

摘 要

大气温度分布和变化代表了大气热力状态的一个重要参数,探测大气温度廓线对于数值天气预报、大气科学和气候变化研究等都是至关重要的。为了利用毫米波辐射计对大气温度廓线进行遥感,本文对相关的技术进行了研究,主要分为大气温度遥感理论和毫米波辐射计系统设计两个方面。

首先,本文探讨了大气辐射传输模式的原理,分析计算了用于遥感的几个关键参数:大气氧气分子的吸收特性、大气透过率、权重函数,给出仿真结果。在分析这些主要参数的基础上选择合适的反演方法。

其次,本文通过对毫米波辐射计的工作原理、灵敏度、绝对测量精度和定标等技术的探讨,结合大气温度遥感理论,分析了毫米波辐射计的通道选择、带宽选择、灵敏度、接收机设计和定标等相关问题,使之适合大气温度廓线遥感。

最后,分析了整个毫米波辐射计系统性能与遥感精度的关系,得出毫米波辐射计的测量精度、通道的缺损以及反演算法对遥感精度都有着相应的影响,从而可以提高遥感精度。

关键词: 毫米波辐射计, 大气温度廓线, 反演算法, 吸收系数, 权重函数

Abstract

The distributing and change of atmospheric temperature represent the important parameter of atmospheric state. Sensing the profile of atmospheric temperature is an important tool for the research to numerical weather forecast, atmospheric science and climatic variety. By way of using millimeter radiometer to sense the profile of atmospheric temperature, the paper researches the correlative technology. It includes the remote sensing theory of atmospheric temperature and a millimeter radiometer.

Firstly, the paper discusses the transmit mode of atmospheric radiation; some pivotal parameters for remote sensing are analyzed and calculated, such as the absorption characteristic of oxygen molecular, atmospheric transmissivity and weight function. On the base, the paper selects the appropriate retrieval method.

Secondly, the paper discusses the work principle, sensitivity, absolute measurement precision, calibrating technology of a millimeter radiometer. With remote sensing theory of atmospheric temperature, the paper analyses the select of channels, bandwidth, radiometer design and calibration of a millimeter radiometer, which is adapted to sense the atmospheric temperature.

Finally, the paper analyses the relationship between millimeter radiometer's performance and remote sensing precision. It is educed that measurement precision, the short or damage of the channels of millimeter radiometer and retrieval figure can affect the remote sensing precision.

Keywords: Millimeter Radiometer, Profile of Atmospheric Temperature, Retrieval Figure, Absorption Coefficient, Weight Function

声 明

本学位论文是我在导师的指导下取得的研究成果，尽我所知，在本学位论文中，除了加以标注和致谢的部分外，不包含其他人已经发表或公布过的研究成果，也不包含我为获得任何教育机构的学位或学历而使用过的材料。与我一同工作的同事对本学位论文做出的贡献均已在论文中作了明确的说明。

研究生签名: 祁跃健 2006年6月10日

学位论文使用授权声明

南京理工大学有权保存本学位论文的电子和纸质文档，可以借阅或上网公布本学位论文的部分或全部内容，可以向有关部门或机构送交并授权其保存、借阅或上网公布本学位论文的部分或全部内容。对于保密论文，按保密的有关规定和程序处理。

研究生签名: 祁跃健 2006年6月10日

1 绪论

1.1 前言

从上世纪40年代开始,许多国家广泛地研制和试用地基、机载和星载的微波辐射计。微波辐射计是用来测量物体微波辐射能量的仪器,它本身不发射信号,但能被动接收物体的辐射信号。它具有非常高的灵敏度,能够测量出物体十分微弱的热辐射信号,既具有良好的保密性,又能做到体积小、功率省、成本低。70年代后期以来,毫米波元器件与电子技术的快速发展促进了毫米波辐射计的发展和应用。随着微波遥感跨进空间遥感的领域,微波遥感可以弥补红外遥感和可见光遥感等在探测性能上的不足,具有许多突出优点^[1]。

近年来,微波遥感成为大气探测的主要手段,微波雷达已成功用于各种气象参数的测量中。利用微波辐射计进行大气微波遥感是被动式的大气微波遥感,依据观测平台的不同可以分为星载、机载和地基大气微波遥感。被动式大气微波遥感主要应用于探测大气温度廓线、大气湿度廓线、大气成分和地表温度、土壤湿度、水面油污染等地表特征。

作为大气探测的一种新兴技术,大气微波遥感不但能够弥补普通常规大气探测资料的不足和克服常规大气探测在应用中存在的某些局限性,而且还能获得研究大气结构等方面新颖有价值的气象资料,在实时性、全天候和测量准确度方面具有很大的优势。

1.2 本课题的意义

大气温度分布和变化代表了大气热力状态的一个重要参数,探测大气温度廓线对于数值天气预报、大气科学和气候变化研究等都是至关重要的。虽然微波辐射计遥感大气温度廓线在垂直分辨率上无法与无线电探空仪相比,但是,微波辐射计遥感时间分辨率高、实时性好、自动控制容易、覆盖范围大,且能全天候工作,可提供海洋沙漠等人烟稀少地区的资料。这些优点使得利用微波辐射计遥感大气温度受到了重视。那么探讨如何利用微波辐射计进行遥感以及相应微波辐射计的设计就是非常重要的事情,也是本课题中的意义所在。

1.3 国内外的研究现状

1961年Meeks等首先提出了利用大气氧分子5毫米微波辐射测量大气温度廓线的有关问题^[1],并根据Van Vleck的理论分析以及Mizushima, Zimmer等人的实验结果,指出氧气的5毫米吸收带组成^[2]。

根据特定高度的氧气分子的吸收特性与频率有关的大气频谱特性来选择探测装置的工作频率以及通道数,选用50GHz~60GHz的5毫米氧气吸收谱线两侧进行多频观测,利用每一个频率对应的权重函数有一个极大值,通过对不同频率的谐振峰值高度上的大气温度,从而得到大气温度分布廓线。TIROS-N的MSU由4个通道组成,采用了两副天线,50.3GHz为窗区通道,用于探测地表温度特性,3个氧气谐振带通道(53.74 GHz, 54.96 GHz, 57.95 GHz)分别用于探测5、10、17Km高度的大气温度^[3]。1979年发射的国防气象卫星(DMSP)载有SSM/T微波辐射计,测温采用了7个通道:50.5、53.2、54.25、54.96、58.5、58.825以及59.5(GHz),相应的权重函数峰值高度分别为0、2、6、10、30、16、22Km。90年代中期以后,为TIROS-N/NOAA系列卫星设计的AMSU将取代MSU,其主要用于探测大气温度垂直廓线的AMSU-A包括了15个通道^[4],50GHz~60GHz范围内有12个通道,为主要的测温通道。此外还增加了23.8 GHz、31.4 GHz、89 GHz3个辅助探测通道,用于检测和消除云层、水汽、地面背景干扰和污染,提高了温度反演精度。

1.4 本文的研究内容和主要工作

本文的主要研究内容是毫米波辐射计在大气温度廓线遥感和反演中的相关技术研究,本文的主要工作如下:

(1) 5mm频段氧气吸收带的吸收特征

分析氧气分子5mm频段吸收带的吸收特征,计算了不同高度和不同频率的氧气吸收系数。并且对两种线宽模式(R_i 模式和M-L模式)进行比较,得出在5mm频段微波辐射计遥感大气温度廓线时 R_i 模式更适合。

(2) 大气毫米波遥感方法的探讨

分析大气毫米波遥感的原理和特点,空间和地面探测的异同,得出了地基毫米波辐射计遥感可以有效遥感低层大气(10Km以下)的温度廓线,星载毫米波辐射计可以有效遥感5Km以上大气的温度廓线。

分析毫米波遥感大气温度辐射方程特性,大气透过率和权重函数的计算以及牛顿非线性迭代反演算法。得出了上行和下行大气辐射方程的特性、不同观测高度和观测角度的大气透过率以及氧气分子的大气透过率、星载毫米波辐射计七个遥感通道和地基毫米波辐射计四个通道的权重函数。

