

平流层大气温度探测通道选择数值试验*

冉茂农 董超华 沈正心

(中国气象局国家卫星气象中心, 北京, 100081)

张肇先 ✓

(中国科学院上海技术物理所, 上海, 200083)

P356

摘要 通过等效通道选择原理分析, 认为通过构建等效通道, 可使其权重函数峰值高度高于目前美国 NOAA 气象卫星 HIRS/2 第一通道的峰值高度. 通过大量的模拟计算试验, 证实了这一原理实现的可能性. 进一步利用 $15\mu\text{m}$ CO_2 吸收带的 7 个温度探测通道和所选择的等效通道一起反演大气温度垂直分布, 结果表明增加一个等效通道对温度廓线反演有一定改善, 特别是对平流层 (50~2hPa) 温度反演, 平均每层精度提高约 0.27K.

关键词 大气温度, 等效通道, 反演.

平流层 探测通道
红外大气探测器

引言

装载在美国 NOAA 气象卫星上的高分辨率红外大气探测器 (HIRS/2) 第一通道的探测高度大约 30hPa, 是该仪器最高探测高度. 为了从 HIRS/2 仪器上获得较多的平流层信息, 我们依据等效通道的设想^[1], 即在 HIRS/2 第一和第二通道之间选择一个新选通道, 并通过第一和这个新选通道的大气辐射率进行差分处理, 就能得到一个权重函数极大值高度高于第一通道的等效通道. 本文通过数值试验进一步证实了等效通道的可行性. 我们在此基础上分别利用 7 个通道 (HIRS/2 通道 1~通道 7) 和 8 个通道 (HIRS/2 的 7 个通道加一个等效通道) 模拟反演从地面到 2hPa 高度共 20 个大气层的温度分布. 数值计算试验结果表明: 利用 8 个通道的辐射率值进行温度反演, 在 70hPa 层以上反演的温度精度高于用 7 个通道的反演精度, 这说明等效通道法能对高层反演带来更多有用的信息.

1 等效通道选择原理

假定大气处于局地热力平衡状态下, 且不考虑大气散射影响, 则红外波段的辐射传递方程^[3]为

$$I(\nu, \theta) = B[\nu, T_s] \tau(\nu, \theta, P_s) + \int_{P_s}^0 B[\nu, T(P)] \frac{\partial \tau(\nu, \theta, P)}{\partial P} dP. \quad (1)$$

式中 $I(\nu, \theta)$ 是卫星天底角为 θ 、通道波数为 ν 时卫星仪器观测到的辐射, $B[\nu, T(P)]$ 是温度

* 国家自然科学基金 (编号 49794030) 资助项目
稿件收到日期 1997-05-22, 修改稿收到日期 1997-07-22

为 T 、波数为 ν 的普朗克函数, $\tau(\nu, \theta, P)$ 表示沿天底角 θ 、从大气压力层 P 到大气层顶的透过率, 下标 s 表示地面或云顶的值.

为了简化反演, 只考虑天底角 θ 为零的情况, 式(1)可写成

$$I(\nu) = B(T_s)\tau_s + \sum_i \bar{B}_i \Delta\tau(\nu). \quad (2)$$

令下标 1 和下标 2 分别表示第一通道 (668.99cm^{-1}) 和新选通道, 其大气辐射传递方程分别为

$$I_1 = B_1(T_s)\tau_{1s} + \sum_i \bar{B}_{1i} \Delta\tau_{1i}, \quad (3)$$

和
$$I_2 = B_2(T_s)\tau_{2s} + \sum_i \bar{B}_{2i} \Delta\tau_{2i}, \quad (4)$$

式中 i 表示气压层, 选取整数 $N > 1$ 作为调整因子, 乘式(3)等号两端再减去式(4), 并考虑地面辐射对这两个通道的贡献几乎等于零, 得

$$NI_1 - I_2 = \sum_i \bar{B}_{1i} (N\Delta\tau_{1i} - \Delta\tau_{2i}) + \sum_i \Delta\tau_{2i} (\bar{B}_{1i} - \bar{B}_{2i}). \quad (5)$$

