

从 118.75 GHz 附近六通道亮温 反演大气温度廓线的数值模拟研究^{*}

陈洪滨¹⁾ 林龙福²⁾

1) (中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测开放实验室, 北京 100029)

2) (北京应用气象研究所, 北京 100029)

摘 要 为了能在静止气象卫星上实现微波被动遥感探测大气温度廓线, 并保持一定的地面空间分辨率(如视场小于 60 km), 就需要使用高频微波及大天线。欧洲和美国下一代静止气象卫星上都已考虑采用 118.75 GHz 附近通道。为了充分了解 118.75 GHz 附近通道遥感反演温度廓线的能力, 为仪器研制及今后资料的解释反演提供必要的基础数据, 作者开展了采用 118.75 GHz 附近六个通道遥感反演大气温度廓线的数值模拟研究。统计反演的数值试验表明, 118.75 GHz 附近六通道对温度垂直分布有一定的遥感反演能力; 温度反演较好的层次对应于权重函数峰值所在的位置。

关键词: 高频微波; 温度廓线; 反演

1 引言

大气温度分布及其变化是表征大气热力状态的一个重要参数。探测全球大气温度分布及其变化, 对于数值天气预报、大气科学和气候变化研究以及各种气象保障工作, 都是必不可少的。地基气象无线电探空仅给出一个“点”上空的温度分布情况, 且全球无线电探空站网的密度远不能满足业务和科研工作的需要。而要获得全球大气的三维温度场信息, 卫星遥感是当前一种最佳的选择。

卫星遥感大气温度廓线最有代表性的仪器是美国 NOAA 系列极轨气象卫星上的 TOVS 和 ATOVS 探测器, 它实际上由三个子仪器组成, 即: 红外探测器 (HIRS)、微波探测器 (MSU) 和红外平流层探测器 (SSU)^[1,2]。其中的微波探测仪采用了 50~70 GHz 氧气吸收带中的数个通道。如果在静止气象卫星上仍采用成熟的 50~70 GHz 氧气吸收带中的几个通道, 则要使用超大天线, 否则将进一步降低水平空间分辨率。而目前卫星微波辐射计较低的水平空间分辨率, 已对应用造成了很大的障碍和困难。除使用超大天线外, 提高水平空间分辨率的另一种方案是使用更高频率的微波段。欧洲和美国的下一代静止气象卫星上都已考虑采用 118.75 GHz 氧气吸收线附近通道。国外已研制成功并具有代表性的微波遥感器有美国的 AMSU 和 MTS (Millimeter-wave Temperature Sounder) 和欧洲的 MMS (Meteosat Microwave Sounder) 等^[2~5]。

采用 118.75 GHz 氧气吸收线附近通道反演温度廓线的优点^[4,6]有: 与 50~70 GHz 吸收带相比, 空间分辨率可以提高一倍; 是一条几乎完全对称和孤立的吸收线, 离其他 O₂ 吸收线足够远, 可以忽略重叠 (overlapping) 效应, 因此大气透过率及正模式较为简单; 与红外波段相比, 具有一定的穿透云的能力 (例如薄卷云), 且完全不受气溶胶和烟尘的影响; 对厚云或对流性降水的探测可提供一些辅助信息。

为了充分了解 118.75GHz 附近通道遥感反演温度廓线的能力, 为仪器研制及今后资料的解释反演提供必要的基础数据, 本工作开展了空基 118.75 GHz 微波辐射计资料反演大气温度廓线的模拟研究。使用微波辐射传输模式, 通过对数值模拟计算结果的分析研究, 了解六个通道的权重函数分布、亮温与各层温度的相关性以及使用六通道亮温反演温度廓线的可行性和大致精度。

2 通道选择及其权重函数分析

表 1 列出卫星上拟采用的 118.75 GHz 附近六个通道的中心频率及相关的主要参数, 这是根据他人的研究结果和现有的微波技术条件给出的^[2,3,6], 其地面分辨率所对应的天线口径为 2 m。