(3) 毫米波辐射计的主要技术参数的研究

分析了地基毫米波辐射计的探测通道和通道组合、毫米波辐射计带宽选择、天线的带宽和多通道共用问题、毫米波辐射计的绝对测量精度、毫米波辐射计的周期定标技术、系统性能和遥感精度的关系,并得出了相应的结论。

2 大气辐射传输和微波遥感

太阳向地球不断的辐射能量，地球也向空间辐射能量，不同气层之间以及大气和地面之间也存在着以辐射传输来进行能量交换。太阳辐射经过地球大气层照射到地面，经过与地面物体的作用又反射回大气，再经过大气传输到达各种辐射遥感测量仪器。因此，大气中的毫米波辐射对遥感的影响很大，所以对大气辐射传输理论的研究在毫米波遥感中占有重要的地位。掌握了大气各成分的微波散射、吸收和发射特性，才能研究微波辐射计测量技术在大气毫米波遥感中的应用，并且能够对处理大气毫米波辐射遥感数据进行修正^[5]。随着大气辐射理论的建立和迅速发展，越来越多的遥感技术和气象卫星投入到大气毫米波遥感这个领域中来。

2.1 大气成分和吸收气体

大气由多种气体成分和气溶胶微粒组成，有些气体成分相对含量少变，称为均匀混合气体，如 O_2 、 N_2 、 CO_2 等。根据 1976 年美国标准大气模型的数据^[6]，在海平面上的 O_2 分子和 N_2 分子所占的体积分别为大气的 20.9476% 和 78.084%。由于人工燃烧燃料致使 CO_2 在大气中含量逐年不断增加，有些气体成分相对含量随季节、地区、高度等而变化，称为可变成分气体，如 H_2O 、 O_3 等，其中 H_2O 主要分布在对流层，时空变化很大， O_3 主要集中在平流层，在 25~30km 之间含量最高。大气中还漂浮着很多尘埃颗粒、水滴、冰晶等固体和液体微粒，这些统称为气溶胶。

晴空大气对微波的衰减主要是由于大气分子的吸收造成的，分子对微波的散射作用可以忽略不计。大气对微波和毫米波的吸收包括气体分子和云雨的吸收，尘埃威力的影响可以忽略不计。大气中主要的吸收气体是 O_2 和 H_2O ， O_3 也有一定程度的吸收。其他一些微量气体以及污染气体成分也都有各自的吸收区，而且就其吸收线的强度来说，可以与 O_2 和 H_2O 相比拟，但是由于它们在大气中的含量十分稀少，因而 O_3 对大气的微波和毫米波的吸收和发射过程不起什么作用。 H_2O 含量尽管不大，但在大气辐射中起这重要作用。大气中 H_2O 含量随气压下降而迅速减少，同时 H_2O 含量也随着纬度的降低而减少。50% 以上的 H_2O 都集中在 850hPa 以下，90% 以上都集中在 500hPa 以下。在 50 公里以下的大气层内， O_2 的混合比不随高度而改变，这就为利用 O_2 的毫米波辐射遥感大气温度结构提供了有利条件，所以研究 O_2 的吸收特性是本课题的一个重点。

2.2 大气氧气分子的吸收特性

大气吸收衰减与多方面因素有关，但在微波和毫米波波段，主要源于 O_2 、 H_2O 的吸收和散射。由于大气中的 O_2 和 H_2O 分子远小于微波波长，因此可以忽略由于 O_2 和

H_2O 分子的散射对大气衰减的贡献, 而认为衰减主要是由吸收造成的。

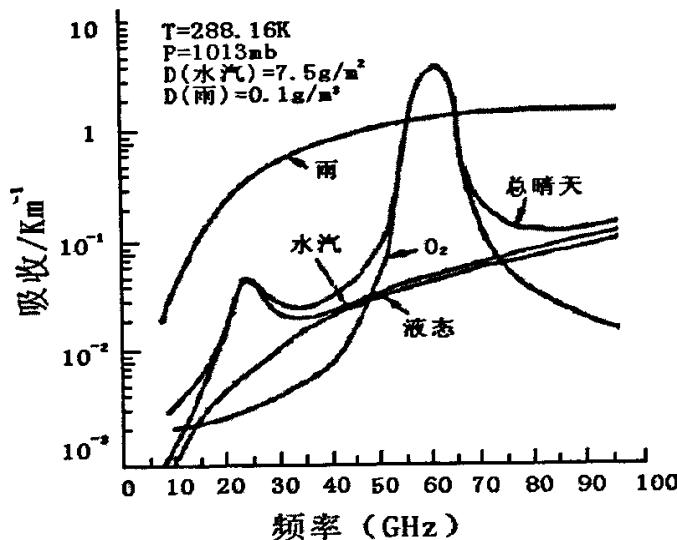


图 2.2.1 大气微波和毫米波吸收谱

由分子光谱与辐射理论可知, 大气本身能够放射微波和毫米波辐射, 大气是热噪声源。大气微波和毫米波辐射的特性依赖于大气对微波和毫米波的吸收, 在对流层中, 大气中的主要吸收成分, 即 O_2 、 H_2O 和云雨等的微波和毫米波吸收构成了大气微波和毫米波吸收谱, 如图 2.2.1 所示。水汽在 22GHz 附近有一个吸收带, 50~70GHz 范围是氧气分子的强吸收带即 O_2 的 5 毫米吸收带。

根据基尔霍夫定律^[5]: 物体对于某个波段有强烈的吸收, 同时必然在该波段有强烈的辐射, 并且在 50 公里以下的大气层中 O_2 的混合比不随高度的变化而变化, 因此在微波段和毫米波的大气窗口中, O_2 分子 5 毫米微波吸收带经常被用于探测大气温度廓线。利用 O_2 分子在 5 毫米吸收带的吸收特性, 地基毫米波辐射计可以有效的探测低层大气温度分布, 尤其是对流层和平流层大气温度的分布廓线。而星载毫米波辐射计则可以有效的探测到 5 公里以上大气的温度廓线。所以, 对氧气在 5 毫米吸收带的频谱特性进行研究将有助于探测大气温度廓线。

氧气的毫米波吸收谱是由许多分布在 50~70GHz 频率范围上的吸收谱线和在 118.75GHz 的附加谱线所组成。在地球大气层下部的气压特性下, 压致增宽引起谱线的线丛混合在一起, 形成一个中心为 60GHz 附近的连续吸收带。

计算氧气 60GHz 线丛的吸收谱的惯用方法是采用 Van Vleck-Weisskopf(1945) 的线形函数因子将各谱线引起的吸收系数相加^[1]。Van Vleck-Weisskopf 从理论上确定了氧气微波吸收特性以来, 经过 Mizushima, Hill, Zimmer, Wilheit 等人的实测, 确定了 5 毫米频段氧气吸收带各对共振吸收线的中心频率^[1], 见表 2.2.1。

表 2.2.1 氧气 5 毫米频段吸收带的中心谱线

谱线序列 N	共振谱线频率 (GHz) ν_{N+}	共振谱线频率 (GHz) ν_{N-}	干扰参数 (hPa^{-1}) Y_{N+}	干扰参数 (hPa^{-1}) Y_{N-}
1	56.2648	118.7505	4.51E-4	-2.14E-5
3	58.4466	62.4863	4.94E-4	-7.78E-4
5	59.5910	60.3061	3.52E-4	-3.92E-4
7	60.4348	59.1642	1.86E-4	-2.68E-4
9	61.1506	58.3239	3.30E-5	-1.13E-4
11	61.8002	57.6125	-1.03E-4	3.44E-5
13	62.4112	56.9682	-2.23E-4	1.65E-4
15	62.9980	56.3634	-3.32E-4	2.84E-4
17	63.5685	55.7839	-4.32E-4	3.91E-4
19	64.1272	55.2214	-5.26E-4	4.93E-4
21	64.6779	54.6728	-6.13E-4	5.84E-5
23	65.2240	54.1294	-6.99E-4	6.76E-4
25	65.7626	53.5960	-7.74E-4	7.55E-4
27	66.2918	53.0695	-8.61E-4	8.47E-4
29	66.8313	52.5458	-9.11E-4	9.01E-4
31	67.3627	52.0259	-1.03E-3	1.03E-3
33	67.8923	51.5091	-9.87E-4	9.86E-4
35	68.4205	50.9949	-1.32E-3	1.33E-3
37	68.9478	50.4830	-7.07E-4	7.01E-4
39	69.4741	49.9730	-2.58E-3	2.64E-3
41	70.0000	49.4648		
43	70.5249	48.9582		
45	71.0497	48.4530		

