

云参数对 RTTOV5 模式模拟误差的影响分析*

马刚 方宗义 张凤英

(国家卫星气象中心,北京 100081)

提 要

该文根据1998年8月的业务 TOVS 反演的温度、水汽垂直廓线资料以及其它资料,利用 RTTOV5 模式模拟 NOAA14 极轨气象卫星上相应红外探测(HIRS)通道的辐射亮温值,将模拟值对比实测 TOVS 探测资料,结果表明,晴空模式模拟亮温与实测值的误差小于部分有云时的误差,模拟误差受云的影响呈反相变化,对水汽敏感的中低层探测通道在晴空时的误差小于部分有云情况;通过对比白天和夜间短波窗区探测通道模拟误差,分析了其受地面反射太阳光辐射的影响的大小及其原因所在;并利用 RTTOV5 的伴随模式和 Jacobine 模式分析了模式模拟误差对初始场云参数的敏感性。该研究为 TOVS/ATOVS 探测资料在 3DR 或 4DR 变分同化中的直接应用奠定了基础。

关键词:云量 云顶气压 正演模式 模式误差 敏感性

引 言

NOAA(美国国家海洋和大气局)系列极轨气象卫星的 TOVS/ATOVS(Tiros Operational Vertical Sounder/Advanced Tiros Operational Vertical Sounder, Tiros 业务垂直探测器/先进 Tiros 业务垂直探测器)探测资料能够提供地球大气温度、水汽场的垂直分布信息,是目前主要同化进入数值天气预报模式的气象卫星遥感探测资料之一^[1,2]。利用多维变分同化方法,借助一个快速辐射传输模式(正演模式)以及相应的伴随模式,TOVS/ATOVS 探测资料可以直接同化进入数值预报模式,对模式初始场加以订正,提高模式预报准确性^[3]。TOVS/ATOVS 探测资料包括红外探测(HIRS)资料和微波探测(MSU/AMSU)资料,因而正演模式必须在红外波段和微波波段都能够较好的模拟 TOVS/ATOVS 各探测通道的辐射探测值。由于云对地球红外辐射的影响,使得 HIRS 资料在反映云下大气物理场分布方面存在较大的误差,在比较利用快速辐射传输模式模拟 TOVS HIRS 通道辐射值与实际探测资料时会有较大的均方差,因此,现有的快速辐射传输模式在计算 HIRS 辐射亮温时都使用等效晴空辐射值。

RTTOV5 快速辐射传输模式系统包含了快速辐射传输模式以及相应的切线性模式和伴随模式,并在正演(RT)模式方程中考虑了云对地球红外辐射的影响^[4]。由于云等因素的影响,每天业务 TOVS 大气探测资料都有接近 50%不能参与 NWP 模式的变分资料

* 本文得到国家重点基础研究项目“我国重大天气灾害的形成机理和预测理论研究”的资助。

2001-01-08 收到,2001-03-16 收到修改稿。

同化。并且在业务 TOVS 资料反演大气温度、湿度垂直分布的模式中,特别是在夏季,每天有 70% 的反演点是部分有云(云量为 30% ~ 70%)的情况。因此,利用 RTTOV5 模式分析云参数(主要是云顶高度和云量)对 RT 模式计算误差的影响,也就成为将 TOVS 探测的辐射资料同化进入 NWP 模式前的必要工作之一。

本文根据 1998 年 8 月的业务 TOVS 反演的温度、水汽垂直廓线资料、国际标准臭氧廓线以及北半球温度、水汽的气候廓线资料合成 RTTOV5 初始场资料,计算 NOAA14 极轨气象卫星上相应红外探测(HIRS)通道的辐射亮温值(其中,云量和云高有业务 TOVS 反演资料提供近似表达)。并将 TOVS 微波(MSU)扫描点的探测资料与 HIRS 扫描点作空间匹配,利用匹配后的数据对 RTTOV5 正演辐射亮温进行订正,再统计云量和云高对模式模拟误差的影响。这里主要利用 RTTOV5 的伴随模式和 Jacobine 模式分析了模式模拟误差对初始场云参数(云量和云高)的敏感性。

1 模式和资料

RTTOV5 快速辐射传输模式是 ECMWF 用于业务数值天气预报模式中同化 TOVS/ATOVS 辐射探测资料的最新模式。其正演模式方程可以表达为:

$$L(\nu, \theta) = (1 - N) L^{\text{clr}}(\nu, \theta) + N L^{\text{clid}}(\nu, \theta) \quad (1)$$

