

FY-3A 气象卫星红外分光计温度廓线模拟反演试验

漆成莉 董超华 张文建 张凤英 张鹏

(国家卫星气象中心,北京 100081)

摘要

为了考察风云三号(FY-3)气象卫星红外分光计的性能,以该仪器初样阶段的光谱通道特征和仪器响应函数为基础,进行大气温度垂直廓线模拟反演。选用红外分光计 $15\ \mu\text{m}$ CO_2 吸收带的不同通道组合进行模拟反演,结果表明:总体上红外分光计具有较好的大气温度反演能力,窗区通道8的加入可有效提高近地面层温度反演精度;利用迭代算法反演大气温度时,初估廓线对反演精度影响较大,初估廓线与真值愈接近,反演精度愈高;现有仪器通道灵敏度设计指标可满足大气温度反演基本要求,如仪器灵敏度降低,反演精度也随之降低,提高仪器灵敏度,有利于提高仪器的使用效果。

关键词: FY-3A 红外分光计 温度廓线 反演

引言

FY-3 气象卫星是我国第二代极轨气象卫星,其有效载荷、水平分辨率、地面接收处理系统较FY-1系列都有跨越式发展,最显著的改进是它首次携带了红外分光计、微波温度计、微波湿度计3个大气垂直探测仪器,将实现全球三维、全天候、多光谱、定量的大气和表面参数探测,提供全球的温度、湿度廓线和云层特征等地球物理参数。红外分光计(Infrared Atmospheric Sounder, IRAS)是FY-3A主要的大气探测仪器,也是我国首次在卫星上装载自行研制的垂直探测仪器。为了检验设计指标满足基本需求的程度,在卫星发射前需做大量的模拟试验研究工作。本文利用红外分光计初样阶段的指标,开展了不同通道组合、不同初估廓线和不同仪器噪声水平的大气温度反演研究,为FY-3A红外分光计正样研制提供重要参考信息。试验结果表明:现有红外分光计 $15\ \mu\text{m}$ CO_2 吸收带通道的光谱响应和噪声水平能够满足大气温度反演基本要求,选用的初估廓线应尽量与实际大气温度状态靠近。

1 红外分光计通道透射率的计算及正演卫星辐射率测值

我们选用目前国际上广泛使用的快速辐射传输模式RTTOV7计算FY-3A红外分光计卫星通道透射率。给定大气状态(大气温度、水汽和臭氧廓线)以及表面参量(表面发射率、气压、温度和表面裸露温度),计算观测角为 θ 传播路径的大气透射率。其方法是

先用回归方程模拟出模式相应气压层 j 到大气层顶 3 种气体(均匀混合气体、水汽、臭氧)的光学厚度 $\sigma_{v,j}$ (按 3 组气体预先计算好的回归系数)^[1]:

$$\sigma_{v,j} = \sigma_{v,j-1} + \sum_{k=1}^M a_{v,j,k} \cdot X_{j,k} \quad (1)$$

式(1)中 $X_{j,k}$ 为依赖于廓线的预报因子,按单色光学厚度计算公式的一定函数展开(表略), M 为预报因子的个数, $a_{v,j,k}$ 为回归系数,也称快速透射率系数。

把光学厚度 $\sigma_{v,j}$ 按下式转化为气体的透射率 $\tau_{v,j}$:

$$\tau_{v,j} = \exp(-|\sigma_{v,j}|) \quad (2)$$

总的通道透射率 $\tau_{v,j}^{\text{ot}}$ 则为^[2]:

$$\tau_{v,j}^{\text{ot}} = \tau_{v,j}^{\text{mix}} \cdot \tau_{v,j}^{\text{wv}} \cdot \tau_{v,j}^{\text{oz}} \quad (3)$$