自 20 世纪 60 年代以来, 很多的科学家为此进行了理论和实验研究, 得到了多种对氧气 5 毫米频段吸收谱线计算的模式。其中应用比较广泛的有 Meek Lilly(1963) 的 M-L 模式^[1]、Reber(1972) 的 R_i 模式^[1]、Rosenkranze(1975) 得出的 Rosenkranze 模式^[2]、Liebe(1985) 年提出的 Liebe 模式等^[5]。

2.2.1 M-L 模式

根据 M-L 模型^[1], 大气中氧气分子的吸收系数为:

$$\alpha_{\alpha_2} = C_1 P T^{-3} \nu^2 \sum_N S_N e^{-E_N / kT} \quad (2.2.1)$$

在式 (2.2.1) 中当 α_{α_2} 的单位取 dB/km 时 $C_1 = 2.6742$;

P 为气压(毫米汞柱);

T 为绝对温度 (K);

ν 为频率(GHz);

$$E_N = 2.06844N(N+1)/T, \quad E_N \text{ 为转动能级;} \quad (2.2.2)$$

N 是从 1 到 45 里面的奇数, 为转动量子数;

$$S_N = \mu^2_{N+} F_{N+} + \mu^2_{N-} F_{N-} + \mu^2_{N0} F_{N0}, \quad \text{称为谱线强度。} \quad (2.2.3)$$

在式 (2.2.3) 中 $\mu_{N\pm}$ 代表氧分子磁偶极共振跃迁矩阵元, μ_{N0} 代表非共振跃迁矩阵元。

$$\mu^2_{N+} = N(2N+3)/(N+1); \quad (2.2.4)$$

$$\mu^2_{N-} = (2N-1)(N+1)/N; \quad (2.2.5)$$

$$\mu^2_{N0} = 2(N^2 + N + 1)(2N + 1)/N(N + 1); \quad (2.2.6)$$

$$F_{N+} = \frac{\Delta\nu_p}{(\nu - \nu_{N+})^2 + \Delta^2\nu_p} + \frac{\Delta\nu_p}{(\nu + \nu_{N+})^2 + \Delta^2\nu_p}; \quad (2.2.7)$$

$$F_{N-} = \frac{\Delta\nu_p}{(\nu - \nu_{N-})^2 + \Delta^2\nu_p} + \frac{\Delta\nu_p}{(\nu + \nu_{N-})^2 + \Delta^2\nu_p}; \quad (2.2.8)$$

$$F_{N0} = \frac{\Delta\nu_p}{(\nu^2 + \Delta^2\nu_p)}, \quad F_N \text{ 为谱线形状因子;} \quad (2.2.9)$$

$\Delta\nu_p$ 为压力加宽半宽度, 与温度和压力有关。

$$\Delta\nu_p = g(p) \frac{p}{p_0} \left(\frac{T_0}{T} \right)^x. \quad (2.2.10)$$

式 (2.2.10) 中 T_0 和 p_0 为参考温度和参考大气压, 参考值分别 300K 和 760 毫米汞柱。根据 Meeks 和 Lilley 的实测资料, $\Delta\nu_p$ 在不同高度标准大气的值如表 2.2.2 所示。

表 2.2.2 不同高度标准大气微波和毫米波吸收谱线半宽度

高度 (公里)	0	2	4	6	8	10
$\Delta\nu_p$ (GHz M-L)	0.666	0.548	0.446	0.359	0.286	0.281

$\Delta\nu_p$ (GHz R_1)	0.535	0.446	0.369	0.304	0.249	0.202
高度 (公里)	12	14	18	22	26	30
$\Delta\nu_p$ (GHz M-L)	0.256	0.210	0.128	0.073	0.040	0.021
$\Delta\nu_p$ (GHz R_1)	0.161	0.127	0.083	0.053	0.042	0.022

根据式(2.2.1),可以得到在5mm氧气吸收带从0到30Km不同高度的氧吸收系数(dB/Km),在表2.2.3中列出了根据M-L模式计算得到0、2、4、6、12、18、26、30Km在50~70GHz处氧气分子的吸收系数,单位为dB/Km。

表2.2.3 根据M-L模式计算得到的氧气分子吸收系数

频率 GHz	0 Km	2 Km	4 Km	6 Km	12 Km	18 Km	26 Km	30 Km
50	0.25938	0.18034	0.12299	0.05405	0.03039	0.00594	5.19E-4	1.48E-4
50.1	0.2678	0.1861	0.12684	0.05566	0.03127	0.00611	5.28E-4	1.47E-4
50.2	0.27669	0.19218	0.1309	0.05735	0.03218	0.00628	5.44E-4	1.52E-4
50.3	0.28608	0.1986	0.13519	0.05914	0.03314	0.00647	5.61E-4	1.57E-4
50.4	0.29601	0.20539	0.13972	0.06104	0.03416	0.00668	5.84E-4	1.64E-4
50.5	0.30653	0.21258	0.14451	0.06302	0.03522	0.0069	6.28E-4	1.96E-4
50.6	0.31769	0.22021	0.14959	0.0651	0.03632	0.0071	6.18E-4	1.73E-4
50.7	0.32955	0.22832	0.15499	0.06732	0.03749	0.00733	6.37E-4	1.78E-4
50.8	0.34216	0.23697	0.16076	0.0697	0.03874	0.00758	6.6E-4	1.85E-4
50.9	0.3556	0.24619	0.16692	0.07227	0.04007	0.00788	6.99E-4	1.98E-4
51	0.36993	0.25602	0.17347	0.07496	0.04147	0.0082	8.47E-4	3.66E-4
51.1	0.38522	0.26653	0.18045	0.07776	0.04292	0.00844	7.46E-4	2.1E-4
51.2	0.40159	0.2778	0.18797	0.08078	0.04448	0.00873	7.63E-4	2.14E-4
51.3	0.41913	0.28994	0.19611	0.08415	0.04618	0.00908	7.98E-4	2.24E-4
51.4	0.43794	0.30299	0.20492	0.08788	0.04806	0.00956	8.7E-4	2.49E-4
51.5	0.45812	0.31701	0.21434	0.0918	0.05002	0.01013	0.00133	7.51E-4
51.6	0.47978	0.33207	0.22442	0.09578	0.05202	0.01039	9.66E-4	2.79E-4
51.7	0.50311	0.34836	0.23537	0.10009	0.05418	0.01072	9.5E-4	2.69E-4
51.8	0.52825	0.36606	0.24743	0.10515	0.05666	0.01126	0.001	2.84E-4
51.9	0.55536	0.38527	0.26066	0.11103	0.05953	0.01212	0.00115	3.31E-4
52	0.58456	0.40599	0.2749	0.11729	0.06258	0.01335	0.00221	0.00105
52.1	0.61601	0.42833	0.29009	0.12333	0.06553	0.01367	0.00148	4.54E-4
52.2	0.64999	0.45259	0.30666	0.12974	0.06864	0.01386	0.00127	3.62E-4
52.3	0.68677	0.47915	0.32517	0.1377	0.07248	0.01468	0.00134	3.83E-4
52.4	0.72655	0.50818	0.34582	0.14763	0.07727	0.01635	0.00161	4.72E-4
52.5	0.76946	0.53958	0.36815	0.15849	0.08256	0.01926	0.00356	0.00142