由于式(5)中 $\sum_i \Delta\tau_{2i} (\bar{B}_{1i} - \bar{B}_{2i})$ 为一小量, 令

$$\Delta\tau_i^* = N\Delta\tau_{1i} - \Delta\tau_{2i} \quad (6)$$

为等效通道在第 i 个气压层的透过率, 则式(5)可写成 $NI_1 - I_2 = \sum_i \bar{B}_{1i} \Delta\tau_i^*$, 令 $I^* = NI_1 - I_2$ 则

$$I^* = \sum_i \bar{B}_{1i} \Delta\tau_i^* \quad (7)$$

为等效通道的大气辐射传递方程.

若适当选择新通道, 通过计算 $\Delta\tau_i^*$ 的值, 则其等效通道的权重函数极大值高度可高于第一通道的极大值高度^[1].

2 通道选择试验

本文的目的是在不增加新探测仪器的条件下, 寻求比 HIRS/2 第一通道探测高度更高的等效通道, 并利用这一等效通道来改善探测平流层大气温度廓线的可能性.

此数值试验利用的是 NOAA-11HIRS/2 $15\mu\text{m}$ CO_2 吸收带的 7 个通道的中心波数(从 668.99 到 749.48cm^{-1})和相应通道的宽度($\Delta\nu$). 根据美国 NESDIS 的逐条谱线计算模式, 得到分辨率为 0.1cm^{-1} 、卫星天顶角为零度时的 44 个气压层的大气透过率值, 并以此为基础来计算各通道平均大气透过率, 包括新通道的大气透过率^[3]. 然后, 按式(6)计算出等效通道在不同气压层的透过率值. 通道权重函数分布按 $W = \partial\tau^*/\partial nP$ 计算得到. 表 1 给出 HIRS/2 通道特征参数, 图 1 示出这 7 个通道的归一化权重函数(WF)随气压层(P)的分布曲线.

为了获得最佳新通道, 我们考虑了不同通道宽度(例如 $\Delta\nu = 3$ 和 4cm^{-1}), 并在 HIRS/2 第一(668.99cm^{-1})和第二(678.89cm^{-1})通道之间选择 30 种不同的通道中心波数等, 共计

约 150 种情况进行计算试验. 综合分析这些试验结果可以得到如下基本结论:(1) 新通道的中心波数必须紧靠第一通道,光谱选择范围在 668.99cm^{-1} 和 670.20cm^{-1} 之间为宜;(2) 中心波数分别为 669.50 、 669.99 、 670.00 和 670.20cm^{-1} ,宽度取 3cm^{-1} 时的 4 个通道,分别和 HIRS/2 第一通道辐射率进行差分处理,均可以得到高于第一通道权重函数峰值高度的等效通道,为了清楚起见,表 2 列出了第一通道和新选 4 个通道的特征参数中心波数,图 2 示出了 HIRS/2 通道 1、新选通道(669.50cm^{-1})和相应等效通道的归一化权重函数(WF)随气压层(P)的分布曲线;(3) 调整因子同新选通道的中心波数以及同第一通道的宽度有一个组合问题,只有选择合理才能得到较理想的等效通道;(4) 经过大量试验,认为调整因子 N 选择为 4 较合适.

表 1 HIRS/2 仪器长波函数通道特性

Table 1 Longwave Infrared Channel Characteristics of HIRS/2 Instrument

通道 (ch.)	中心波长 (μm)	中心波数 (cm^{-1})	通道宽度 ($\Delta\nu=\text{cm}^{-1}$)	权重函数峰值高度* (hPa)
1	14.95	668.99	3	20
2	14.73	678.89	10	60
3	14.50	689.70	12	100
4	14.22	703.25	16	400
5	13.95	711.83	16	620
6	13.66	732.11	16	850
7	13.34	749.48	16	1000