其中, N 为云量; $L^{\text{clr}}(\nu, \theta)$ 为晴空大气层顶的向上辐射; $L^{\text{clid}}(\nu, \theta)$ 为有云时的大气层顶向上辐射。 $L^{\text{clr}}(\nu, \theta)$ 包含了表面辐射(表面出射辐射和镜面反射)和大气辐射两部分,其定义如式(2)所示:

$$L^{\text{clr}}(\nu, \theta) = \tau_s(\nu, \theta) \xi_s(\nu, \theta) B(\nu, T_s) + \int_{\tau_s}^1 B(\nu, T) d\tau + (1 - \xi_s(\nu, \theta)) \tau_s^2(\nu, \theta) \int_{\tau_s}^1 \frac{B(\nu, T)}{\tau^2} d\tau \quad (2)$$

这里, $B(\nu, T)$ 代表温度为 T 时的 Planck 函数, $\tau_s(\nu, \theta)$ 为表面到外层空间的透过率, τ 为从模式层到外层空间的透过率, $\xi_s(\nu, \theta)$ 为表面出射率, T 是模式层间的平均温度, T_s 为表面温度。

$L^{\text{clid}}(\nu, \theta)$ 的定义为:

$$L^{\text{clid}}(\nu, \theta) = \tau_{\text{clid}}(\nu, \theta) B(\nu, T_{\text{clid}}) + \int_{\tau_{\text{clid}}}^1 B(\nu, T) d\tau \quad (3)$$

这里, $\tau_{\text{clid}}(\nu, \theta)$ 为云顶到外层空间的透过率, T_{clid} 为云顶温度。对于水云的红外辐射,云顶出射率假设为均一值($\varepsilon=1$)。

RTTOV5 模式的初始输入变量包括从地面到 0.1 hPa 高空的 43 个等压面的温度、水汽和臭氧资料以及地表温度、云量和云顶高度等要素,如表 1 所示。由于 HIRS 资料无法观测到云下的大气温度、湿度场的垂直分布信息,而 MSU 资料的水平分辨率远小于 HIRS 资料,因此,一般用 TOVS 资料反演大气温度、湿度廓线时,将云的影响按云量划分等级,对扫描点区域内为晴空或部分有云的情况才反演该扫描点的大气温度、湿度廓线,对阴天的情况不作反演。在 TOVS 反演中,认为云量小于 1 成时为晴空,云量大于 7 成时

为阴天,其它情况为部分有云。云顶高度一般用云顶气压表示,在云区云顶作为模式下边界。通过统计对比 RTTOV5 模式模拟亮温与 HIRS 仪器观测的辐射亮温,本文主要讨论云参数(特别是云量)变化时对 RTTOV5 模式误差的影响。

表 1 RTTOV5 初始输入变量

变量种类	变量内容	单位
廓线变量	大气温度	K
	水汽	kg/kg
	臭氧含量	DU
	云中液态水含量(未使用)	
表面参数	地面 2 m 的气温	K
	地面 2 m 的水汽含量	kg/kg
	表面气压	hPa
	地面 2 m 风速(u 向量)	$m \cdot s^{-1}$
地表参数	地面 2 m 风速(v 向量)	$m \cdot s^{-1}$
	地表温度	K
云参数	云顶气压	hPa
	云量	
出射率	表面出射率	

本文使用了 1998 年 8 月业务 TOVS 资料反演的温度、水汽垂直廓线,同时利用 NESDIS 标准气候廓线库(1200 条廓线)合成不同纬度带、不同季节的气候参考廓线,将其线性插值到 HIRS 扫描点的经纬度位置和时刻后,再用插值的廓线取代对流层以上由 TOVS 反演资料外插的数据,从而构成一条完整的 RTTOV5 模式初始廓线。臭氧廓线取自 NESDIS 在全球同时观测的 34 条臭氧、温度和水汽廓线以及其它 383 条臭氧观测廓线合成的廓线。卫星观测资料采用的是同时段的 NOAA14 极轨卫星红外(HIRS)通道经过等效晴空亮温订正的资料。

2 实验分析

表 2 给出了 NOAA-14 HIRS 光谱通道特征及其主要探测目的。

由表 2 可以看出,HIRS 19 个红外探测通道反映了不同等压面上大气状态的特性。根据不同通道的光谱特征可以确定大气能量对通道主要贡献的峰值高度(图略),从中可以确定不同等压面上大气状态对每一通道探测值的影响。