式(3)中上标 mix, wv, oz 分别表示均匀混合气体、水汽、臭氧 3 种气体种类。

红外无散射晴空大气辐射传递方程可写成^[3]:

$$\hat{I}(v^*, \theta) = B(v^*, T(p_s)) \tau_s(v^*, p_s, \theta) + \int_{\ln p_s}^{\ln p_\infty} B(v^*, T(p)) \frac{\partial \tau(v^*, p, \theta)}{\partial \ln p} d \ln p \quad (4)$$

式(4)中, $B(v^*, T(p))$ 为黑体普朗克函数,可写成:

$$B(v^*, T(p)) = c_1 v^{*3} \{ \exp[c_2 v^* / T(p)] - 1 \}^{-1} \quad (5)$$

$\hat{I}(v^*, \theta)$ 表示中心波数为 v^* 卫星通道探测到的辐射率, $\tau(v^*, p, \theta)$ 为通道透射率,下标 s 表示地面变量, c_1 和 c_2 为普朗克常数。

定义权重函数 K ^[4]:
$$K = \frac{\partial \tau(v^*, p, \theta)}{\partial \ln p} \quad (6)$$

表 1 列出红外分光计的光谱通道特性设计指标,包括光谱通道中心波数、中心波长、通道宽度(半功率带宽)、主要吸收气体、通道噪声(等效噪声辐射率差,即 $NE\Delta N$)和通道探测的贡献最大气压层(p)等。正演计算中首先需要计算通道透射率和权重函数。红外分光计初样阶段的光谱响应数据由仪器研制单位提供。我们以逐线积分模式 GENLN2 的 0.5 cm^{-1} 谱分辨率的精确大气透射率数据库和快速透射率模式 RTTOV7 为基础,计算了 FY-3A 红外分光计通道的快速透射率系数,从而对任意给出的大气状态都可快速精确地计算出各个模式气压层到大气层顶的大气透射率。

表 1 红外分光计光谱通道特征

通道序号	中心波数 / cm^{-1}	中心波长 / μm	半功率带宽 / cm^{-1}	主要吸收 气体成分	最高温 度/ K	NE ΔN / $\text{m W}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-1})$	贡献最大层 / hPa
1	669	14.95	3	CO ₂	280	4.00	30
2	680	14.71	10	CO ₂	265	0.80	60
3	690	14.49	12	CO ₂	250	0.60	100
4	703	14.22	16	CO ₂	260	0.35	400
5	716	13.97	16	CO ₂	275	0.32	600
6	733	13.84	16	CO ₂ / H ₂ O	290	0.36	800
7	749	13.35	16	CO ₂ / H ₂ O	300	0.30	900

续表

通道序号	中心波数 / cm^{-1}	中心波长 / μm	半功率带宽 / cm^{-1}	主要吸收 气体成份	最高温 度/ K	NE Δ N/ $\text{m W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$	贡献最大层 / hPa
8	802	12.47	30	大气窗区	330	0.20	地表
9	900	11.11	35	大气窗区	330	0.15	地表
10	1030	9.71	25	O ₃	280	0.20	25
11	1345	7.43	50	H ₂ O	330	0.23	800
12	1365	7.33	40	H ₂ O	285	0.30	700
13	1533	6.52	55	H ₂ O	275	0.30	500
14	2188	4.57	23	N ₂ O	310	0.009	1000
15	2210	4.52	23	N ₂ O	290	0.004	950
16	2235	4.47	23	CO ₂ / N ₂ O	280	0.006	700
17	2245	4.45	23	CO ₂ / N ₂ O	266	0.006	400
18	2388	4.19	25	CO ₂	320	0.003	大气
19	2515	3.98	35	大气窗区	340	0.003	地表
20	2660	3.76	100	大气窗区	340	0.002	地表
21	14500	0.69	1000	大气窗区	100 % A	0.10 % A	云
22	11299	0.885	385	大气窗区	100 % A	0.10 % A	地表
23	10638	0.94	550	H ₂ O	100 % A	0.10 % A	地表
24	10638	0.94	200	H ₂ O	100 % A	0.10 % A	地表
25	8065	1.24	650	H ₂ O	100 % A	0.10 % A	地表
26	6098	1.64	450	H ₂ O	100 % A	0.10 % A	地表