* 本次试验计算值

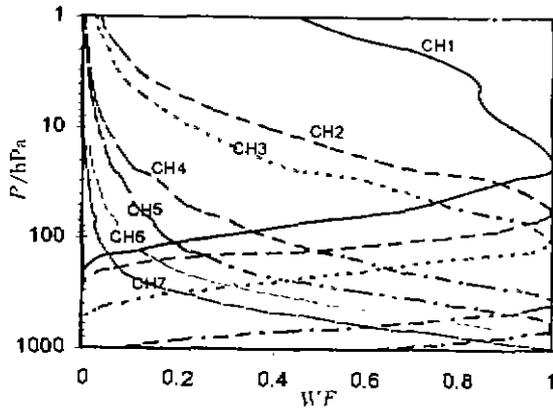


图 1 HIRS/2 通道 1-通道 7 权重函数
Fig. 1 Weighting functions of the HIRS/2
from channel 1 to channel 7

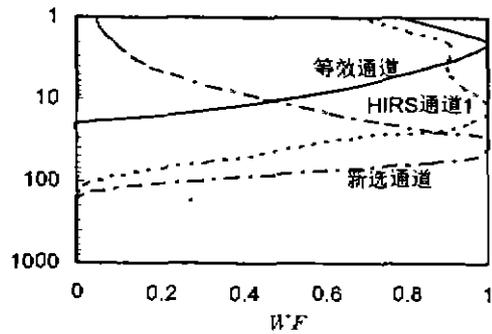


图 2 等效通道、HIRS/2 通道 1
和新选通道权重函数
Fig. 2 Weighting functions of the equivalent
channel, the first HIRS/2 channel and
the new channel selected

表2 新选通道特征参数

Table 2 Characteristic parameters of the selected new interpolating channel

通道组别	通道中心波数 (cm^{-1})	通道宽度 (cm^{-1})	能量峰值高度 (hPa)	等效通道能量峰值高度 (hPa)	调整因子
通道 1	668.99	3	20		
新选通道 1	669.50	3	25	4	4
通道 1	668.99	3	20		
新选通道 2	669.39	3	30	4	4
通道 1	668.99	3	20		
新选通道 3	670.00	3	30	4	4
通道 1	668.99	3	20		
新选通道 4	670.20	3	30	4	4

3 数值试验结果分析

3.1 反演过程

为了检验等效通道对反演大气温度廓线的敏感程度,根据辐射传递方程,选用迭代反演方法^[2],分别利用7个通道和8个通道的辐射率模拟值进行温度反演试验,同时改变初估温度廓线来检验迭代反演的收敛速度.反演步骤大致如下:(1)假定卫星天顶角 θ 为零,根据已经计算出的各通道透过率值和给定的温度廓线(作为真值),按照式(2)计算卫星各通道观测辐射率 $I_s(\nu)$,对于等效通道则按式(7)计算其辐射率值;(2)随机选取不同大气温度廓线作为迭代反演的初估值,由式(2)计算出各通道的 $I_c(\nu)$;(3)根据 $I_s(\nu)$ 和 $I_c(\nu)$ 之间的偏差值,调整式(2)中的普朗克函数值(或温度廓线);(4)考虑到仪器各通道权重函数的相互重叠性,按照透过率对各个气压层大气温度值作加权平均,实际上是温度廓线再调整;(5)将调整后的温度廓线代入式(2),得到新的 $I_c(\nu)$ 计算值;(6)检查 $I_s(\nu)$ 和 $I_c(\nu)$ 的偏差是否小于某个小量,或小于仪器通道噪声辐射率值,若小于则停止迭代,这时的温度廓线即为式(2)的真解,若不满足条件,则重复步骤(2)至(5),直到满足条件为止.

3.2 结果分析

我们针对表2中给出的4个新选通道,随意选取其中1个等效通道进行大气温度数值反演试验,其结果列于表3.在表3中, T 表示试验中选取的初估温度廓线, ΔT 表示反演温度廓线与真实温度廓线之间的偏差, ΔT_7 表示只用了7个HIRS/2通道辐射率(没有加入等效通道)反演的结果与真实温度的偏差, ΔT_8 表示这7个HIRS/2通道另外加上等效通道后的反演结果与真实温度的偏差;NS表示反演迭代次数.分析表3的结果得到:(1)比较 ΔT_7 和 ΔT_8 可知,在50~2hPa这些层次上,用8个通道进行温度反演(加入等效通道),其偏差要小些,反演精度平均每层提高了约0.27K,因此等效通道对温度反演起到明显的正效应.但在1000~70hPa各层,用7个通道反演(不加等效通道)的偏差比用8个通道反演的偏差要小,这稍稍影响了低层温度的反演精度.总体平均来说,对1000到2hPa的所有层次的

