g/kg ,层平均厚度误差为 21.4 位势米,臭氧总含量均方根误差约为 10% (Dobson),长波辐射通量均方根误差约为 1.7w/m^2 。

一、引 言

大气探测是气象卫星主要观测项目之一;它利用大气吸收带边缘的辐射遥感值,获取大气温度和大气组成成份垂直分布的信息等。一九七八年开始的美国 TIROS-N/NOAA 新一代系列气象卫星装载了微波探测器(MSU),并对获取温度垂直廓线的红外辐射计进行了改进,使定量资料的处理和应用又向前推进了一步。

我国已逐步建立起气象卫星资料地面处理应用软件系统。1985年一个具有初步的脱机处理能力的区域大气探测资料处理软件系统在卫星气象中心形成。

目前,大气探测资料处理软件已在 IBM4381 计算机的 MVS 操作系统环境下实时处理北京、广州和乌鲁木齐三站接收的 TIP/HRPT 资料,生成大气温度和湿度层结、臭氧总含量和长波辐射通量等产品,成为 FY-1 气象卫星资料处理应用软件和系统的重要组成部分。

二、数据处理流程

垂直探测资料(TOVS)业务处理软件系统主要由四个主处理模块和四个辅助处理模块组成,共约五万条程序语句。主处理模块有:TOVS 预处理、大气效应订正、科学计算(反演)和用户产品生成等;辅助处理模块包括:卫星和探空资料匹配、匹配样本筛选、统计样本确定和新系数生成及评价。在处理系统中,数据文件联结着每一个模块,前一个处理模块的输出数据是后一个处理模块的输入数据。

表1 TOVS 光谱通道特性

HIRS	中心频率 (cm^{-1})	中心波长 (μm)	半功率带 宽(cm^{-1})	主要吸 收成份	峰值能量贡献 高度(hPa)	主要探测 目的
1	668	15.00	3	CO_2	30	大气温度的 垂直分布
2	679	14.70	10	CO_2	60	
3	691	14.50	12	CO_2	100	
4	704	14.20	16	CO_2	400	
5	716	14.00	16	CO_2	600	
6	732	13.70	16	$\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$	800	
7	748	13.40	16	$\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$	900	
8	898	11.10	35	窗区	表面	表面温度
9	1028	9.70	25	O_3	25	臭氧总含量
10	1217	8.30	60	H_2O	900	水汽的垂直分布
11	1364	7.30	40	H_2O	700	
12	1484	6.70	80	H_2O	500	
13	2190	4.57	23	N_2O	1000	大气温度的 垂直分布
14	2213	4.52	23	N_2O	950	
15	2240	4.46	23	$\text{CO}_2/\text{N}_2\text{O}$	700	
16	2276	4.40	23	$\text{CO}_2/\text{N}_2\text{O}$	400	
17	2361	4.24	23	CO_2	5	
18	2512	4.00	35	窗区	表面	表面温度
19	2671	3.70	100	窗区	表面	
20	14367	0.70	1000	窗区	表面	表面反照率
MSU	中心频率 (GHz)	通道带宽 (MHz)	主要吸收 成份	峰值能量贡 献高度(hPa)	主要探测 目的	
1	50.31	200	窗区	表面	表面放射率	
2	53.73	200	O_2	700	大气温度的 垂直分布	
3	54.96	200	O_2	300		
4	57.95	200	O_2	90		
SSU	中心频率 (cm^{-1})	中心波长 (μm)	吸收池压力 (hPa)	主要吸 收成分	权重函数峰 值高度(hPa)	主要探测 目的
1	668	15.00	100	CO_2	15	平流层的温度 分布
2	668	15.00	35	CO_2	5	
3	668	15.00	10	CO_2	1.5	