表 1 辐射计工作方式、极化方式及空间分辨率

通道	中心频率/GHz	中频带宽/MHz	地面分辨率/km	应用目的
一	90	2000	~50	水汽总量、对地观测、云雨等
二	118.75±0.33	200		低平流层大气温度测量
三	118.75±0.65	350		平流层底层大气温度测量
四	118.75±1.3	500		对流层大气温度测量
五	118.75±2.0	600		对流层底层大气温度测量
六	118.75±3.9	600		近地面大气温度测量

在平面平行无云大气中及卫星天顶角 θ (观测角) 不大于 75° 时, 到达卫星天线处的微波视亮温 $T_B(\theta)$ 来自 4 项贡献^[6,7], 即整层大气向上的辐射 T_{UP} 、地表向上辐射 T_{BS} 、大气向下被海 (地) 表反射再经大气衰减后的辐射 T_{DN} 和地外进入大气经地表反射再经大气衰减向上的辐射 T_{EXT} ,

$$T_B(\theta) = T_{UP} + T_{BS} + T_{DN} + T_{EXT},$$

根据辐射传输方程的解, 各项贡献的具体表达式为

$$T_{UP} = \int_0^{\infty} k_a T_a(z) e^{-\int_z^{\infty} k_a(z') dz'} dz / \cos \theta,$$

$$T_{BS} = \epsilon(\theta, p) T_{SN} e^{-\tau / \cos \theta},$$

$$T_{DN} = [1 - \epsilon(\theta, p)] e^{-\tau / \cos \theta} \int_0^{\infty} k_a(z) T_a(z) e^{-\int_0^z k_a(z') dz'} dz / \cos \theta,$$

$$T_{EXT} = T_{COS}(1 - \epsilon) e^{-2\tau / \cos \theta},$$

式中, $k_a(z)$ 是高度 z 处大气吸收系数, $T_a(z)$ 是温度为 $T(z)$ 的黑体亮温; 在低频, $T_a(z)$ 与 $T(z)$ 近似相等; 当频率 $f > 100$ GHz 时, 两者有明显的差别; 频率越高, 差

别越大,这是需要注意的。 $\epsilon(\theta, p)$ 是海(地)表比辐射率, p 表示极化,或水平或垂直; T_{SN} 海表或地表的黑体辐射亮温,在低频段($f < 100$ GHz)可用物理温度 T_s 代替; τ 是整层大气的光学厚度; $[1 - \epsilon(\theta, p)]$ 是海(地)表反射率; T_{COS} 是宇宙微波背景辐射 2.7 K,在 110 GHz 以上高频, T_{EXT} 通常是个可忽略的小量。

在晴天平面平行大气中的微波亮温和表示某一小层贡献的权重函数的数值计算,是将平面平行大气细分为 N 层(如 100 层);每一小层中的大气参数及导出的吸收系数设为均一,这样每一小层大气的向上及向下辐射和衰减项就可逐一计算出来;整层大气的贡献包括地(海)表和地外的贡献,通过逐层累加及衰减得到。本工作所用的微波辐射传输模式是 Chen^[7]发展的,其中微波大气吸收模型使用 Liebe^[8]的 MPM(微波传播模型),并参考了 Rosenkranz^[9]的模型;海面比辐射率模型采用 Wentz^[10]的,因为这一模型较为简单,在 7 m s^{-1} 风速处没有不连续;包含 8 种标准大气模型,具体是热带大气、副热带夏季、副热带冬季、中纬夏季、中纬冬季、副极地夏季、副极地冬季和 U. S. 1976 标准大气;大气温压湿廓线还可使用气象探空资料。

