

# 改进晴空辐射精度的一种处理方法

范天锡

(卫星气象中心)

## 摘 要

本文提出在HIRS/2视场中部分有云情况下,由一组相邻视场测值反演晴空辐射的一种方法,并用数值模拟试验对这种方法的精度与Aoki的Q8方法进行了比较,其精度比Aoki的Q8方法有相当大的提高。

## 一、前 言

用TIROS-N业务垂直探测器(TOVS)数据反演大气温、湿廓线时,在高分辨率红外辐射探测器(HIRS/2)的一个视场中,常常有云存在,使其观测值受到云的“污染”。因此,在大气廓线反演之前,必须首先消除云的影响而计算出晴空辐射值。

在资料处理业务系统中,目前通常采用Smith(1968)〔1〕提出的相邻视场配对方法来计算晴空辐射值。该方法假定在相邻视场中,云顶高度和云的辐射率相等,而实际上,这个假定常常不能满足,从而带来较大的误差。McMillin(1978)〔2〕对Smith方法作了改进,在邻近视场中,选择云顶高度接近的视场配对,但晴空辐射值的相对误差有时仍会超过10%〔3〕。

Aoki(1980)〔3〕提出用统计调整法来计算HIRS/2的晴空辐射值,他认为精度远比McMillin方法高,误差仅为其2/5。然而,此方法要用改进的甚高分辨率辐射计(AVHRR)的数据估算HIRS/2每个视场中的云量,需将此两种仪器的视场精确匹配,并作云的判识。要作好这一工作相当困难,又要消耗大量的计算机时。1982年他对原方法作了修改〔4〕,提出不用AVHRR数据就能计算晴空辐射的Q8方法。他认为其精度比原方法略有下降,但仍高于McMillin方法。在Aoki的论文中,各种计算晴空辐射方法所产生的误差,是以相对于他的

QA1方法计算结果的偏差值的形式给出的,这就难以对真实的误差状况作出确切的评价。

本文首先用类似于Aoki的Q8方法,进行晴空辐射计算的数值模拟,给出其真实的误差值,然后在处理方法上加以改进,使精度取得大幅度提高。这样,我们便得到一个既简单实用,又具有较高精度的计算晴空辐射的新方法。

## 二、计算方法

假定HIRS/2的M个相邻视场的晴空辐射值相等,其中,第i个视场观测的辐射值为

$$I_i(\nu) = I_r(\nu) - n_i [I_r(\nu) - I_{c_i}(\nu)] \quad (1)$$

式中,  $i = 1, \dots, M$ ;  $\nu$  是通道的中心波数;  $I_r(\nu)$  是晴空辐射值;  $n_i$  是第i视场中的有效云量;  $I_{c_i}(\nu)$  是第i视场中云区的辐射值。

$$\text{令 } y_i = I_i(\nu)$$

$$x_j = \begin{cases} I_r(\nu), & (j=1) \\ Q_i(\nu) = n_i [I_r(\nu) - I_{c_i}(\nu)], & (j=i+1) \end{cases}$$

$$k_{ij} = \begin{cases} 1 & (j=1) \\ -1 & (j=i+1) \\ 0 & (j \neq 1, j \neq i+1) \end{cases}$$

其中,  $i = 1, \dots, M$ ;  $j = 1, \dots, M+1$ , 则

$$y_i = \sum_{j=1}^{M+1} k_{ij} x_j$$

写成矩阵形式为

$$Y = KX \quad (2)$$

在(2)式中, Y已知, K是常数, X为待估参数。用统计调整法, X的解为

$$X = S_X K^T (K S_X K^T + S_Y)^{-1} (Y - K X^0) + X^0 \quad (3)$$

式中,  $X^0$ 是X的初值,  $S_X$ 和 $S_Y$ 分别是X和Y的协方差矩阵。

晴空辐射  $I_r(\nu)$  的初值  $I_r^0(\nu)$  可用典型的大气廓线计算。根据大气辐射传递方程, 其值为

$$I_r^0(\nu) = B(\nu, T_s) \tau(\nu, p_s) + \int_{p_s}^0 B(\nu, T(p)) \frac{\partial \tau(\nu, p)}{\partial p} dp \quad (4)$$