送到地面。目前我们在做大气参数反演时,只需对高分辨红外探测器 2 型(HIPS-2)、微波探测器(MSU)和平流层探测器(SSU)三种仪器(又称 TIROS 业务垂直探测器—TOVS)的探测数据做处理。TOVS 光谱通道特性由表 1 给出。在资料处理过程中,首先要在这三种仪器资料从 TIP 数据流中分离出来,同时对这些数据进行观测时间和误码等质量检验。

(2) 辐射定标

当气象卫星在轨道上运行时,星上仪器沿垂直于轨道的方向向轨道两侧获取来自地球大气、星体内标准黑体及外层空间的辐射信息,这些信息最初是电压计数值。为了得到辐射靶面的辐射能量,必须设法建立电信号计数和辐射能量之间的对应关系。定标方法有线性⁽¹⁾和非线性⁽²⁾两种。简化处理时,通常采用下列线性定标公式:

$$A = N_c - BC_c \quad (1)$$

$$B = \frac{N_c - N_b}{C_c - C_b} \quad (2)$$

式中, N_c (实际为零) 和 N_b 分别为冷空间和星体内标准暖黑体的辐射值, C_c 和 C_b 分别为冷空间和暖黑体相应的电压计数输出值, A 和 B 为要求的辐射定标系数。 N_b 可由黑体温度按 Planck 函数计算得到, C_c 和 C_b 由探测器分别对目标物扫描得到, 因此, A 和 B 就可通过以上两式计算得到。

应用系数 A 和 B 于地球视场电压计数值 C_e , 便可得到相应的辐射率值(或亮度温度 T_e):

$$N_e = A + BC_e \quad (3)$$

为了保证辐射定标精度, 系数 A 和 B 则要不断进行更新。

(3) 扫描点定位

根据某时刻卫星的位置、扫描角和卫星姿态计算出星载仪器每个扫描点在地球表面上的位置, 即地理经、纬度。其中, 卫星的位置利用美国气象部门通过 GTS 线路发送的初始卫星轨道根数确定。

对扫描点定位涉及多种坐标系(例如, 惯性坐标系、轨道坐标系、扫描器坐标系等)中的几何关系, 在此不赘述。

2. 大气效应订正处理

由于探测器采用扫描方式工作, 所获遥感观测值受地球曲率、大气吸收以及仪器噪声等因素的影响, 在利用遥感信息通过辐射传递方程求解大气参数之前, 必须对影响仪器辐射率测值的这些因素进行预先加工订正处理⁽³⁾。在垂直大气探测资料处理业务系统中主要做了以下几种订正处理。

(1) 临边效应修正

当星载仪器向轨道两侧的地球扫描, 卫星天底角是变化的。当天底角增大时, 目标与卫星之间的辐射路径上大气层变厚, 吸收气体量增加, 卫星遥感测到的辐射值因气体吸收而减小。这就是通常所说的“临边变暗”问题。解决这一问题的方法是 will 仪器视场角归一化, 即把任一天底角测量的辐射率值转换为零度天底角下的辐射值, 并考虑邻近通道的影响。其基本形式是:

$$\Delta T_{bj} = a_{0j} + \sum_{i=1}^M a_{ij} T_{bi} \quad (4)$$

$$\hat{T}_{bj} = T_{bj} + \Delta T_{bj} \quad (5)$$

其中, ΔT_{bj} 表示待求的第 j 通道临边效应修正量, T_{bi} 是参与第 j 通道订正的第 i 通道亮温, M 表示参与修正的通道数, a_{0j} 和 a_{ij} 是回归系数, 每颗星只需计算一次。 \hat{T}_{bj} 是经过订正的第 j 通道的亮温, T_{bj} 是第 j 通道的实测亮温。