本节首先计算和分析 118.75 GHz 附近六通道的权重函数。图 1 所示结果的计算条件为单边单色通道、U. S. 1976 标准大气、观测角 0° 和两种地表比辐射率。选 0° 观测角是因为静止卫星上的观测角很小;选单边单色通道是因为计算结果在吸收中心线两边对称。由图 1 可见,在观测天顶角为 0° 时,自上而下各通道权重函数峰值对应的高度约为: 100 hPa (118.75 ± 0.33 GHz)、200 hPa (118.75 ± 0.65 GHz)、350 hPa (118.75 ± 1.30 GHz)、对流层低部—地面 (118.75 ± 2.00 GHz)、海(地)面 (118.75 ± 3.90 GHz) 和海(地)面 (90.0 GHz)。还可看出,海(地)表比辐射率变化时,

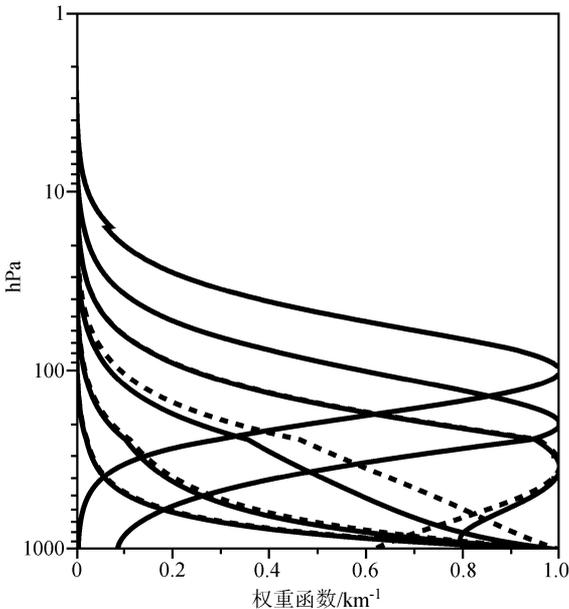


图 1 118.75 GHz 附近六通道的归一化权重函数
自上而下曲线对应的通道距离 118.75 GHz 中心线越远
实线: 海表比辐射率 0.5; 虚线: 海表比辐射率 0.9

探测对流层低部—地面的 3 个通道的权重函数有所变化,而对探测对流层中上部和低平流层的三通道没有影响。以上是针对单色通道而言,对于有一定带宽的各通道来说,其权重函数分布的上下范围还要展宽一些。

我们还计算了不同模式大气条件下各通道权重函数的廓线。在热带大气条件下,权重函数分布降低,这是因为在相同海拔高度上热带对流层大气密度(即氧气密度)较低。同理,在冬季大气中,权重函数分布将有所抬高。也就是说,各通道的权重函数垂直分布与大气廓线有一定的相关性。

不同观测天顶角条件下各通道权重函数的比较表明,观测天顶角大时(如 45°)权重函数分布上移,这是因为斜向观测路径比垂直大气层厚度

大; 探测对流层低部—地面的 3 个通道的权重函数有所变化, 峰值高度仍在地面层; 探测低平流层和对流层中上部的 3 个通道的权重函数其峰值高度明显上移。但对静止气象卫星, 在观测角变化范围内各通道权重函数变化不大。

我们分析研究了各通道亮温与大气(标准)层温度的相关性。由于没有卫星资料和机载校飞的实测资料, 就用微波辐射传输模式模拟计算获得 118.75 GHz 辐射计亮温的人工资料样本, 模拟计算亮温时采用北京和上海两站 1992~1993 年的探空资料, 覆盖了全年大气廓线分布情况。

表 2 列出三通道亮温与 11 层大气温度(包括海表)的相关系数。由表 2 可见, 118.75 GHz 附近通道的亮温不仅与对流层下部温度和海表温度有很高的正相关, 而且与高层温度(18 km 以上)呈反相关, 这不说明这些通道亮温中有很多“负”的上层温度信息, 而是因为低平流层温度与近地面温度有一定的负相关, 即在夏季时地面温度高, 对流层顶高, 平流层的温度较低; 在冬季正好相反。同理, 近 118.75 GHz 吸收线的三通道亮温与低对流层温度有一定的相关, 也并不说明其中有很多近地面大气层温度的信息。这是在通道选择和温度反演时要注意的。