温度偏差求平均,加入等效通道后整体温度反演精度约提高了 0.1K,这说明等效通道对整个大气温度廓线反演产生了正效应,特别是对中高层大气科学研究具有意义。(2)由图 2 可知,新通道和等效通道的权重函数峰值能量贡献高度分别在 25hPa 和 4hPa 左右,而且权重函数分布曲线覆盖 0.1 到 250hPa 大气层,这说明等效通道辐射率值是 0.1 到 250hPa 大气层辐射能量的总效应,即主要来自对流层顶附近和平流层下部,这与表 3 的结果相符合。(3)反演迭代的收敛速度与初估温度廓线和真实温度廓线之间的偏差有关,其偏差愈大,迭代反演的次数就愈多,因此收敛就愈慢.从此试验结果可以看出,8 个通道反演的收敛速度比 7 个通道的稍微慢些,但相差不大,即加入等效通道后并不增加多少计算时间.

表 3 反演结果比较
Table 3 Comparisons of the retrievals

气压 P (hPa)	温度 T (K)	反演温度偏差		改进 $\Delta T_7 - \Delta T_8$
		ΔT_7	ΔT_8	
1000	257.43	0.02	0.01	+0.01
850	248.73	0.07	0.07	0.0
700	238.62	0.11	0.12	-0.01
500	221.92	0.22	0.24	-0.02
400	211.44	0.36	0.40	-0.04
300	198.58	0.60	0.68	-0.08
250	190.79	0.90	1.03	-0.07
200	186.65	1.26	1.44	-0.18
150	186.65	1.45	1.65	-0.20
100	186.65	1.82	1.95	-0.13
70	186.65	1.91	1.94	-0.03
50	187.23	1.94	1.80	+0.14
30	190.50	1.83	1.65	+0.18
20	193.13	1.72	1.42	+0.30
10	197.70	1.49	1.16	+0.33
7	202.73	1.36	1.03	+0.33
5	209.23	1.22	0.90	+0.32
4	213.64	1.13	0.82	+0.31
3	219.45	1.04	0.75	+0.29
2	227.88	0.94	0.68	+0.26
(1000-2hPa)平均偏差(K)		1.07	0.99	+0.08
(50-2hPa)平均偏差(K)		1.41	1.13	+0.27
迭代次数(NS)		19	24	

4 结语

通过数值试验,证实在 HIRS/2 第一、第二通道之间可以选择一个新的通道,并由此与第一通道辐射率进行差分处理,得到一个权重函数峰值高度高于 HIRS/2 第一通道的等效通道.等效通道参加大气温度反演,可以较明显地提高平流层温度探测高度和反演精度.

REFERENCES

- 1 ZHANG Z X. *Special Collection of FY-3CSS90*(张肇先. FY-3CSS90 专集), 1991, 133
- 3 Smith W L. *Applied Optics*, 1970, 9(9):1993
- 2 Weinreb M P, Fleming H E, McMillin L M, *et al.* *NOAA Technical Report*, NESS 1981, 85

NUMERICAL SIMULATION EXPERIMENT ON THE EQUIVALENT CHANNEL SELECTION FOR STRATOSPHERIC SOUNDING *

RAN Mao-Nong DONG Chao-Hua SHEN Zheng-Xin

(National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

ZHANG Zhao-Xian

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract It was thought that an equivalent atmospheric sounding channel can be obtained by a lot of simulated computation, of which the peak height weighting function is higher than that of the first channel of HIRS/2 instrument onboard the NOAA serial meteorological satellites of USA. By comparing the retrievals obtained from the equivalent channel with original retrievals, the result shows that there is an improvement on the temperature retrievals by adding the equivalent channels, particularly on stratosphere (50—2hPa) profiles with the average improvement of 0.27K.

Key words equivalent channel, retrieval.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China
Received 1997-05-22, revised 1997-07-22