(2) 红外窗区通道(8、18 和 19)的水汽削弱订正

由于大气中存在水汽, 它的吸收作用使得红外窗区测值受到削弱, 从而不能直接利用实测值来确定地表温度。同样采用了类似于临边效应修正的回归方程来进行这种削弱订正。

(3) 短波窗区通道反射太阳光辐射订正

在白天, 通道 18 和 19 还强烈地受到太阳光辐射的影响, 对此的订正方法是:

$$T_b = d_1 + d_2 F + d_3 F^2 + d_4 F^3 \quad (6)$$

式中, $F = \ln[k \times R(18) - R(19)]$, $R(18)$ 和 $R(19)$ 分别是通道 18 和 19 的辐射值, k 利用短波窗通道和太阳辐射亮温计算得到, d 为多项式系数, 随卫星而异。

(4) 可见光通道的双向反射订正

可见光通道用来测量地表的反照率, 帮助人们识别表面特征(水、陆和云等)。然而由于双向反射的影响, 其测值不能如实反映下垫面状况。因此, 在使用可见光通道测值之前, 必须对其进行订正:

$$W = V / 22.407r \cos Z \quad (7)$$

其中, V 表示通道 20 的实测值, Z 为太阳天顶角, r 由太阳时角算出, W 为订正后 HIRS-2 通道 20 的观测值。

(5) 微波天线旁瓣影响订正

对于微波辐射计(MSU), 天线系统是扫描系统的一个组成部分。它通常由一个主瓣和几个非常小的旁瓣组成, 称之为天线图。天线图用来描述天线的响应, 对于确定 MSU 通道亮温非常重要。在处理 MSU 资料时, 为了简化辐射传输方程, 通常只考虑主瓣的影响, 忽略旁瓣的影响。实际上旁瓣的影响还是相当大的, 也必须加以考虑。目前采用经验订正方法。

(6) 各仪器扫描点的空间匹配

由于大气参数反演所用星测值来自不同的探测仪器, 而这些仪器的扫描角、扫描线的扫描时间、扫描点数和扫描带宽等各不相同, 引起测值点的空间分辨率各不一样。因此, 需按空间位置把这三种仪器的探测资料进行匹配处理, 使得在高分辨红外探测器的每一个扫描点位置上, 也能同时获得微波和平流层探测器的测值。

3. 科学计算

科学计算软件部分是大气探测业务处理系统的核心, 有两个基本功能: 一是计算等效晴空辐射, 二是推导天气和气候参数。除长波辐射通量外, 一般只对每 3×3 个扫描点线组成的区域(简称计算“块”)进行反演。

(1) 云检测

为了确定“块”中是否有云存在,则利用通道光谱特性对“块”进行一系列检验,例如,窗通道测值的一致性检验;利用长波和短波红外通道亮温回归估计具有相应权重函数峰值高度的微波通道测值,当云存在时,估计值小于微波通道实测值^[4]。在目前的业务系统中,使用 MSU 通道 2 测值和相应于 MSU 通道 2 权重高度的红外通道回归估计之差作为晴空检验的判据,差值小为无云,差值大为有云。把找到的晴空点作为反演点的测值来源,并反演出代表这一“块”的大气参数廓线。

(2) 等效晴空辐射计算

假定在反演块中有部分云存在,辐射的变化仅仅由云量引起,即射出辐射与云量成线性关系,则通道 ν_i 的测量辐射率可表示成云区辐射率和晴空辐射率之和^[5]:

$$I(\nu_i) = NI_{ca}(\nu_i) + (1 - N)I_{cr}(\nu_i) \quad (8)$$

式中 N 为视场云量, $I_{ca}(\nu_i)$ 是云区的平均辐射率, $I_{cr}(\nu_i)$ 是晴空区的平均辐射率。假定在两相邻视场中的温度廓线相等,则 $I_{cr}(\nu_i)$ 可表示成:

$$I_{cr}(\nu_i) = \frac{I_1(\nu_i) - N^*I_2(\nu_i)}{1 - N^*} \quad (9)$$

式中 $N^* = N_1/N_2$, 即两视场中的云量之比; $I_1(\nu_i)$ 和 $I_2(\nu_i)$ 是两视场的辐射率测值。显然,如果(9)式的 N^* 已知,则任一通道的 $I_{cr}(\nu_i)$ 都可以确定。 N^* 由微波测值和红外晴空测值的相关性确定。