表 2 三通道亮温与 11 层大气温度(包括海表)的相关系数

亮温 T_B	气 温										
	T_{ss}	T_{sa}	T_{1000}	T_{850}	T_{500}	T_{300}	T_{250}	T_{200}	T_{150}	T_{89}	T_{30}
90 GHz	0.75	0.67	0.77	0.78	0.76	0.67	0.53	0.17	-0.31	-0.65	-0.65
117.45 GHz	0.93	0.80	0.93	0.93	0.93	0.81	0.63	0.20	-0.36	-0.81	-0.81
118.42 GHz	0.32	0.31	0.32	0.29	0.35	0.51	0.61	0.72	0.52	-0.22	-0.22

注: T_{ss} 和 T_{sa} 为海面水温和气温; T_{1000} 为 1000 hPa 等压面上的气温, 其他类推。

3 温度廓线反演的数值试验

同样由于没有实测的资料, 需要采用“人工”模拟资料来建立温度反演算式。本工作选用传统的统计反演方法, 来进行反演的数值试验。与物理反演方法或其他反演方法相比, 统计反演方法对极端情况的反演能力较差, 但该方法简单易行, 而且可给出大于通道数目的大气层温度。

根据上节的相关性分析, 各层温度 T_i 与亮温 T_B 呈线性相关,

$$T_i = a_0 + \sum_{j=1}^6 a_{ij} T_{B,j} \quad (i = 1, \dots, 14),$$

其中, i 为大气层数, 总数取 14, 从海面(海面水温 T_{ss} , 海面气温 T_{sa})一直到 90 hPa (T_{90}); j 表示通道数。表 3 给出线性回归的相关系数和残差。残差值基本可以反映反演算式的平均反演误差的量级。

如果用逐步线性回归方法, 某些层温度的反演算式可用较少的微波通道。例如, 对于洋面大气温度可仅用三、六通道, 即

$$T_{sa} = 151.1 + 1.859 T_B(118.75 \pm 2.0) - 0.1782 T_B(118.75 \pm 0.33).$$

虽然回归残差大致反映了反演的平均精度, 但我们仍需对以上所得的反演算式进

表 3 统计反演算式的相关系数 R 和残差 S_e 及
反演温度与真实温度的相关系数和均方根差

T	相关系数 R	残差 S_e / 均方根差	T	相关系数 R	残差 S_e / 均方根差
T_{ss}	0.988 / 0.950	1.32 / 1.43	T_{400}	0.969 / 0.774	1.61 / 3.14
T_{sa}	0.829 / 0.814	6.54 / 4.48	T_{300}	0.957 / 0.686	1.72 / 3.36
T_{1000}	0.989 / 0.954	1.34 / 1.46	T_{250}	0.938 / 0.799	1.70 / 2.68
T_{925}	0.983 / 0.933	1.73 / 2.74	T_{200}	0.857 / 0.756	1.86 / 3.24
T_{850}	0.978 / 0.907	1.83 / 3.40	T_{150}	0.867 / 0.790	1.72 / 1.78
T_{700}	0.968 / 0.900	1.62 / 2.00	T_{100}	0.826 / 0.507	3.20 / 6.25
T_{500}	0.971 / 0.807	1.52 / 3.00	T_{89}	0.871 / 0.485	1.57 / 1.18

行检验。为此, 选用 1994 年北京的探空资料 (等间隔选取, 共 210 份), 再由辐射传输模式算出每一探空资料和海表情况对应的六通道亮温, 并加上方差为 0.5 K 的随机误差, 形成一个用于反演试验的独立样本。