注:表中 A 为反照率(Albedo),100 % A 表示测量的最高反照率值,0.10 % A 表示反照率探测精度。

2 大气温度廓线反演

2.1 反演试验准备

我们采用物理迭代算法^[5]对 FY-3A 红外分光计进行温度廓线模拟反演试验,以检验该仪器的大气温度廓线的反演能力及反演精度对仪器噪声的敏感性等。试验选择哈尔滨、北京、杭州、三亚 4 个地区 2003 年 1 月、4 月、7 月、10 月(代表 4 个季节)4 个月,每个月随机取 5 天的 00:00(世界时,下同)的常规探空资料,共有 80 个大气样本参加卫星观测值模拟计算。

利用已算的透射率系数计算红外分光计的通道透射率 $\tau(v^*, p, \theta)$ 及权重函数 $K(p)$, 利用式(4)正演模拟观测角 $\theta=0^\circ$ 的卫星通道辐射率 $\hat{I}(x_i)$ 。

大气温度物理迭代反演的计算步骤如下:

(1) 给出一条初估值温度廓线 $T(p)$; $T^j(p)$, 此步骤中 j 为迭代次数, $j=1$ 。

(2) 计算出对应各个气压层的 Planck 函数值 $B^j(x_i, T(p))$, 代入式(4)计算出第 i 个通道的卫星模拟测值 $\hat{I}^j(x_i)$ 。

(3) 以 $B^{j+1}(x_i, T(p)) = B^j(x_i, T(p)) + [\hat{I}(x_i) - \hat{I}^j(x_i)]$ 计算每个气压层迭代第 $j+1$ 次的辐射率, $\hat{I}(x_i)$ 为第 i 个通道的卫星观测值。再将 $B^{j+1}(x_i, T(p))$ 代入式(5)反演出每个通道 x_i 对应的 $T^{j+1}(x_i, p)$ 。

(4) 用式(7)计算出新的估计温度值 $T^{j+1}(p)$

$$W(x_i, p) = d T(x_i, p), p < p_s, \quad W(x_i, p_s) = T(x_i, p_s),$$

$$T^{j+1}(p) = \sum_{i=1}^n T^{j+1}(x_i, p) W(x_i, p) / \sum_{i=1}^n W(x_i, p) \quad (7)$$

(5) 重复步骤(2)~(4),直至满足收敛条件则终止迭代。收敛条件为

$$|\hat{I}^{j+1}(x_i) - \hat{I}(x_i)| \leq \varepsilon \quad (8)$$

$\hat{I}^{j+1}(x_i)$ 为迭代到第 $j+1$ 次的红外分光计第 i 个通道的卫星模拟测值, ε 通常取仪器噪声。

2.2 反演试验及结果分析

2.2.1 不同通道组合对温度反演的敏感性试验

试验①:选用 IRAS 位于 $15 \mu\text{m}(600 \sim 800 \text{ cm}^{-1})$ CO_2 吸收带的前 7 个通道,进行不同通道组合的大气温度反演,取式(8)的迭代收敛条件, ε 为 IRAS 的每个通道的设计噪声(表 1 中的 $\text{NE}\Delta\text{N}$)。我们选用美国 1976 年标准大气作为温度初估廓线进行大气温度反演试验,将反演结果与真值廓线进行比较,计算出均方根误差,并将结果绘于图 1a。