52.6	0 81571	0.57338	0.39179	0 16834	0 08729	0.02003	0 00309	0 00109
52.7	0 8657	0.61009	0 41738	0.17799	0 09186	0 01937	0 00187	5 46E-4
52.8	0 91989	0.65049	0 44633	0.19063	0 09793	0 02042	0 00191	5.52E-4
52.9	0 97857	0 69498	0.47933	0.20797	0.1064	0.02352	0.00238	7 01E-4
53	1 0418	0 74324	0.51546	0.22829	0 11654	0 03008	0 00512	0 00176
53.1	1.1096	0.79484	0.55328	0 24639	0.12541	0 0341	0 01046	0 00539
53.2	1 18232	0 85019	0.59324	0 26171	0 13249	0 03065	0 00336	0.00101
53.3	1.26051	0.9105	0.63789	0 28163	0 14214	0 03129	0 00305	8.92E-4
53.4	1.34455	0.97644	0.68885	0.31141	0 15732	0.0374	0 00399	0 00118
53.5	1 43437	1 04727	0.7442	0.34758	0 1765	0.05228	0 00981	0 00334
53.6	1 52999	1.1219	0.80043	0.37729	0 19182	0 06261	0 02771	0 01697
53.7	1 63213	1.2011	0.85789	0.39678	0 20048	0 05133	0 0063	0 00193
53.8	1.74225	1 28787	0.92245	0 42211	0.21264	0 0484	0 00481	0 00141
53.9	1 86148	1 38477	0 99963	0 46755	0.23647	0.05592	0 0057	0 00167
54	1.98975	1.49121	1.0883	0.53367	0 273	0 07841	0.01038	0 00318
54.1	2.12609	1.60386	1.18059	0.60046	0 31077	0.11901	0.05528	0.03003
54.2	2.27016	1.72083	1.27069	0 64107	0 33072	0 11041	0 02373	0 00825
54.3	2.42324	1.84501	1.36429	0.67041	0.34296	0.08722	0 00956	0 00284
54.4	2 58733	1.98181	1.47396	0.72754	0.37311	0.0901	0 00911	0.00266
54.5	2 76297	2.13297	1.60454	0.82952	0 43202	0.11992	0 01386	0.00412
54.6	2 94863	2.29386	1.74573	0 95524	0.50852	0 19514	0 04499	0 0155
54.7	3.1426	2 45843	1 88143	1.04385	0.55961	0 23945	0.12305	0.06972
54.8	3.34556	2.62744	2 01118	1.07929	0 57168	0 17273	0 02306	0 00702
54.9	3.56076	2.80974	2.15545	1.13304	0 59722	0.15013	0 0154	0.00449
55	3.79069	3.01285	2 33312	1.26409	0 67519	0 17867	0 01891	0.00552
55.1	4 03423	3.23376	2.53855	1.4697	0 80679	0.27836	0 04108	0 01258
55.2	4 2878	3 46096	2.74319	1.66241	0.93305	0 44799	0 27108	0.1764
55.3	4 55003	3.68824	2.92746	1.74005	0 97072	0.37778	0 08018	0.02669
55.4	4 82488	3.92536	3.11178	1.76938	0.97273	0 26933	0 02983	0 00873
55.5	5.11851	4 19038	3.33906	1.894	1.0451	0 26647	0 02677	0.00771
55.6	5 43285	4 49081	3 62901	2.17531	1 22999	0 36064	0 04077	0.01189
55.7	5 76254	4.81425	3.95479	2.55686	1.49614	0 61866	0.12714	0.04134
55.8	6 09919	5.14006	4 26653	2 84606	1 69405	0.83797	0.54433	0.40582
55.9	6 4383	5 46229	4.55193	2.96011	1.74877	0 60434	0.08717	0.02637
56	6 78012	5.79471	4.85795	3.12237	1.85135	0 51943	0 05384	0.01538
56.1	7 12193	6.14676	5.22809	3.53883	2.16431	0 67442	0 0752	0.02146
56.2	7 45043	6 49642	5.63	4.17397	2 66371	1 16757	0 24295	0.07925
56.3	7.74517	6.79441	5 95579	4 68778	3.06087	1.74184	0.65387	0 26834
56.4	7 99318	7 00412	6 11404	4 68972	3 0137	1 56852	0 62227	0.27892
56.5	8 20161	7.1405	6.13409	4 29353	2 6493	0 91652	0.11855	0.03483
56.6	8 39472	7 26331	6 14895	3 98058	2 38347	0 64267	0 06466	0.01836
56.7	8 59613	7 42855	6.27559	4 03264	2.41104	0 63851	0 06329	0 01793

56.8	8.81207	7.6452	6.52716	4.47275	2.74598	0.89405	0.10605	0.03067
56.9	9.03013	7.8718	6.80505	5.05857	3.22328	1.58956	0.41691	0.14216
57	9.23463	8.05707	6.97916	5.26449	3.38414	1.88425	0.97171	0.48513
57.1	9.42551	8.19421	7.02555	4.94723	3.08959	1.1294	0.15653	0.04626
57.2	9.62208	8.3332	7.06164	4.61123	2.80301	0.76308	0.07737	0.02193
57.3	9.84738	8.53582	7.22729	4.65281	2.82514	0.72266	0.06961	0.01958
57.4	10.10777	8.82075	7.56684	5.17354	3.22358	0.94542	0.10006	0.02839
57.5	10.38583	9.14383	7.99098	6.03011	3.92197	1.63906	0.26323	0.07912
57.6	10.65411	9.42906	8.32419	6.65726	4.45628	2.67641	1.96626	1.59533
57.7	10.90017	9.63603	8.45809	6.49449	4.27664	1.96535	0.39717	0.12521
57.8	11.14144	9.80562	8.48013	5.92792	3.76538	1.14755	0.12647	0.03599
57.9	11.41466	10.03277	8.59739	5.64856	3.52202	0.88855	0.08443	0.0236
58	11.74709	10.39451	8.97074	5.95772	3.74263	0.93392	0.08754	0.02439
58.1	12.13054	10.89321	9.62722	6.94346	4.49593	1.28682	0.13105	0.03676
58.2	12.51442	11.43777	10.42798	8.51183	5.77353	2.26233	0.31743	0.09287
58.3	12.82421	11.87242	11.0832	10.02174	7.08889	4.08377	2.0921	1.19501
58.4	13.00014	12.06034	11.30371	10.41245	7.44402	4.37144	1.36829	0.49852
58.5	13.03346	11.97721	11.03231	9.45406	6.60391	3.14643	0.81169	0.28651
58.6	12.97414	11.73115	10.49375	7.98517	5.34958	1.74122	0.19977	0.05657
58.7	12.90401	11.49153	10.00976	6.887	4.46019	1.15723	0.11032	0.03062
58.8	12.8961	11.39657	9.80791	6.48481	4.14828	1.00601	0.09227	0.02553
58.9	12.98458	11.50041	9.96054	6.80704	4.40613	1.14628	0.10984	0.03052
59	13.15637	11.76422	10.39011	7.77418	5.20607	1.72677	0.20244	0.05754
59.1	13.36436	12.08202	10.89147	8.96012	6.24232	3.14807	0.85099	0.2904
59.2	13.55555	12.34266	11.24009	9.48988	6.66421	3.66451	1.66144	0.75472
59.3	13.69709	12.49665	11.37286	9.21607	6.31347	2.33021	0.30307	0.08737
59.4	13.78241	12.55996	11.39496	9.02292	6.12361	1.97678	0.21504	0.06042
59.5	13.81955	12.55612	11.37269	9.26241	6.4299	2.75479	0.49583	0.15162
59.6	13.82359	12.48839	11.24467	9.27279	6.53795	3.66098	2.59733	2.25886
59.7	13.82285	12.38097	10.98331	8.51689	5.85459	2.34106	0.36527	0.10827
59.8	13.86286	12.31583	10.73274	7.58981	5.01807	1.42162	0.145	0.04047
59.9	13.99159	12.40118	10.714	7.1849	4.64827	1.14366	0.10554	0.02917
60	14.23191	12.7043	11.07028	7.55068	4.89863	1.21983	0.11308	0.03127
60.1	14.55933	13.20239	11.7962	8.75792	5.83273	1.69446	0.17359	0.04847
60.2	14.89893	13.7673	12.70345	10.66309	7.40918	2.99302	0.45205	0.13357
60.3	15.14833	14.19794	13.43274	12.47031	8.98103	5.11557	2.94592	2.58651
60.4	15.22277	14.31412	13.62056	12.93931	9.38094	5.60852	2.16668	0.9412
60.5	15.09901	14.06725	13.16611	11.68402	8.25042	4.04722	0.96728	0.32299
60.6	14.82747	13.57325	12.31877	9.66681	6.51711	2.16094	0.2478	0.07023
60.7	14.50222	13.03307	11.47278	8.05664	5.22312	1.37671	0.13221	0.03676
60.8	14.21155	12.6159	10.91276	7.27282	4.62707	1.13514	0.10497	0.02912
60.9	14.00031	12.38897	10.72283	7.31349	4.68045	1.23922	0.12083	0.03374