(3) 温湿层结反演

在晴空条件下,通道 i 的平均辐射率测值和大气温度及吸收气体之间的关系可表示成:

$$I(\nu) = B[\nu, T(P_s)]\tau(\nu, P_s) + \int_{P_s}^0 B[\nu, T(P)] \frac{d\tau(\nu, P)}{dP} dP \quad (10)$$

式中, ν 为通道波数(cm^{-1}), $B[\nu, T(P)]$ 为波数 ν 和温度 T 时的普朗克函数, $\tau(\nu, P)$ 是在波数 ν 从大气层 P 到大气层顶的透过率, $d\tau(\nu, P)/dP$ 为仪器通道权重函数(或核函数), P_s 表示表面层。方程(10)右端第一项表示由地面发射并经过大气吸收衰减后到达卫星的辐射,第二项表示大气各层的发射辐射受大气自身作用后到达卫星的辐射。由(10)式知,卫星测值 $I(\nu)$ 和温度廓线 $T(P)$ 的关系是显而易见的,而水汽含量信息则是通过大气透过率 τ 隐含在辐射值 $I(\nu)$ 中,加之水汽随时间、空间变化迅速和红外测湿的局限性,使得水汽反演比温度更困难^[6]。

至今,用卫星遥感反演大气参数的方法已很多,归结起来,无非是物理(包括物理统计)和统计两种方法。物理反演法是对方程(10)直接求解,需要较多的计算时间,同时对辐射定标精度要求较高。在不能快速而精确地计算大气透过率之前,还只能用回归解。目前,我们使用的是特征向量回归法^[6]。

为了建立大气参数和辐射测值之间的统计关系,对大气温度(或湿度)和卫星晴空亮温分别按各自的特征向量展开:

$$Y = Y^* A \quad (11)$$

$$X = X^* B \quad (12)$$

式中 Y 为待求参数(温度或湿度), Y^* 为待求参数的特征向量, X 为参与计算大气参数的通道亮温, X^* 为通道亮温特征向量, A 和 B 为展开系数矩阵。考虑特征向量的正交性, 对以上两式做适当运算得到:

$$Y = CX \quad (13)$$

$$C = Y^* S_{AB} S_{BB}^{-1} (X^*)^t \quad (14)$$

式中 C 为回归系数。 C 的计算步骤如下:

(a) 确定统计样本。把常规观测站和卫星扫描点按已定时间(± 6 小时)和空间(1 个经纬距)进行匹配处理, 再对匹配好的样本进行筛选, 并将其随机分成独立和相关样本数据集(称统计样本数据集), 为系数计算做准备。

(b) 回归系数计算。为了提高反演精度, 我们把大气分为 100hPa 以上和 100hPa 以下两层分别计算回归系数。取统计样本数据集(见图 1)中 14 天的仪器通道亮温为预估因子, 探空观测的温度和湿度廓线为预估量计算系数。之后, 每补充一周的卫星资料都要重新计算一次系数。然后由专家对新系数做出评价, 确定是否用新系数(代替老系数)反演大气参数。

(4) 长波辐射通量计算

用卫星辐射率测值和长波辐射通量的准解析函数形式计算长波辐射通量, 即

$$F = C_0 + \sum_{i=1}^5 C_i R_i \quad (15)$$

式中 F 为待求的长波辐射通量, C 为回归系数, 由 5 个 HIRS-2 通道测值(通道 3、7、8、10 和 12)和标准大气廓线回归得到, R 为所选用的通道辐射率测值⁽⁷⁾。