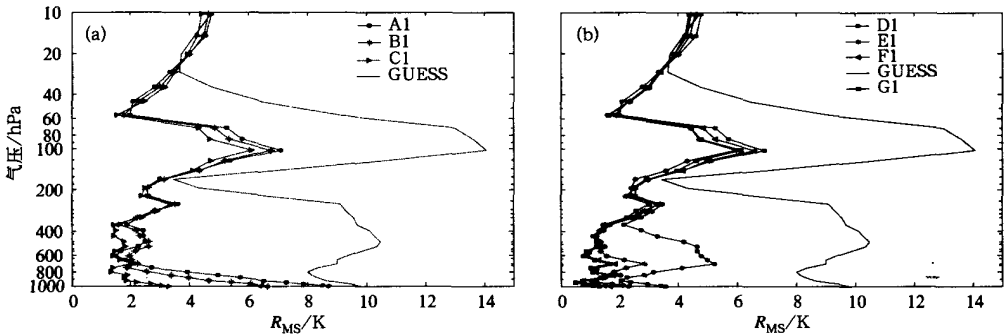


图 1 IRAS 温度模拟反演误差比较
(以标准大气为初始值)

试验②:IRAS 通道 8 为窗区通道,主要反映地表辐射信息。我们在试验①的基础上各增加通道 8,其他条件保留与试验①一致。另外加一组通道组合(DI),即用通道 1~4 和通道 8,进行大气温度反演试验。将各种通道组合的反演结果分别与真值进行比较,计算出温度廓线各层平均均方根误差 R_{MS} ,同时也计算了初估廓线(GUESS)与反演结果的偏离程度(均方根误差),见图 1b。试验方案和反演结果的平均均方根误差列于表 2。

表 2 初估廓线为美国 1976 年标准大气时不同通道组合的温度反演结果

通道组合	1~5	1~6	1~7	1~4,8	1~5,8	1~6,8	1~8
方案	A1	B1	C1	D1	E1	F1	G1
平均 R_{MS}/K	3.97	3.54	2.72	3.66	2.59	2.46	2.31

分析图 1 可知:总体而言,①BI 组结果优于 A1 组,C1 组结果最好;②大气中间层反演结果优于上层和下层,例如从 800 hPa 至 300 hPa 之间的 R_{MS} 均小于 3 K;③对流层顶附近反演误差较大;④A1,B1,C1 增加窗区通道后,在 400 hPa 以下高度反演结果有明显

改进,近地面层改善最大,均方根误差均小于 2 K; ⑤D 组方案没有通道 5(权重函数峰值高度位于 600 hPa 左右),反演结果比其他 3 组方案在 600 hPa 处精度要差。

以上结果表明,不同的通道组合有不同的温度反演效果;权重函数峰值高度处于对流层顶的通道少,该气压层的温度变化大,现有通道为其提供的信息较少;权重函数峰值高度处于近地面层的通道(通道 6 和通道 7)和窗区通道(通道 8)是近地面层和地面层温度反演精度提高的关键。

2.2.2 不同初估廓线对温度反演结果的敏感性试验

为了考察初估值对迭代反演结果的影响,我们先进行季节平均大气温度廓线计算,并以此作为初估值,进行了试验研究。选择我国哈尔滨、北京、杭州、三亚 1、4、7、10 月 4 个月的月平均大气温度廓线作为该地区不同季节的平均温度廓线,共 16 个季节平均样本。反演时每个试验样本选对应地区和对对应季节的平均温度廓线样本作为初估值,通道组合方案同上节叙述。为便于分析比较,将通道组合方案用不同标识符。表 3 给出了各种方案反演结果的平均均方根误差 R_{MS} ,并将表 3 与表 2 相应方案的均方根误差的差值列于表 4。图 2 是反演结果的均方根误差垂直分布。

表 3 初估廓线为季节平均大气温度廓线时不同通道组合的温度反演结果

通道组合	1~5	1~6	1~7	1~4,8	1~5,8	1~6,8	1~8
方案	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2
平均 R_{MS}/K	2.42	2.25	1.85	2.25	1.78	1.71	1.64

表 4 不同初估廓线温度反演结果的比较

方案	A2 - A1	B2 - B1	C2 - C1	D2 - D1	E2 - E1	F2 - F1	G2 - G1
误差减少值/K	1.55	1.29	0.87	1.41	0.81	0.75	0.67