式中, B是普朗克函数,  $\tau$ 是大气透过率, T和p分别是大气温度和气压, 下标s表示地面。

假定 HIRS/2 各通道的云的辐射率相等,  $Q_i(\nu)$  的初值  $Q_i^0(\nu)$  可由下式给出

$$Q_i^0(\nu) = [I_r^0(\nu_s) - I_i(\nu_s)] G(\nu, \nu_s) \quad (5)$$

其中

$$G(\nu, \nu_s) = \frac{I_r^0(\nu) - I_c^0(\nu)}{I_r^0(\nu_s) - I_c^0(\nu_s)}$$

式中,  $\nu_s$ 表示 HIRS/2 第8通道的中心波数,  $I_c^0(\nu)$ 是用典型大气廓线计算的“黑云”辐射值, 亦通过大气辐射传递方程计算出来,

$$I_c^0(\nu) = B(\nu, T_c) \tau(\nu, p_c) + \int_{p_c}^0 B(\nu, T(p)) \frac{\partial \tau(\nu, p)}{\partial p} dp \quad (6)$$

式中,  $T_c$ 和 $p_c$ 分别表示云顶的温度和气压。由于 $G(\nu, \nu_s)$ 是 $[I_r^0(\nu_s) - I_c^0(\nu_s)]$ 的单调函数, 可近似表示为

$$G(\nu, \nu_s) = \sum_{k=1}^3 C_k(\nu) [I_r^0(\nu_s) - I_c^0(\nu_s)]^{k-1} \quad (7)$$

式中  $C_k(\nu)$  是回归系数。现在, 如果能够知道  $p_c$ , 则可通过(4)和(6)式计算出

$[I_r^0(\nu_s) - I_c^0(\nu_s)]$ , 再通过(7)和(5)式可得到  $Q_i^0(\nu)$ 。

假定  $S_X$  和  $S_Y$  为对角线矩阵,  $I_r^0(\nu)$  的误差为  $\sigma_r(\nu)$ ,  $G(\nu, \nu_s)$  的误差为  $\sigma_G(\nu, \nu_s)$ , 则

$$S_x(j, j) = \begin{cases} \sigma_r^2(\nu) & (j=1) \\ \{ [G(\nu, \nu_s) \sigma_r(\nu_s)]^2 + \{ [I_r^0(\nu_s) - I_{j-1}(\nu_s)] \sigma_G(\nu, \nu_s) \}^2 \} & (j \neq 1) \end{cases} \quad (8)$$

式中  $j=1, \dots, M+1$ 。在(8)式中, 省略了探测误差, 因为它比晴空辐射初值的误差小很多。 $I_i(\nu)$  的误差即是探测误差  $\sigma(\nu)$ , 于是

$$S_Y(i, i) = \sigma^2(\nu)$$

式中  $i=1, \dots, M$ 。

上述计算方法与 Aoki 的 Q8 方法类似, 在此称为方法 A。

### 三、计算方法的改进

方法 A 有如下缺点:

1. 采用典型大气廓线所计算的晴空辐射值作为初值, 如果选用的大气廓线较少, 则初值偏差较大, 带来较大的计算误差; 如果选用大气廓线很多, 则带来判识的困难。

2. 通道 8 不能参与统计调整法计算, 只能用初值作为其晴空辐射值, 因此误差较大。

3. 由于一般很难得到的云顶高度上  $p_c$  的精确值, Aoki 曾采用  $I_r^0(\nu_s) - I_c^0(\nu_s) = 30 \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$  去计算  $Q_i^0(\nu)$ , 自然带来一定误差。

4. 由于微波辐射计 (MSU) 的测值受云的影响小, HIRS/2 的第 1、2 通道也不受云的影响, 它们和 HIRS/2 受云影响通道的晴空辐射值有很强的相关性, 这些信息在方法 A 中没有得到利用。