(1) 云量对模式误差的影响

由于云覆盖的影响,HIRS 探测器不能探测到云下的大气温度、湿度垂直分布,因此一般认为对于部分有云的情况,RTTOV5 模式模拟的辐射值与实测值的误差应该大于晴空无云状态下的误差。图 1 为不同云量情况下 RTTOV5 对 19 个 HIRS 通道的模拟计算辐射亮温与实际观测的 HIRS 通道探测亮温的均方差比较。由于高层温度探测通道(通道 1,2,3,4 以及短波通道 16)一般在 400 hPa 以上,对云的敏感性较小,因此云量不同时对这些通道模式模拟误差影响很小;受云水的影响,水汽探测通道(通道 11,12)以及受水汽影响较大的低层大气温度探测通道(通道 5,6,7)在晴空条件下的模式模拟均方差远小于部分有云时的值;此外,长波窗区探测通道(通道 8,10)、中低层短波大气温度探测通道

表2 NOAA 14 HIRS 2 光谱通道特征及其主要探测目的

通道序号	中心波数 (cm ⁻¹)	中心波长 (μm)	通道带宽 (cm ⁻¹)	主要吸收气体成份	峰值能量贡献层 (hPa)	主要探测目的
1	669	14.95	3	CO ₂	30	大气温度,15 μm 带对相对冷区大气敏感,5、6 和 7 通道用来计算云参数,6、7 通道对水汽很敏感,用于反演低层水汽
2	680	14.71	10	CO ₂	60	
3	690	14.49	12	CO ₂	100	
4	703	14.22	16	CO ₂	400	
5	716	13.97	16	CO ₂	600	
6	733	13.84	16	CO ₂ / H ₂ O	800	
7	749	13.35	16	CO ₂ / H ₂ O	900	
8	900	11.11	35	大气窗区	地表	表面温度和云检测
9	1030	9.71	25	O ₃	25	总臭氧含量
10	802	12.47	16	大气窗区	地表	水汽廓线,对 CO ₂ 和窗区通道提供水汽订正,通道 12 可用于卷云探测
11	1365	7.33	40	H ₂ O	700	
12	1533	6.52	55	H ₂ O	500	
13	2188	4.57	23	N ₂ O	1000	大气温度,4.3 μm 带对相对暖区大气敏感,而且短波辐射值对云的敏感性比 15 μm 带差
14	2210	4.52	23	N ₂ O	950	
15	2235	4.47	23	CO ₂ / N ₂ O	700	
16	2245	4.45	23	CO ₂ / N ₂ O	400	
17	2420	4.13	28	CO ₂		
18	2515	4.00	35	大气窗区	地表	表面温度,对云和水汽不敏感,对于部分有云视场,与 11 μm 通道一起用于检测云并由此推算表面温度,两个通道联用可从测值中消除反射太阳光的影响
19	2660	3.76	100	大气窗区	地表	
20	14500	0.69	1000	大气窗区	云	云检测,与 4.0 和 11 μm 通道联用确定晴空视场

(通道 13、14、15) 以及臭氧探测通道(通道 9) 在晴空时的模式均方差都不同程度上小于云情况下模式误差,这也证明 HIRS 资料在云区无法反映完整的大气物理参数垂直分布状况,使得 RTTOV5 模式在模拟 HIRS 通道的辐射亮温时产生了不同的误差分布。但是对于短波窗区探测通道而言(通道 17、18、19),有云、无云时的情况正好相反,即晴空条件下由 RTTOV5 模式模拟出的辐射亮温要大于有云情况,并且均方差值的差距几乎为一倍左右。这几个短波窗区探测通道为什么会有与其它通道截然相反的均方差分布则成为需要研究的主要内容之一。

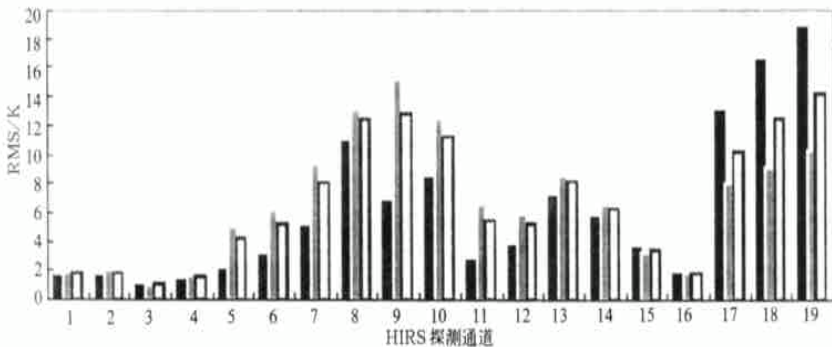


图1 不同云量时模式的均方差

(黑色为晴空条件;浅色为部分有云条件;白色为平均模式均方差)