四、结果分析

目前区域大气探测业务系统生成的产品包括 40 个气压层(1000—0.1hPa)上的温度, 15 个气压层(1000—300hPa)上的水汽混合比, 15 个标准等压面位势高度, 臭氧总含量和长波辐射通量等。长波辐射通量的分辨率为 18km, 其余产品的分辨率均为 75km。所有定量产品可在 X-Y 绘图机或 PC 终端上绘制出等值线图, TOVS 窗区和水汽通道测值可用做拼图处理。

为了了解该系统生成的定量产品的精度, 我们做了一些统计分析试验研究。表 2 是 1989 年 9 月 25 日北京 HRPT 站 NOAA-10 一条轨道的 TOVS 资料温度反演与常规资料的统计比较。表 2 中 N 为统计样本数。它表明: 温度平均均方根误差(RMS)在低纬地区为 1.22℃, 在高纬地区为 2.28℃, 最大偏差在近地面层、对流层顶附近和 300hPa 以上。表 3 是 1989 年 9 月一个月的 NOAA-10 温度(T)、层平均厚度(ΔH)和水汽混合比(W)的反演精度分析。表中 ΔV 是平均偏差(探空减反演), STD 是标准偏差。表 3 中的结果表明, 温度平均均方根误差为 2.45℃, 层平均厚度误差为 21.4 位势米, 水汽混合比均方根误差为 1.47g/kg。由偏差 ΔV 知, 在大多数气压层, 反演的温度比探空观测偏低, 反演的水汽廓线比实测值偏低。

表 2 NOAA-10 一条轨道反演的温度与
常规资料在 15 个大气层上的比较

P(hPa)		1000	850	700	500	400	300	250	200	150	100	70	50	30	20	10
10°—20°N	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0
	RMS	0.35	0.42	0.62	1.24	2.04	0.64	0.69	0.69	0.31	1.63	2.03	0.84	0.76	2.37	
20°—30°N	N	16	34	40	42	42	41	41	38	39	40	36	35	32	22	0
	RMS	1.86	1.11	1.17	1.67	1.12	0.87	1.02	1.30	1.18	2.00	1.61	2.00	1.34	1.58	
30°—40°N	N	11	28	34	41	41	41	41	41	41	38	34	32	27	24	2
	RMS	3.36	2.55	1.60	2.31	1.50	1.29	1.38	2.05	1.49	1.23	2.82	2.27	2.49	3.19	7.07
40°—50°N	N	3	21	22	22	22	22	22	22	21	22	24	22	21	21	0
	RMS	3.98	2.98	1.85	1.49	1.84	1.81	2.40	2.19	1.95	2.20	1.34	1.58	2.14	1.77	

表 3 1989 年 9 月 NOAA-10 反演结果比较

P(hPa)		1000	850	700	500	400	300	250	200	150	100	70	50	30	20	10
T (°C)	N	1123	2240	2970	3283	3259	3244	3217	3187	3135	3058	2703	2589	2226	1592	229
	ΔV	0.51	0.20	-0.11	0.20	0.52	0.28	-0.46	-1.19	-0.49	0.11	0.61	0.07	-0.27	0.03	1.19
	STD	2.51	2.91	2.39	2.10	2.13	2.43	2.63	2.64	2.07	2.22	2.37	1.88	2.00	2.39	3.25
	RMS	2.68	2.91	2.39	2.11	2.19	2.45	2.57	2.89	2.13	2.22	2.45	1.88	2.02	2.39	3.46
ΔH (m)	N	1120	2463	2957	3259	3245	3209	3170	3105	3021	2584	2567	2212	1582	206	
	ΔV	4.	2.	1.	2.	4.	0.	-5.	-7.	5.	14.	2.	-5.	-1.	13.	
	STD	18.	15.	17.	14.	19.	14.	17.	19.	24.	21.	19.	23.	24.	45.	
	RMS	18.	15.	17.	14.	20.	14.	18.	21.	24.	25.	19.	24.	24.	47.	
W (g/kg)	N	1119	2460	2968	3277	3244	2993									
	ΔV	0.317	0.764	0.533	0.062	0.018	-0.003									
	STD	2.570	2.320	1.876	0.967	0.660	0.143									
	RMS	2.589	2.443	1.950	0.969	0.660	0.143									