在采用统计调整法计算待估参数时, 初值  $X^0$  和  $S_X$  的选取是关键问题。现在, 我们考虑用 MSU 第 2—4 通道, HIRS/2

第1、2通道和 AVHRR 第4通道的测值, 用线性回归方程计算 HIRS/2 第3—16, 18—19通道的晴空辐射作为初值。

$$T_B(\nu) = D_0(\nu) + \sum_{k=1}^6 D_k(\nu) T_{Bk} \quad (9)$$

式中,  $D(\nu)$  是回归系数,  $T_B(\nu)$  和  $T_{Bk}$  都是亮温值。根据普朗克公式,

$$I_r^0(\nu) = c_1 \nu^3 / \exp [c_2 \nu / T_B(\nu) - 1] \quad (10)$$

式中  $c_1, c_2$  是常数。

在此, AVHRR 第4通道的测值是指其晴空辐射值, 它的选用是很重要的。由于 AVHRR 第4通道和 HIRS/2 第8通道的光谱范围接近, 因此可较精确的确定 HIRS/2 第8通道的晴空辐射, 同时也有助于改进权重函数接近地面各通道  $I_r^0(\nu)$  的精度。在实际应用时, 求 AVHRR 第4通道的晴空测值要比求 HIRS/2 视场中的云量简单得多, 它既不需要两种仪器视场的精确匹配, 云的判识也仅为剔除有云的数据。因此, AVHRR 第4通道的晴空测值可具有较高精度, 所耗时也不会很多。

当  $I_r^0(\nu)$  得到后, 可用与方法 A 相同的方法求  $Q^0(\nu)$  和  $S_x$ , 并解出  $X$ , 其中  $S_y$  的数值不变。以上方法称为方法 B。方法 B 克服了方法 A 第1、2、4条缺点, 但第3条缺点仍存在。

#### 四、数值模拟试验

采用400条代表中纬度地区各种天气状况的大气温、湿廓线  $T(p)$  和  $W(p)$ , 气压  $p$  分为40层, 由1000—0.1hPa。任取其中

200条大气廓线作为统计样本, 并取其平均值为典型的大气廓线; 另外200条廓线用于方法的检验。

数值模拟试验的步骤如下:

1. 通过计算, 取得400条大气廓线的 HIRS/2 第1—19通道, MSU 第2—4通道, AVHRR 第4通道的晴空辐射值和亮温值。

2. 求统计样本的平均大气廓线。通过(4)、(6)式, 计算  $I_r^0(\nu)$  和  $I_c^0(\nu)$ , 并用最小二乘法求取(7)式的回归系数  $C$ 。

3. 用统计样本200条大气廓线的数据, 通过最小二乘法求取(9)式的回归系数  $D$ , 其相关系数如表1所示, 表明除个别通道外其相关性非常好。

表1 MSU(2—4通道)、HIRS(1—2通道)、AVHRR(4通道)与HIRS/2其他通道亮温值之间的相关性

通道	相关系数	通道	相关系数	通道	相关系数	通道	相关系数
3	0.9995	7	0.9978	11	0.9181	15	0.9988
4	0.9973	8	0.9994	12	0.8316	16	0.9847
5	0.9983	9	0.9961	13	0.9990	18	0.9967
6	0.9984	10	0.9996	14	0.9990	19	0.9977

4. 计算 HIRS/2 模拟观测辐射值: 取视场数  $M=9$ , 每个视场中云顶高度和有效云量取值如表2所示, 通过(4)、(6)式计算检验样本200条大气廓线的  $I_r(\nu)$  和  $I_{c_i}(\nu)$ , 并通过(1)式计算各视场的观测值  $I_i(\nu)$ 。

5. 用方法 A 计算晴空辐射

为了使试验结果与 Aoki Q8 方法类

表2 云顶高度和有效云量取值表

视场序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
有效云量( $n_i$ )	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
云顶高度(层序号)	35	35	35	30	30	30	25	25	25
云顶高度(hPa)	700	700	700	475	475	475	250	250	250

比, 只取与典型大气廓线相近的大气廓线作试验, 选择判据定为

$$|T_B(\nu_s) - T_B^*(\nu_s)| \leq 5K \quad (11)$$

式中  $T_s(\nu_s)$  和  $T_B^*(\nu_s)$  分别为待选和典型

大气廓线的 HIRS/2 第 8 通道的晴空亮温值。在检验样本中, 满足 (11) 式的大气廓线有 56 条。

在统计样本中, 满足 (11) 式的大气廓线有 55 条, 统计与典型廓线之间晴空辐射值的偏差为  $\sigma_r(\nu)$ 。HIRS/2 各通道测值的噪声等效辐射值  $\sigma(\nu)$ , 在美国地球卫星资料情报服务局 (NESDIS) 提供的仪器参数表中给出。