61	13 86078	12 30888	10 79989	8 01729	5 29072	1.84269	0 2302	0.06625
61.1	13.75141	12.26152	10.90168	8.81317	6.02952	3.27443	1.14991	0.43675
61.2	13.63294	12.14417	10.79585	8.74905	5.98282	3.28814	1.18569	0.45572
61.3	13.49877	11.94538	10.46682	7.79867	5.12679	1.82637	0.23154	0.06678
61.4	13.37647	11.74599	10.1175	6.88871	4.35805	1.1821	0.11706	0.03282
61.5	13.30114	11.64061	9.95834	6.57282	4.09678	1.04461	0.09963	0.02787
61.6	13.28539	11.66048	10.04977	6.93158	4.37889	1.28218	0.13643	0.03867
61.7	13.31026	11.75406	10.27607	7.71842	5.04397	2.1357	0.37291	0.11407
61.8	13.34244	11.83253	10.42827	8.20387	5.47134	3.18205	2.48829	2.486
61.9	13.36298	11.85088	10.39703	7.83055	5.10815	2.1652	0.37881	0.11595
62	13.38038	11.8502	10.29636	7.16688	4.51223	1.32911	0.14166	0.04018
62.1	13.41412	11.91084	10.33781	6.97922	4.33459	1.1321	0.10931	0.03066
62.2	13.46303	12.06406	10.62364	7.54919	4.77067	1.37397	0.14169	0.04002
62.3	13.4873	12.24117	11.04564	8.76129	5.7763	2.28458	0.33288	0.09886
62.4	13.42187	12.29903	11.31515	9.88211	6.79746	4.0157	2.11523	1.59373
62.5	13.21442	12.11561	11.16093	9.80129	6.77869	4.08809	2.20681	1.55694
62.6	12.85856	11.68352	10.57784	8.51257	5.67053	2.31649	0.33765	0.09917
62.7	12.3933	11.10527	9.81346	7.10503	4.51291	1.35382	0.14144	0.03988
62.8	11.87194	10.49871	9.11016	6.25839	3.86616	1.10329	0.1149	0.03265
62.9	11.33118	9.9172	8.52902	5.93383	3.66922	1.3642	0.225	0.06943
63	10.78544	9.35064	7.98367	5.64393	3.50994	1.77678	1.30402	1.30641
63.1	10.24179	8.78253	7.39859	5.00287	3.04172	1.18021	0.1988	0.06135
63.2	9.71336	8.2317	6.81373	4.26293	2.50195	0.70928	0.07609	0.02188
63.3	9.21648	7.73635	6.32218	3.77702	2.16862	0.55516	0.05506	0.01572
63.4	8.75823	7.3122	5.95925	3.6175	2.07931	0.60418	0.06876	0.02005
63.5	8.33123	6.9361	5.66993	3.628	2.12488	0.90163	0.22284	0.07673
63.6	7.9214	6.56895	5.36277	3.48539	2.04983	1.01468	0.50972	0.25967
63.7	7.52119	6.19352	5.00358	3.08135	1.76408	0.60793	0.08452	0.0254
63.8	7.13429	5.82599	4.6416	2.66743	1.4816	0.39513	0.04109	0.01187
63.9	6.76822	5.49102	4.33838	2.42983	1.33184	0.34313	0.03512	0.01016
64	6.42465	5.19328	4.10232	2.36809	1.30864	0.41763	0.05681	0.01718
64.1	6.09734	4.91437	3.88781	2.33814	1.31213	0.6087	0.3241	0.18223
64.2	5.779	4.63416	3.6472	2.1619	1.20275	0.49646	0.11748	0.04015
64.3	5.46847	4.35169	3.383	1.88146	1.0181	0.29644	0.0346	0.01022
64.4	5.17047	4.08252	3.13588	1.65578	0.87774	0.21914	0.0222	0.00645
64.5	4.88929	3.8388	2.933	1.5442	0.81559	0.21584	0.02368	0.00698
64.6	4.62409	3.61706	2.76365	1.50663	0.80483	0.2885	0.05948	0.01997
64.7	4.37044	3.40412	2.59573	1.43674	0.77146	0.33505	0.1915	0.1232
64.8	4.12538	3.19239	2.41299	1.28333	0.67758	0.21623	0.03096	0.00954
64.9	3.89018	2.98691	2.23039	1.12047	0.58004	0.14588	0.01525	0.00447
65	3.66793	2.79711	2.07046	1.01246	0.51947	0.12455	0.01263	0.00369
65.1	3.45974	2.62573	1.93806	0.96157	0.49509	0.13837	0.01798	0.00551

65.2	3 26367	2.46697	1 81883	0 92495	0 48031	0 18082	0.09076	0 0557
65.3	3.077	2.31373	1 69695	0 85181	0 44036	0.14798	0.03054	0.01042
65.4	2 89903	2 1652	1 57256	0.75424	0.38489	0.09824	0.01089	0.00324
65.5	2.73094	2 02588	1 45758	0 67461	0 3417	0.07815	0.00774	0.00226
65.6	2.57383	1.89921	1.35955	0 62596	0.3176	0 07576	0 00809	0 0024
65.7	2 42714	1 78372	1.2746	0 5985	0 30497	0 09029	0 01927	0 00694
65.8	2.2892	1 67522	1.19341	0 56212	0 2872	0 09164	0 03136	0.01464
65.9	2 15887	1.57145	1.11204	0 50966	0 25927	0 06543	0 00775	0 00235
66	2 03618	1.47365	1 0347	0 45979	0.23339	0 05165	0 00506	0 00148
66.1	1.92163	1.38392	0 96647	0 42469	0.21593	0 04718	0 00462	0.00135
66.2	1.8151	1.30227	0 9073	0 40212	0 20533	0 04995	0.00662	0.0021
66.3	1.71571	1.22674	0.85296	0.38082	0.19536	0.05386	0 02313	0 02119
66.4	1.62259	1 15561	0 8002	0.35284	0 18137	0 04339	0 00533	0 00165
66.5	1.53545	1 08886	0.74988	0 32397	0.16703	0.03561	0 00342	9 93E-4
66.6	1 45439	1.02746	0 70457	0.30116	0 15596	0.03223	0.00299	8.61E-4
66.7	1.37932	0 97169	0 66503	0 28508	0 14827	0 03159	0 00316	9 3E-4
66.8	1.30973	0 92067	0 62964	0.27209	0.14212	0 03322	0 00723	0 00346
66.9	1.24493	0 8732	0 59626	0.25745	0 13504	0 03061	0 0042	0.00139
67	1.18444	0.82875	0 5644	0.24144	0.12726	0 02645	0.00251	7.26E-4
67.1	1.12811	0.78752	0 53498	0.22732	0.12048	0 02426	0.00219	6.25E-4
67.2	1 07581	0 74972	0 50868	0.21627	0.11516	0 02325	0 00212	6 08E-4
67.3	1.02727	0.71505	0 48508	0.20735	0 11083	0 02321	0 00266	8 47E-4
67.4	0 98211	0 68293	0 4632	0 19859	0 10656	0 0226	0 00326	0 00127
67.5	0 93996	0 65292	0 44249	0 18933	0 10206	0.02068	0 00192	5.52E-4
67.6	0.90063	0 62496	0 42316	0.18065	0 09786	0 01941	0.00172	4 87E-4
67.7	0.864	0 59911	0 40552	0 17327	0 09425	0 01863	0 00165	4 65E-4
67.8	0 82989	0.57525	0.38949	0 16701	0.09113	0 01819	0.00168	4.84E-4
67.9	0 79808	0.55311	0.37469	0.16122	0 08823	0 01785	0 00235	0 00135
68	0 76833	0.53241	0 36076	0 15541	0 08533	0.01698	0 00154	4.41E-4
68.1	0 74048	0.51304	0 34766	0 14983	0 08255	0.01624	0 00142	4E-4
68.2	0.7144	0 49497	0.33551	0.14479	0 08002	0.01569	0 00137	3.84E-4
68.3	0 68999	0 47814	0.32429	0.1403	0.07772	0.01527	0 00134	3.77E-4
68.4	0 66711	0.46242	0 31386	0 13616	0 07558	0.01493	0 00149	5.23E-4
68.5	0.64561	0 44766	0.30404	0.13215	0 07351	0 01447	0 00129	3 68E-4
68.6	0.62538	0 43377	0.29476	0 12829	0 07151	0 01401	0 00122	3.41E-4
68.7	0 60633	0 4207	0 28603	0 12467	0 06964	0 01362	0 00118	3.3E-4
68.8	0 58837	0 40841	0.27786	0 12133	0 06788	0 01327	0 00115	3.22E-4
68.9	0.57143	0.39684	0.27018	0.11821	0 06623	0 01297	0 00115	3.27E-4
69	0 55542	0 38591	0 26291	0 11523	0 06464	0 01266	0 00112	3.17E-4
69.1	0.54026	0.37555	0 25601	0.11235	0 06311	0 01233	0.00107	2.98E-4
69.2	0 52589	0 36573	0 24945	0 10962	0 06166	0 01204	0 00104	2.9E-4
69.3	0.51225	0 35641	0 24324	0 10703	0 06027	0 01177	0 00102	2.84E-4