图 2 是分布在我国区域内的 8 个单站卫星温度廓线与常规观测的比较。可以看出,除个别大气层外,两种观测结果比较一致。

该系统生成的臭氧总含量精度与地面观测结果比较约为 10%,长波辐射通量均方根误差为 $1.7W/m^2$ 。

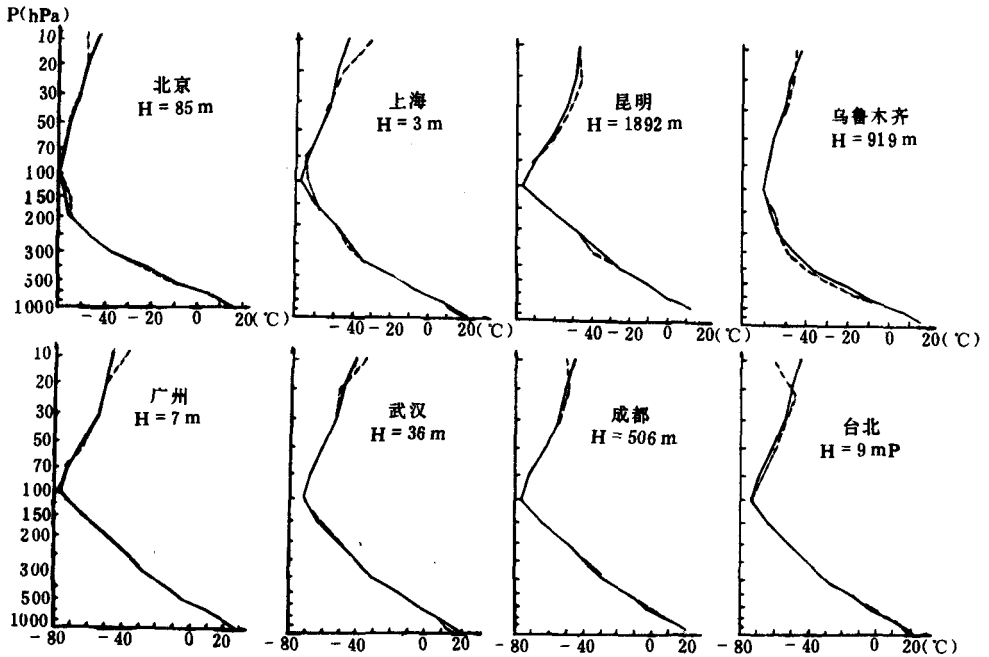


图2 1989年9月3日0000GMT北京等测站NOAA-10温度反演(实线)与探空廓线(虚线)的比较(H为海拔高度)

五、讨 论

大气探测业务处理软件是一个系统、完整、运行可靠稳定和便于维护扩充的应用软件子系统。它不仅能实时处理我国北京、广州和乌鲁木齐三个地面接收站的气象卫星垂直探测资料,生成重要的天气参数,同时又能实时接收来自国家气象中心的常规资料,进行卫星测值和常规观测的时、空匹配处理,生成特征向量回归系数,并作周期性更新。

存在的问题是:反演精度不够稳定,在高纬地区和地形复杂地区较差;目前还不能反演出全天候条件下的大气参数;在近地面和对流层顶也不能获得满意的结果;水汽反演精度还不能满足用户要求等。其原因可能是:受当代星载仪器性能的限制(垂直和水平分辨率偏低);不能精确而快速地计算大气透过率,使直接求解辐射传递方程有一定困难;回归系数受气团和地形影响等。因此,人们试图从两方面着手来解决当前所面临的困难。一是研制多通道、高性能的星载仪器,例如美国正在研制和调试的AMTS、AMSU和HIS等仪器,二是从反演方法入手,例如美国NESDIS已于1988年开始用最小方差同步反演法⁽⁸⁾取代了过去所用的统计回归方法。新方法的特点是减小了对常规资料的依赖性,并能同时求出大气温、湿和地表特征参数等。