在白天,短波窗区探测通道强烈的受到反射太阳光辐射的影响^[6],为了验证这几个通道均方差的分布是否受反射太阳光辐射的影响,我们比较了不同时间(白天或夜间)RTTOV5 模式对不同 HIRS 通道的模拟场与实际观测的 HIRS 数据的均方差(图 2)。白天、黑夜的划分以 TOVS 反演资料中附带的观测时刻的太阳高度角为依据,当太阳高度角小于 90°时为白天;当太阳高度角大于 90°时为夜间。由于没有了太阳短波辐射的影响,对长波探测通道(通道 1~7)和水汽探测通道(通道 11、12),在白天和黑夜,模式计算均方差与平均状态基本持平;长波窗区探测通道(通道 8、10)受下垫面变化的影响较大,其模式计算均方差在白天和黑夜的变化也不大;短波通道(通道 13~16)主要探测中低层大气温度,受地面反射太阳光辐射较小,其模式计算均方差的变化也不明显。短波窗区探测通道(通道 17~19)的模式计算均方差随时间有明显变化,这说明这几个通道在白天受到强烈的反射太阳光辐射的影响,从而使得其白天的计算误差远大于夜间的计算误差。

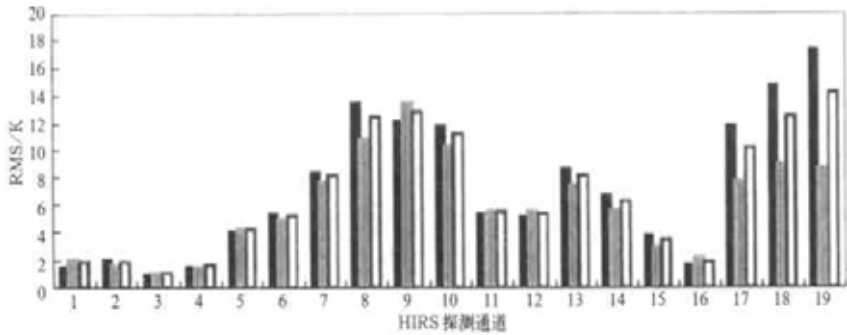


图 2 不同时间模式均方差比较
(黑色为白天;浅色为夜间;白色为模式平均均方差)

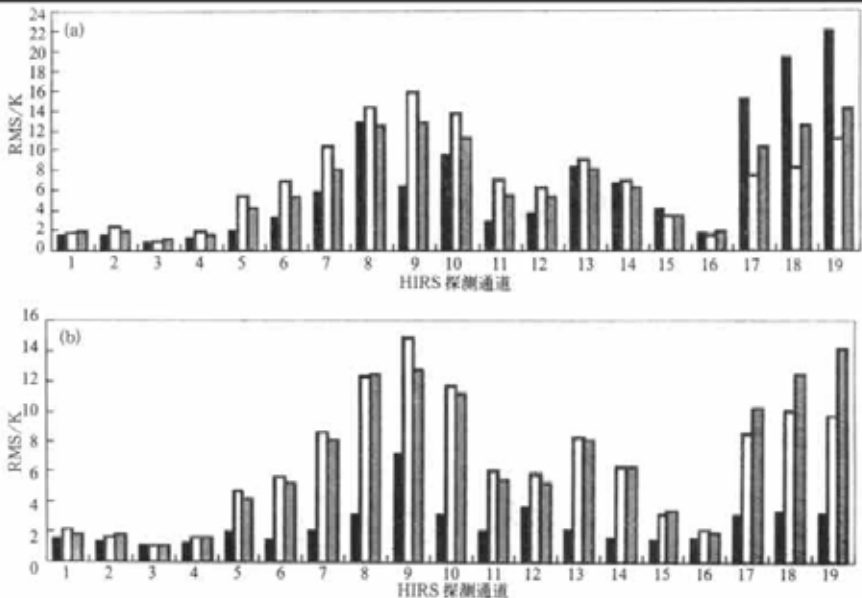


图 3 不同时间不同云状况模式均方差比较 (a) 白天, (b) 夜间
(黑色为晴空;白色为部分有云;浅色为模式平均均方差)