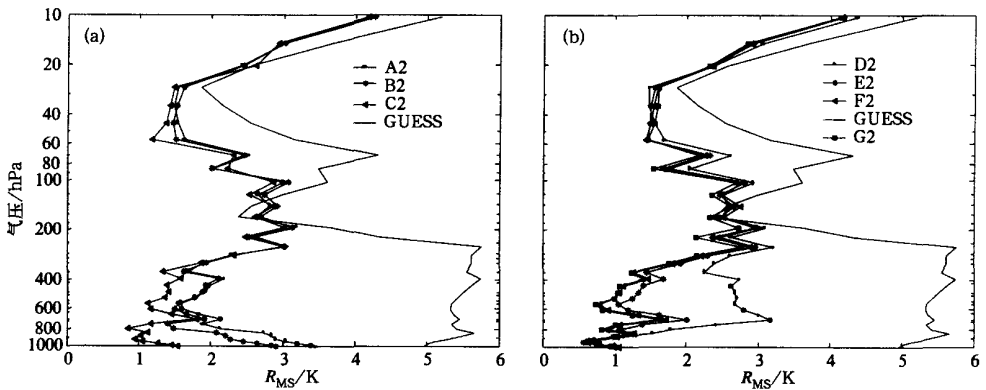


图 2 IRAS 温度模拟反演误差比较
(以季节平均大气为初始值)

由表 4 及图 1 和图 2 可以看出:以季节平均温度廓线为初始值的反演结果都要明显优于标准大气为初始值的反演结果,在各高度层上,以季节平均大气为初始值的温度反演结果 R_{MS} 均小于 6 K,而以标准大气为初始值的反演结果 R_{MS} 在大部分高度层次上都大

于 6 K; 两种不同初始值的温度反演精度差别最大在近地面层和对流层顶附近。

2.2.3 IRAS 通道仪器噪声对温度反演的敏感性试验

卫星进入运行轨道后, 天上仪器各通道的实际辐射测值中不仅有来自地气系统的辐射值, 还包括仪器本身噪声^[6]。因此我们按式(4)正演卫星辐射率测值, 取 $\theta = 0^\circ$, 将仪器通道噪声加在式(4)右边。

为了从应用角度对仪器研制单位提出具有科学依据的仪器灵敏度需求, 我们取通道组合方案 G1 (通道 1 ~ 8), 仪器噪声按以下 4 种情况进行反演试验, 以考察通道信噪比对大气温度反演的影响, 即: ①现有仪器噪声; ②降低现有仪器噪声(取 0.5 倍); ③现有仪器噪声放大 1.5 倍; ④现有仪器噪声放大 2 倍。图 3 给出了反演结果的均方根误差在各气压层上分布情况。试验方案和反演结果的平均均方根误差列于表 5。

由表 5 及图 3 可知: ①提高仪器灵敏度, 即随着卫星仪器噪声的不断减小, 反演精度随之提高。在对流层不同噪声下的反演结果 R_{MS} 最大可相差 0.5 K, 而在 20 hPa 以上 R_{MS} 最大可相差 2 K。②反演精度受仪器噪声影响最大为 40 hPa 以上高度。

3 结论与讨论

通过对 IRAS 按不同的通道组合, 不同的初始值以及不同的仪器通道噪声进行的大气温度反演对比试验, 可以得到如下几点基本结论:

- (1) IRAS 前 8 个 CO_2 通道具有反演大气温度廓线的能力。
- (2) 窗区通道 8 提供的信息十分重要, 可有效提高近地面层温度反演精度。
- (3) 现有通道的噪声水平基本可满足大气温度反演的设计要求, 如能进一步提高仪器灵敏度, 则可有效提高温度反演的整体精度。