我们将继续运行统计回归模式,并对其进行多种改造以便进一步提高反演精度⁽⁹⁾。继续对改进的同步物理反演解进行试验研究⁽¹⁰⁾;分析3I⁽¹¹⁾(改进初始估计反演解)和同步物

理法的特点来改进回归反演解;继续多种反演方法的比较研究和大气探测资料对数值预报模式的影响研究。

参 考 文 献

- [1] Lauritson, L., G. J. Nelson, and F. W. Porto, Data extraction and calibration of TIROS-N/NOAA radiometers, NOAA Technical Memorandum NESS 107, 1979.
- [2] Dong Chaohua, Liu Quanhua, Li Guangqing and Zhang Fengying, The study of in-orbit calibration accuracy of NOAA satellite infrared sounder and its effect on temperature profile retrievals, *Advances in Atmospheric Sciences*, Vol. 7, No. 7, 1990.
- [3] Smith, W. L., H. M. Woolf, The TIROS-N Operational vertical sounder, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **60**, 1177-1187, 1979.
- [4] McMillin, L. M., and C. Dean, Evaluation of a new operational model for producing clear radiances, *Appl. Opt.* **21**, 1005-1014, 1982.
- [5] Smith, W. L., and H. M. Woolf, The use of eigenvectors for interpreting satellite sounding radiometer observation, *J. Atmos. Sci.*, **33**, 1127-1140, 1976.
- [6] 曾庆存, 大气红外遥测原理, 科学出版社, 1974年。
- [7] 刘全华, 董超华, 黎光清, 应用 HIRS-2 仪器资料计算长波辐射通量, *气象*, **15**, 11, 26-29, 1989.
- [8] Fleming, H. E., M. D. Goldberg, and D. S. Crosby, Minimum variance simultaneous retrieval of temperature and water vapour from satellite radiance measurements, Preprint Volume of the Second Conference on Satellite Meteorology Remote Sensing and Applications, Williamsburg, 1986.
- [9] Zhang Fengying, Dong Chaohua, Ma Xialin, Li Guangqing, Zheng Bo, Liu Quanhua, Ran Maonong, Wu Baosuo, Zhang Wenjian, Zhao Sixiong, Zhang Baoyan, and Shi Shu, Recent TOVS studies and applications, Proceedings of the Fifth International TOVS study Conference (ITSC-V), Toulouse, France, 1989.
- [10] 黎光清, 吴保锁, 董超华, 张文建, 刘全华, 东亚地区高分辨物理反演方法数值试验: 内部比较, *大气科学*, **15**, 1, 1991.
- [11] Chedin, A., and N. A. Scott, Initialization of the radiative transfer equation inversion problem from a pattern recognition type approach; Application to the satellites of the TIROS-N series, In "Advances in remote sensing retrieval methods", A. Deepak Publishing, 1985.

A REGIONAL SATELLITE ATMOSPHERE SOUNDING DATA OPERATIONAL PROCESSING SYSTEM

Dong Chaohua Zhang Fengying Zheng Bo Ran Maonong
Wu Baosuo Luo Dongfeng Liu Quanhua Li Guangqing

(Satellite Meteorology center, SMA)

Abstract

It is a brief introduction of the construction, algorithm and products of a regional satellite atmosphere sounding data operational processing system. Comparisons of retrieved products with conventional data show that the root mean square error (RMSE) of the temperature retrievals is about 2.45°C , the RMSE for the water vapor ratio is about 1.47g/kg , about 21.4 geopotential meters for the layer mean thickness, the accuracy of the total ozone amount is about 10% compared to values derived from Dobson measurements. The RMSE of long-wave radiative flux is about 1.7W/m^2 .