图3显示了区分白天、黑夜情况下云量分布对RTTOV5模式计算均方差的影响。可以看到,RTTOV5对于通道1~16有着与图1相同的计算均方差分布,这种分布不受白天与黑夜的限制;而对于通道17~19,在白天,由于受到云的阻挡,通道只能探测到云表面的信息而不是地表信息,受地面反射太阳光辐射的影响很小,因而白天有云时通道17~19的模式计算均方差小于晴空无云状态;在夜间,没有了地面反射太阳光辐射的影响,RTTOV5在这几个通道的模式计算均方差只受云覆盖量的影响,而晴空条件下模式计算均方差远小于部分有云时的误差。

(2) 利用伴随模式和 Jacobine 模式分析模式误差对云参数的敏感性

以上利用RTTOV5正演模式分析了云量对模式模拟均方差的影响,在RTTOV5模式中,有关云的参数除了云量以外,还有云顶高度(云顶气压)。根据变分同化理论,目标函数的定义为离散函数空间中同化变量与实际观测变量的距离,也就是模式模拟与实际观测变量偏差的平方累加和;根据伴随理论,伴随方程的数值解就是二者的距离相对于同化变量的梯度。如果以模式初始场变量(对于RTTOV5模式而言是初始的温度、湿度廓线)作为同化变量,则这一梯度就代表了模式模拟误差的累加和相对模式初始场变量的敏感程度。由于不同种类的同化变量在真实值附近的振动范围不同,在数值上可以相差若干个量级,其梯度在空间呈现极度扁的椭圆球,使得变分同化系统中的极小化过程无法对所有同化变量收敛。因此,有必要在同化系统中极小化过程之前对所有同化变量进行尺度化(归一化),使得所有同化变量的梯度处在同一量级,从而也使得这些梯度具有可比性。以云参数(云量和云顶气压)作为同化变量,图4为模式模拟误差对云参数的归一化梯度。模式模拟误差对云顶气压的梯度要大于云量,但在实际计算中,模式误差对云顶气压的敏感程度要比对云量的敏感性小得多。由于HIRS探测器不同探测通道反映了不同高度上大气温度、湿度场的垂直分布,对于高层探测通道的辐射测值几乎不受云的影响,受云影响较大的只是中低层大气探测通道和窗区通道,图4只是反映了RTTOV5模式模拟误差对云参数梯度(敏感性)的平均状况。因此,还需要针对不同探测通道具体分析通道误差对初始云参数的梯度(敏感性)。

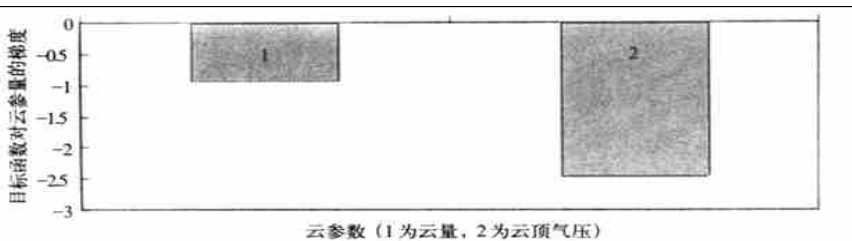


图4 模式误差对云参数的归一化梯度

利用RTTOV5正演模式的Jacobine模式,可以计算不同探测通道的模式模拟误差对于同化变量的梯度(敏感性)^[5],图5显示了这一结果。可以看到,模式误差对云顶高度梯度的变化比对云量剧烈得多。一般云顶高度小于高层大气通道的探测高度,因此这些通道的梯度几乎为零(通道1~3);随着通道探测高度的降低,模式模拟误差对云顶高度的敏感性增加,并在窗区探测通道处达到极大值。而所有通道对云量的梯度变化均较缓慢,

在数值上较云顶气压梯度的极值小数倍。

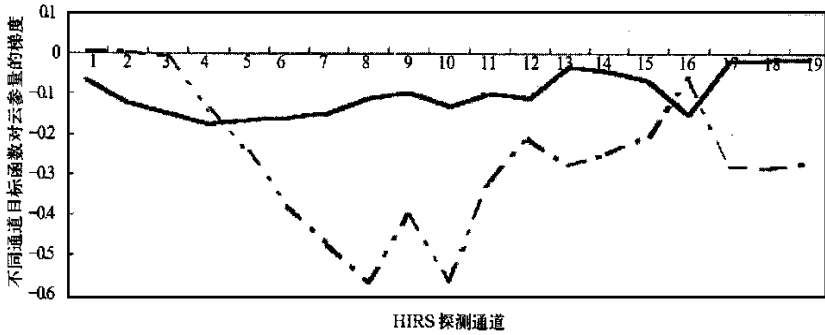


图 5 不同通道误差对云参数的归一化梯度 (实线为云量;虚线为云顶高度)