取典型大气廓线的晴空辐射值为  $I_r^0(\nu)$ ; 取  $I_r^0(\nu_8) - I_c^0(\nu_8) = 30\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ , 通过 (7) 和 (5) 式取得  $Q_i^0(\nu)$ ; 适当取值  $\sigma_G(\nu, \nu_8)$ , 通过 (8) 式取得  $S_X$ ; 取  $S_Y$  的值为  $\sigma^2(\nu)$ 。于是, 由 (3) 式即可算出晴空辐射值  $I_r(\nu)$ 。

#### 6. 用方法 B 计算晴空辐射

计算步骤基本上与方法 A 相同, 不同点是:

(1) 用统计样本中满足 (11) 式的 55 条廓线的数据, 通过 (9) 和 (10) 式计算晴空辐射, 并算出误差值  $\sigma_r(\nu)$ 。对满足 (11) 式的检验样本试验的  $I_r^0(\nu)$  亦是通过对 (9) 和 (10) 式求出。

(2) 在用与典型大气廓线相近的大气廓线作试验之后, 对检验样本所有 200 条廓线进行试验, 这时,  $\sigma_r(\nu)$  由统计样本 200 条廓线数据求出。

(3) 由于在求取 AVHRR 第 4 通道的晴空辐射值时, 可能会产生误差, 为了检验其影响, 在所有样本的该通道亮温值中加上 1K 的随机误差, 重复上述计算过程。

表 3 给出了方法 A 和方法 B 所用的晴空辐射初值和计算结果的亮温均方根误差, 附图表示在采用与典型大气廓线相近的大气廓线时, 方法 A 使用的晴空辐射初值以及方法 A、B 计算结果的辐射值百分比误差。

表 3 方法 A、B 所用晴空辐射初值和计算结果的亮温值均方根误差 (单位: K)

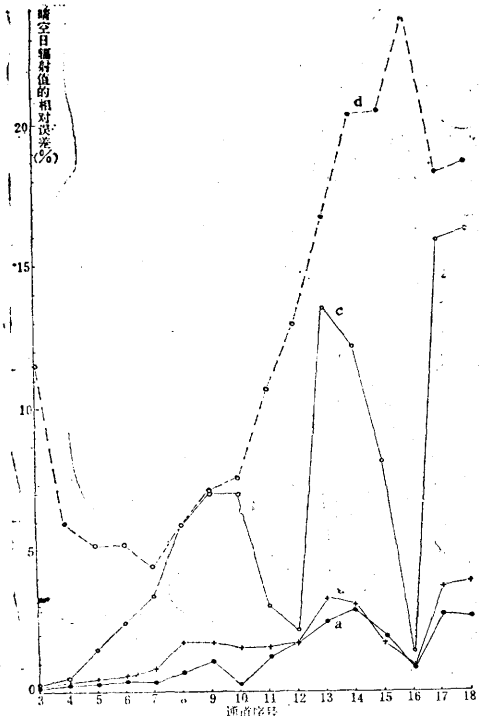
通道	方 法 A		方 法 B					
	初值误差	结果误差	初 值 误 差		结 果 误 差			
			$\Delta T = 0$	$\Delta T = 1$	N = 56 $\Delta T = 0$	N = 56 $\Delta T = 1$	N = 200 $\Delta T = 0$	N = 200 $\Delta T = 1$
3	5.65	0.12	0.15	0.15	0.09	0.09	0.08	0.08
4	3.16	0.22	0.26	0.26	0.11	0.11	0.13	0.13
5	2.92	0.86	0.31	0.31	0.17	0.21	0.22	0.25
6	3.09	1.45	0.40	0.41	0.21	0.32	0.28	0.38
7	2.91	2.12	0.58	0.69	0.21	0.53	0.33	0.63
8	3.53		0.46	1.08				
9	3.76	3.69	1.25	1.63	0.59	0.97	0.74	1.16
10	3.21	2.97	0.36	0.84	0.10	0.67	0.15	0.77
11	3.66	1.02	2.42	2.42	0.42	0.52	0.57	0.66
12	3.65	0.60	2.35	2.35	0.48	0.48	0.61	0.61
13	3.52	2.85	0.50	0.76	0.54	0.71	0.92	1.16
14	3.92	2.34	0.43	0.51	0.55	0.60	0.69	0.80
15	3.69	1.46	0.35	0.36	0.35	0.31	0.35	0.34
16	3.89	3.21	0.70	0.70	0.13	0.13	0.14	0.14
18	3.70	3.23	1.16	1.48	0.59	0.81	1.05	1.36
19	3.62	3.15	0.92	1.36	0.53	0.79	1.02	1.35