(4) 利用迭代算法反演大气温度时, 初估廓线对反演精度影响较大, 初估廓线与真值愈接近, 反演精度愈高。本试验中选用美国 1976 年标准大气廓线, 反演精度明显差, 用我国的季节平均廓线作为迭代初值, 反演精度明显改善, 在大多数气压层精度均在 2 K 以内, 主要是季节平均廓线与真值廓线偏离程度相对较小。

(5) 试验选取多种通道组合, 利于卫星上天后仪器个别通道发生故障时, 地面系统可对大气温度反演所用信息进行应急处理。

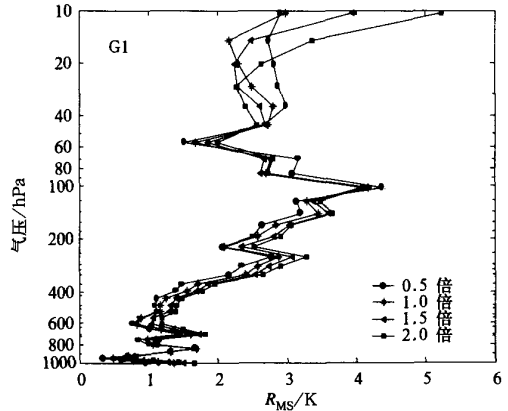


图 3 不同噪声下 IRAS 温度模拟反演误差比较

表 5 初估廓线为美国 1976 年标准大气时不同仪器噪声的温度反演结果

仪器噪声	0.5 ϵ	1.0 ϵ	1.5 ϵ	2.0 ϵ
平均 R_{MS}/K	1.92	1.94	2.06	2.2

参考文献

- 1 Matricardi M, Saunder R W. A fast radiative transfer model for simulation of IASI radiances. *Applied Optics*, 1999, **38**: 5679 ~ 5691.
- 2 Matricardi M, Chevallier F, Tjemkes S. An Improved General Fast Radiative Transfer Model for the Assimilation of Radiance Observations. ECMWF Research Dept Tech Memo, 2001. 345.
- 3 董超华,张凤英.利用 NOAA-9 气象卫星测值反演大气温度垂直分布. *红外研究*, 1988, **7A**(2): 125 ~ 130.
- 4 Weinreb M P, Fleming H E, Mc Millin L M, et al. Transmittances for the TIROS Operational Vertical Sounder. NOAA Tech Rep NESS, 1981.
- 5 Smith W L. Iterative Solution of the radiative transfer equation for the temperature and absorbing gas profile of an atmosphere. *Applied Optics*, 1970, **9**(9): 1993 ~ 1999.
- 6 张文建,黎光清,董超华.用卫星遥感资料反演气象参数的误差分析及数值试验. *应用气象学报*, 1992, **3**(3): 266 ~ 272.

EXPERIMENTS WITH ATMOSPHERIC TEMPERATURE PROFILE RETRIEVAL FROM FY-3 A IRAS SOUNDINGS

Qi Chengli Dong Chaohua Zhang Wenjian Zhang Fengying Zhang Peng
(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

To investigate the performance of Infrared Atmospheric Sounder (IRAS) aboard the satellite FY-3 A, the retrieval of the vertical profile of atmospheric temperature is studied based upon the IRAS channel spectral characteristics in its initial design and the spectral response function of the spectrometer. The retrieval is performed using different combinations of channels for 15 μm CO₂ absorption bands of the IRAS, indicating that on the whole the sounder produces higher retrieval and inclusion of channel 8 leads to the remarkable improvement of retrieval precision of near-surface-layer temperature. For the retrieval from an iterative algorithm the first guess profile affects the precision greatly, and the closer the estimated profile to the true value, the higher the accuracy. The designed channel sensitivity meets the required needs of such retrieval. Low sensitivity leads to lowered precision. As a result, the retrieval precision depends strongly on the IRAS sensitivity.

Key words: FY-3 A Infrared Atmospheric Sounder Temperature profile Retrieval