69 4	0 4993	0.34757	0.23735	0 10458	0.05894	0 01151	9 98E-4	2.79E-4
69 5	0 48698	0.33915	0.23174	0.10224	0.05767	0.01127	9.85E-4	2.8E-4
69 6	0.47525	0.33113	0.22637	0 09998	0.05645	0 01102	9.53E-4	2.66E-4
69 7	0 46406	0 32348	0 22125	0 09782	0.05527	0.01079	9.31E-4	2.6E-4
69 8	0 45337	0 31616	0.21635	0 09575	0.05414	0 01057	9.12E-4	2.54E-4
69 9	0 44316	0 30917	0 21167	0 09377	0.05306	0 01036	8.94E-4	2.49E-4
50	0 25938	0 18034	0 12299	0 05405	0.03039	0 00594	5 19E-4	1 48E-4

图 2.2.2 给出了 5mm 氧气吸收带从 0 到 30Km 不同高度的氧吸收系数(dB/Km)。

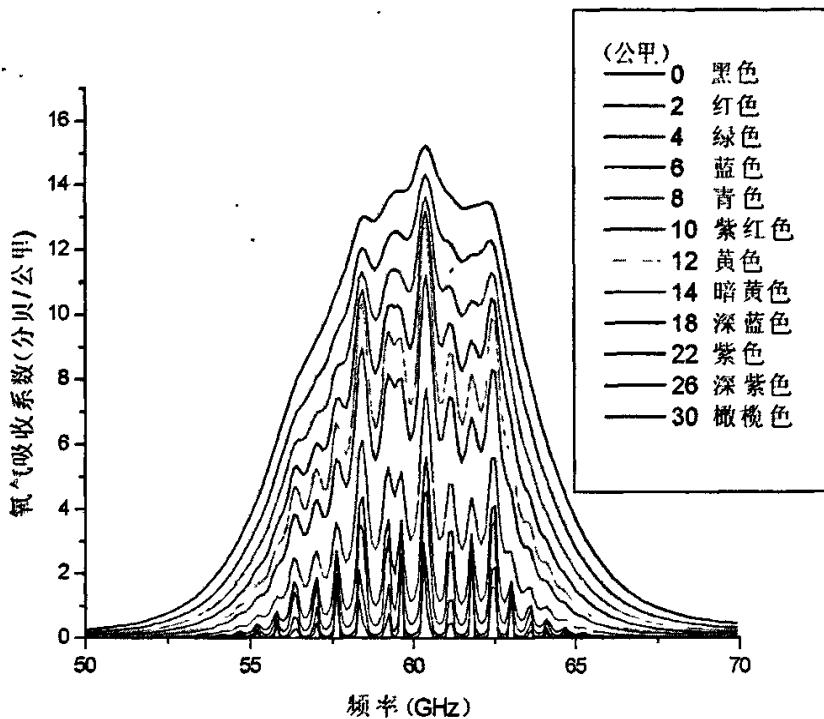


图 2.2.2 0 到 30Km 不同高度的氧气吸收系数

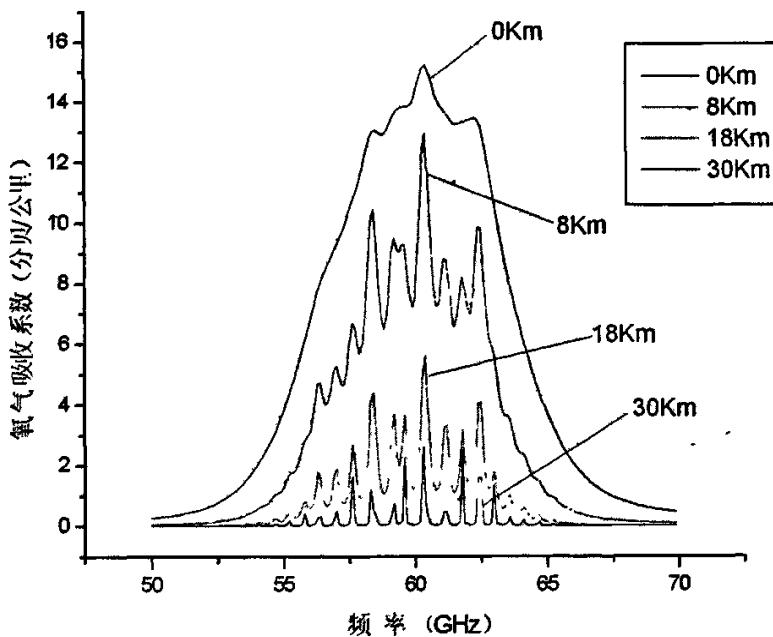


图 2.2.3 四个不同高度的氧气吸收系数

2.2.2 R_1 模式

1972 年 Reber 利用 VVV 线形和 M-L 模式重新计算了天顶衰减^[1]，当计算值和实测值有较大误差之后分析得出式 (2.2.10) 只适合低压力条件下，此时各条谱线还是可以分辨的。当大气压力变大导致各条谱线重叠时，式 (2.2.10) 将不适合表现 P 和 T 的变化关系。当压力从 1 毫巴逐渐增加到一个大气压，在低压区和高压区之间有一个过渡点，这个点的半宽度 $\Delta\nu$ 为 52.7GHz，它是吸收带中几条最强的吸收线的半振幅点彼此重叠的临界宽度。

于是 Reber 提出了 R_1 模式：

$$\Delta\nu = 1.88p(300/T), \quad \text{当 } \Delta\nu \leq 52.7 \text{ GHz 时}; \quad (2.2.10)$$

$$\Delta\nu = 52.7 + 0.627(p - p_1) \frac{300}{T}, \quad \text{当 } \Delta\nu > 52.7 \text{ GHz 时}。 \quad (2.2.11)$$

$\Delta\nu$ 在不同高度标准大气的值如表 3.2.4 所示。表 3.2.4 列出了 R_1 模式和 M-L 模式分别在几个高度的氧气 5mm 频段吸收带天顶总吸收厚度的测量值^[1]。