### 五、分析和结论

从图 1 和表 3 可以看出:

1. 方法 A 计算晴空辐射的效果并不算

好, 少数通道晴空辐射的相对误差超过 10%。由此可见, Aoki Q8 方法的实际误差要比他给出的相对偏差值要大, 实用效果也不一定好。



附图 HIRS/2各通道晴空辐射值的相对误差 (单位: %)

曲线a: 方法B的计算误差( $\Delta T = 0K, N = 56$ )  
 曲线b: 方法B的计算误差( $\Delta T = 1K, N = 56$ )  
 曲线c: 方法A的计算误差  
 曲线d: 方法A初值的偏差

2. 方法B计算晴空辐射的误差值比方法A显著减小。晴空辐射值的相对误差为: 第3—7、16通道误差小于1%, 第9—12、15通道误差小于2%, 第13、14、18、19通道误差小于4%。比Aoki给出的Q8方法相对误差值, 看来还要小一些。

3. 采用方法B时, 通道8的晴空辐射值的精度有所改善, 它基本上反映了AVHRR第4通道晴空辐射值的精度, 辐射值相对误差一般小于2%。

4. 采用方法B时, 全部检验样本和与典型大气廓线相近的样本的试验结果相差不

大, 说明此方法可适用于各种大气廓线。

5. 采用方法B时, AVHRR第4通道晴空辐射值的误差主要对低层通道有影响, 而且影响有所减弱。

6. 不管是方法A还是方法B, 对于红外长波或高层通道, 如第3—7、11、12、16通道, 计算效果较好。对于红外短波和低层通道, 如13—15、18、19通道, 计算效果较差, 这个结果和Aoki的试验结果一致。

综上所述, 用统计调整法计算晴空辐射是一个有效的方法。为了简化处理, Aoki提出Q8方法, 通过本文方法A的数值模拟试验, 显示其处理结果的误差较大。然而经本文提出的方法B改进后, 精度有显著改善, 而且处理方法亦较简单, 显示出具有相当好的实用价值。

目前, 为了改进大气廓线的反演精度, 对反演方法进行了大量的研究。然而对于反演精度同样有重大影响的晴空辐射计算方法, 研究工作却很少, 因此, 进一步开展晴空辐射计算方法的研究是十分必要的。

### 参 考 文 献

- [1] Smith, W. L., An improved method for calculating tropospheric temperature and moisture from satellite radiometer measurements, Mon. Wea. Rev., 96, 387—396, 1968.
- [2] McMillin, L. M., An improved technique for obtaining clear radiances from cloud-contaminated radiances, Mon. Wea. Rev., 106, 1590—1597, 1978.
- [3] Aoki, T., Statistical determination of clear radiance from cloud-contaminated radiances, J. Meteor. Soc. Japan, 58, 528—536, 1980.
- [4] Aoki, T., An improved method to retrieve the clear column radiance from partially cloudy spots of radiometer on board satellite, J. Meteor. Soc. Japan, 60, 758—764, 1982.

## An improved method for retrieving the clear radiance

Fan Tianxi

(Satellite Meteorological Center)

### Abstract

A method for retrieving the clear radiation from several adjacent fields of view of HIRS/2 which are partially contaminated by clouds is developed. The accuracy of this method is compared with that of Aoki's Q8 method by numerical simulation study. The present method is more accurate than Aoki's Q8 method.