各层反演的温度与真实温度比较的相关系数和均方根差也列于表 3 中 (每列斜杠右

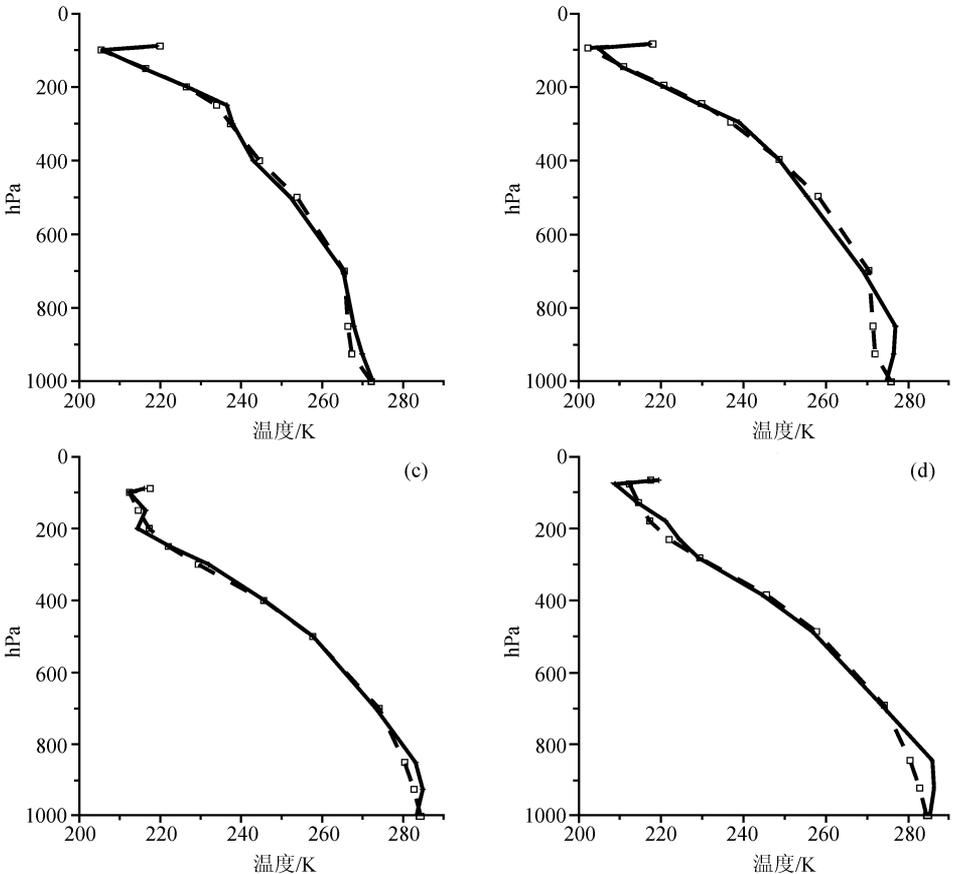


图 2 反演 (虚线) 与“真实” (实线) 大气温度廓线的比较
(a)、(b) 代表冬半季廓线; (c)、(d) 代表夏半季廓线

边的数)。由表 3 和散点图(略)都可看出,洋面、1000 hPa、700 hPa、250 hPa、150 hPa 和 90 hPa 层的温度反演精度明显比其上下层的好。这与前面权重函数分析的结果是一致的。如果要提高其他层次温度的遥感反演精度,还要适当增加通道数。

为了进一步比较反演的温度廓线与真实温度廓线,我们从 210 条廓线中随机地绘出 4 条(图 2)。总的来看,无论是何季节,标准层大气温度廓线基本都反演出来了。由图 2 还更清楚地看出:洋面、1000 hPa、700 hPa、250 hPa、150 hPa 和 90 hPa 层的温度反演精度明显比其上下层的好。

要说明的是,以上数值模拟统计反演试验中已包含了权重函数变化所产生的反演误差;如果采用更为“先进”的反演方法(如文献[11]),温度廓线反演精度要提高一些。但考虑到仪器测量误差、波束不均匀分布等问题,温度廓线反演精度大致与表 3 中给出的相当。当然在实际遥感反演时,可以天基与地基结合,即用一些地面探空资料做标准,来修正全球反演廓线,这样可以极大地消除反演的系统偏差,从而提高反演精度。