表 3.2.4 氧气 5mm 频段吸收带天顶总吸收厚度的测量值

Z V	0		1		5		10		15		20	
	R	M-L										
50 48	1 47	1 67	1 21	1 38	0 53	0 62	0 17	0 23	0 05	0 06	0 013	0 015
50 80	1 64	1 86	1 35	1 53	0 59	0 69	0 18	0 25	0 05	0 07	0 014	0 015
51 30	1 99	2 26	1 63	1 86	0 71	0 83	0 22	0 30	0 06	0 08	0 017	0 017
51 80	2 49	2 83	2 04	2 33	0 87	1 03	0 27	0 37	0 07	0 10	0 021	0 022
52 30	3 25	3 69	2 67	3 03	1 14	1 34	0 35	0 48	0 10	0 13	0 028	0 029
52 70	4 18	4 71	3 43	3 88	1 47	1 72	0 45	0 61	0 13	0 17	0 038	0 039
53 20	6 00	6 65	4 95	5 51	2 17	2 50	0 69	0 90	0 21	0 26	0 063	0 066
53 69	9 07	9 60	7 60	8 07	3 57	3 91	1 30	1 56	0 50	0 59	0 21	0 23
54 25	14 30	15 11	12 10	12 81	5 91	6 35	2 59	2 46	0 78	0 82	0 27	0 29
54 90	23 00	24 71	19 58	21 20	9 51	10 82	3 22	4 16	0 96	1 26	0 29	0 31
55 45	35 80	37 83	30 91	32 86	15 83	17 59	5 70	7 02	1 75	2 16	0 53	0 54
56 00	59 00	61 61	52 00	54 69	28 92	32 00	11 35	13 88	3 53	4 57	1 06	1 16
56 50	81 32	82 31	72 77	73 87	43 71	45 63	19 48	21 38	6 86	7 97	2 20	2 35
57 20	82 71	88 30	73 01	78 42	40 76	46 05	15 96	19 99	4 91	6 36	1 47	1 61
58 00	104 7		92 73		51 87	60 36	19 98	26 23	5 89	7 90	1 71	1 89
58 80	113 8		100 8		56 39	66 74	21 76	29 11	6 35	8 62	1 84	2 03
59 40	158 5		144 2		91 16	97 40	41 55	47 47	13 74	16 80	4 17	4 53

根据 R_i 模式, 通过计算得到了在 5mm 氧气吸收带从 0 到 30Km 不同高度的氧吸收系数(dB/Km), 如图 2.2.4 所示。图 2.2.5 表示了四个不同高度的氧气吸收系数。