3 结 论

通过对 RTTOV5 模式模拟误差对初始云参数敏感性及其原因的分析,可以得到如下结论:

(1) 根据 TOVS 资料对云量的定义,在晴空 RTTOV5 正演模式计算的 HIRS 通道辐射亮温与实际观测的通道辐射值的均方差小于部分有云情况下的模式误差,并且通道探测高度越高,模式计算误差受云的影响越小,对水汽变化敏感的中低层大气探测通道在晴空时的误差远小于部分有云情况。

(2) 短波窗区探测通道的模式计算误差主要受地面反射太阳光辐射的影响,因此在平均状况下,晴空条件下 RTTOV5 正演模式对这些通道的计算均方差要大于部分有云情况,并且在夜间模式的模拟误差远小于白天的模拟误差。

(3) 对比夜间与白天,晴空与部分有云时 RTTOV5 正演模式的计算均方差表明,剔除地面反射的太阳光辐射影响,模式对短波窗区探测通道观测的辐射亮温的模拟误差有着与其它通道模拟误差相同的变化趋势。

(4) 利用伴随模式计算了模式误差相对于初始云参数的梯度(敏感程度)的关系,在平均意义下,模式对云顶高度的敏感程度大于对云量的敏感性。

(5) 利用 RTTOV5 正演模式的 Jacobine 模式计算的不同 HIRS 探测通道的模式模拟误差对初始云参数的梯度表明,对云量梯度的变化较为平缓,对云顶高度梯度的变化则显著得多。并且,随着通道探测高度的升高,模式模拟误差对云顶高度的敏感性减小,在窗区探测通道处这一敏感性达到极大值。

参 考 文 献

- 1 Pailleux J. Design of a variational analysis: organization and main scientific points. ECMWF Tech. Mem. 150, 1989.
- 2 Pailleux J. A global variational assimilation scheme and its application for using TOVS radiances. Preprints of WMO Int. Symp. On Assimilation of Observations in Meteorology and Oceanography, Clermont-Ferrand, France, July 1990. 325 ~ 328.

- 3 Eyre J R. Progress on direct use of satellite sounding radiances in numerical weather prediction. Preprints of WMO Int. Symp. On Assimilation of Observations in Meteorology and Oceanography, Clermont-Ferrand, France, July 1990. 117 ~ 121.
- 4 Saunders R, Matrecardi M, Brunel P. A fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations — RTTOV5. Research Department Technical Memorandum No. 282, Aug. 1999.
- 5 Erye J R. Inversion of cloudy satellite sounding radiances by nonlinear optimal estimation. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 1989, **115**:1001 ~ 1037.

THE IMPACT OF CLOUD PARAMETERS ON THE SIMULATED ERRORS IN RTTOV5

Ma Gang Fang Zongyi Zhang Fengying

(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

TOVS/ ATOVS data from meteorologic satellite can provide the vertical distribution of temperature and humidity in the atmosphere. In order to use these data in NWP models directly, then to make the initial field of NWP model more accurate and improve forecast finally, a fast transmittance model (RT model) is required in a multi-dimensional data variational assimilation system. There will be big errors while simulating HIRS data by an RT model, because HIRS data in TOVS/ ATOVS can not get the information of the vertical distribution of temperature and humidity below the clouds. Before assimilating TOVS/ ATOVS data into NWP model, it is a necessary task to analyze the impact of the cloud parameters (the top of cloud and cloud fraction are included mainly) on simulated errors using RTTOV5, based on the actuality of operational TOVS data every day (about 70% observation points are partly cloudy). The temperature and humidity profiles from operational TOVS data, as well as some others data necessary to run RTTOV5, are used to compute the brightness temperature with respect to HIRS channels in NOAA14. Then the impact of the cloud fraction and the top of cloud on simulated errors in models are estimated. Finally an adjoint model and a Jacobine model of RTTOV5 are used to analyze the sensitivity of the simulated errors of RTTOV5 to initial cloud parameters (the cloud fraction and the pressure of of cloud top).

Key words: Cloud fraction Air pressure at top of cloud RT model Model deviation sensitivity