4 结论

(1) 六通道的权重函数计算和分析表明,在接近 0° 天顶观测角时,其测温的最大信息层约在 100 hPa、200 hPa、350 hPa、对流层中下部—地面、地面、地面;权重函数垂直分布与大气密度廓线有关,在热带降低,寒冷气候带升高;探测低对流层和地面的三个通道的权重函数还与地(海)表比辐射率有关。

(2) 辐射传输模式模拟表明,各通道亮温与其权重函数覆盖的大气层温度有一定的相关,也就是说,118.75 GHz 附近通道亮温中包含着一定垂直范围大气层的温度信息。

(3) 统计反演的数值试验表明,118.75 GHz 附近六通道对温度垂直分布有一定的遥感反演能力;温度反演较好的层次对应于权重函数峰值所在的位置。

致谢:本工作开展过程中得到了吕达仁和黄润恒研究员的指导帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Smith, W. L. et al., TIROS-N Operational Vertical Sounder, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1979, **60**, 1177~1187.
- 2 Diak, G. R. et al., Preparing for the AMSU, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1992, **73**, 1971~1984.
- 3 Chedin, A. et al., Second Generation Meteosat Studies on Microwave and Infrared Vertical Sounders. ESA STR-219, 1986, 29~39.
- 4 Gasiewski, A. J., J. W. Barret, P. G. Bonnani et al., Airborne-based radiometric imaging of tropospheric temperature and precipitation using the 118.75 GHz oxygen resonance. *J. Appl. Meteor.*, 1990, **29**, 620~632.
- 5 Wang, J. R. et al., Observations of cirrus clouds with airborne MIR, CLS, and MAS during SUCCES, *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**, 1145~1148.
- 6 Ulaby, F. T., R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Vol. 1: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*. Addison-Wesley Publ. Com., Massachusetts, 1981.
- 7 Chen Hongbin, Simulation of the microwave brightness temperature, Study of the possibility to retrieve some

- cloud parameters from the MMS 5 channel measurements, Ph. D Thesis, 1991, No. 537 (USTL, France) .
- 8 Liebe, H. , MPM-an atmospheric millimeter—wave propagation model, *Int. J. IR and Millimeter Wave*. 1989, **10**, 630~650.
- 9 Rosenkranz, P. W. , Absorption of microwaves by atmospheric gases, In: *Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry* (Ed. By M. A. Jassen), John Wiley & Sons, Inc. , 1993.
- 10 Wentz, F. J. , A model function for ocean microwave brightness temperature, *J. Geophys. Res.* , 1983, **88**, 1892~1907.
- 11 李俊、曾庆存, 晴空时大气红外遥感及其反演问题研究 II. 反演试验研究, *大气科学*, 1997, **21** (2), 214~222.

Numerical Simulation of Temperature Profile Retrievals from the Brightness Temperatures in 6 Channels near 118.75 GHz

Chen Hongbin¹⁾, and Lin Longfu²⁾

- 1) (*Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environmental Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)
- 2) (*Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029*)

Abstract High microwave frequencies near O₂ emission lines and/or large antenna have to be used for monitoring the atmospheric temperature profiles with an acceptable ground resolution from passive microwave radiometry on the geostationary satellite. The use of the 118.75 GHz O₂ resonance has already been considered for the microwave payloads onboard the European and American next—generation geostationary satellites. In order to demonstrate the 118.75 GHz capability of retrieving temperature profiles, a numerical simulation study has been conducted with 6 channels near 118.75 GHz. It is shown from numerical experiments with statistical retrieval method that microwave sounder using the 118.75 GHz O₂ line can provide the useful information on temperature profiles; better retrievals of temperature are given at the levels where are located the peaks of the weighting functions.

Key words: high frequency microwave; temperature profile; retrieval simulation