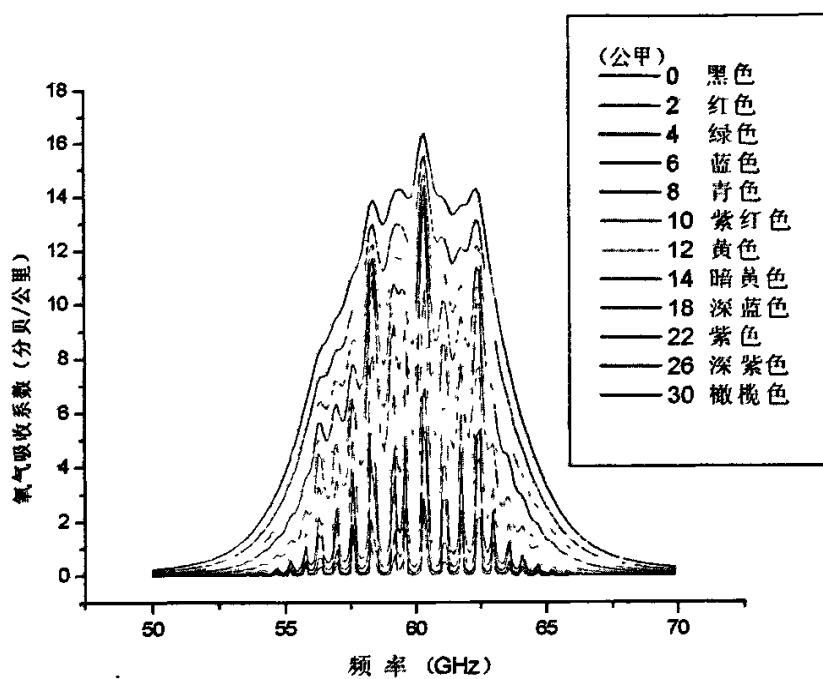


图 2.2.4 0 到 30Km 不同高度的氧气吸收系数

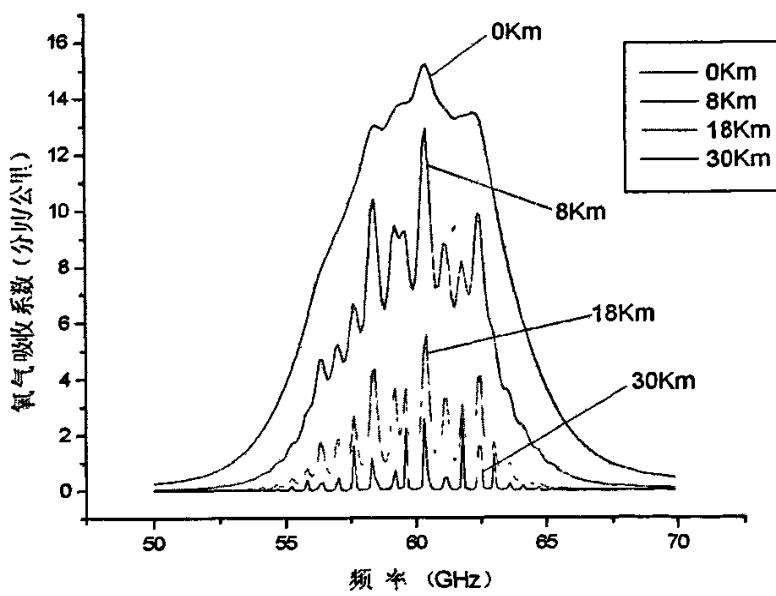


图 2.2.5 四个不同高度的氧气吸收系数

2.2.3 两种模式的分析比较

利用上面两种模式，分别计算了同一高度的氧气吸收系数，图 2.2.6 和图 2.2.7 所示的是在 6 和 12 公里处两种模式计算结果的比较。

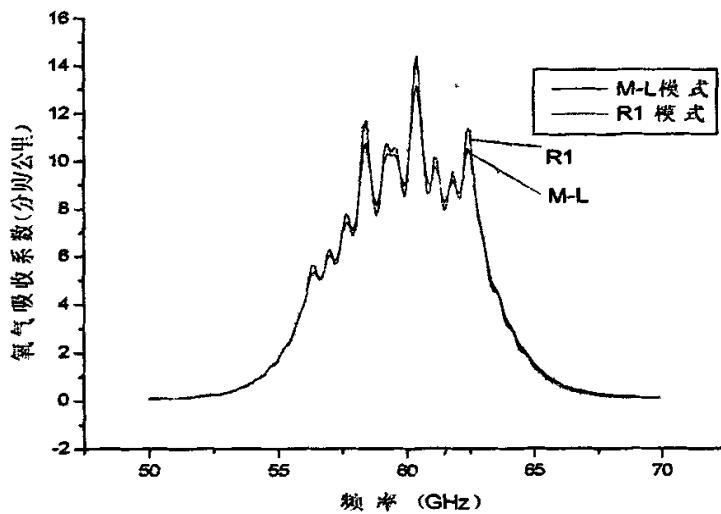


图 2.2.6 6Km 处两种模式的比较

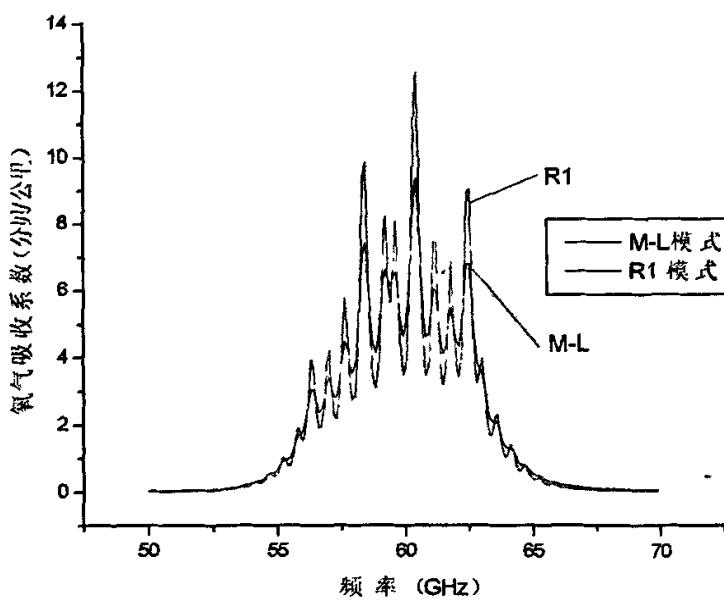


图 2.2.7 12Km 处两种模式的比较

从图 2.2.6 和图 2.2.7 中可以看出两种模式计算得到的氧气分子吸收系数基本一致, 在靠近吸收线中心附近, 吸收系数随频率变化很大。从谱线结构的角度来讲, 由于低层大气的谱线展宽效应, 在对流层的中下部将分辨不出吸收线的谱线结构。而选取的微波辐射计通道一般分布在吸收谱线的谷区, 如果分辨不出谱线结构将会对通道的选取产生影响, 也会影响低层大气的遥感。从图中可以看出, R_i 模式的谱线结构要比 M-L 模式的谱线结构清晰, 并且 R_i 模式的计算公式比 M-L 模式简单。

2.3 大气微波辐射传输方程

辐亮度为 I 的电磁波, 在 r 方向的介质中传播了距离为 dr (单位为 m), 如图 2.3.1 所示^[7]。设介质对辐射能的体积衰减系数为 k_e (单位为 Npm^{-1}), 则辐亮度被减小为 $I + dI$, 其中 $dI = -Ik_e dr$, 那么在某点 r_1 处辐亮度为 $I(r_1)$ 的电磁波传输到另外一点 r 时, 辐亮度 $I(r)$ 为:

$$I(r) = I(r_1) \exp\left(-\int_{r_1}^r k_e dr\right). \quad (2.3.1)$$

在传输路径上, 区间 $[r_1, r]$ 内介质的光学厚度 u 和透过率 τ 定义为:

$$u(r_1, r) = \int_{r_1}^r k_e dr \geq 0, \quad (2.3.2)$$

$$\tau(r_1, r) = \exp\{-u(r_1, r)\} = \exp\left\{-\int_{r_1}^r k_e dr\right\} \leq 1. \quad (2.3.3)$$

如果辐射是在大气中传输, k_e 就是 r 处大气的体积衰减系数。

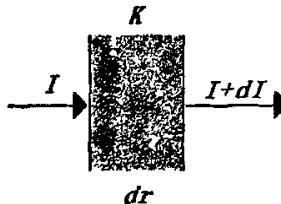


图 2.3.1 电磁波传播衰减模型

在大气辐射传输体系中一般运用图 2.3.2 所示的球坐标体系。设辐射传输路径上高度 z 处, 辐射传输方程向 r 的天顶角为 θ , 则:

$$dr = \sec \theta(z) dz, \quad (2.3.4)$$

$$u(r_1, r_2) = \int_{r_1}^{r_2} k_e(z) \sec \theta(z) dz = u(z_1, z_2), \quad (2.3.5)$$

$$\tau(r_1, r_2) = \exp\{-u(r_1, r_2)\} = \exp\left\{-\int_{r_1}^{r_2} k_e(z) \sec \theta(z) dz\right\} = \tau(z_1, z_2). \quad (2.3.6)$$

对于整个大气层, 辐射传输路径的光学厚度和透过率为:

$$u(0, \infty) = \int_0^\infty k_e(z) \sec \theta(z) dz, \quad (2.3.7)$$

$$\tau(0, \infty) = \exp \left\{ - \int_0^\infty k_e(z) \sec \theta(z) dz \right\}. \quad (2.3.8)$$

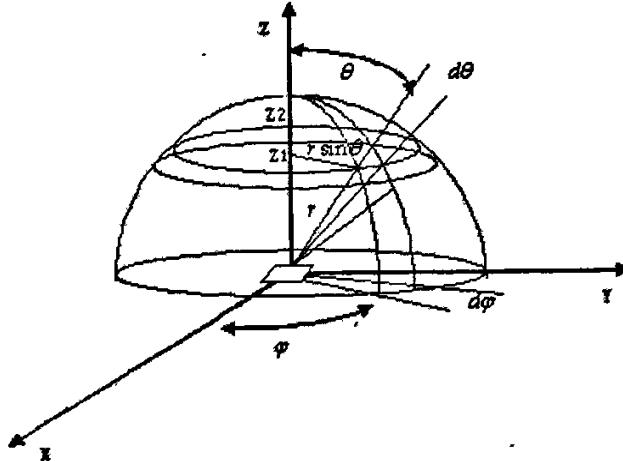


图 2.3.2 球坐标体系中的大气辐射传输

在大气中,由于微波辐射的波长较长,除降雨外,大气分子和云滴的散射相对于吸收可以忽略不计,只需考虑大气对微波辐射的放射和吸收过程^[8]。所以对于非散射大气,假定大气水平均匀,在局地热平衡情况下,微波辐射在大气中的传输过程满足下列方程:

$$\frac{dI_\lambda(l)}{dl} = -\alpha_\lambda I_\lambda(l) + \alpha_\lambda B_\lambda(l). \quad (2.3.9)$$

其中 $I_\lambda(l)$ 是在大气中沿方向 l 传输的波长为 λ 的微波辐射强度, α_λ 为大气吸收介质密度的函数, $B_\lambda(T)$ 为黑体辐射强度, 在微波段 $B_\lambda(T) \approx \frac{2kT}{\lambda^2}$, k 为 Boltzman 常数。

如果 $I_\lambda(l) = \frac{2k}{\lambda^2} T_{B\lambda}$, 则式(2.3.9)可以写为:

$$\frac{dT_{B\lambda}(l)}{dl} = -\alpha_\lambda T_{B\lambda}(l) + \alpha_\lambda T. \quad (2.3.10)$$

大气微波遥感基本上地面探测分与空间探测两个方面。图 2.3.3 表示大气辐射传输中的地基遥感, 图 2.3.4 表示大气辐射传输中的卫星遥感。

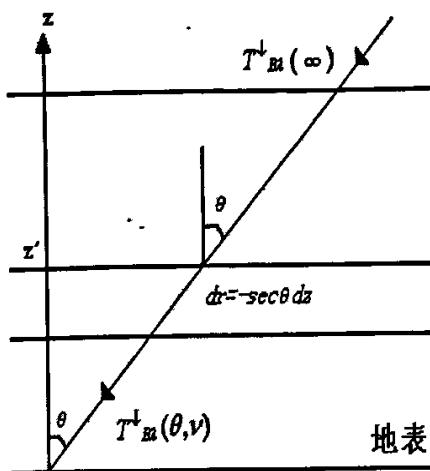


图 2.3.3 地基遥感

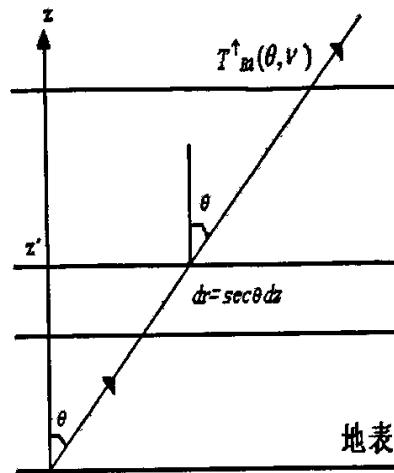


图 2.3.4 卫星遥感

式(2.3.10)相应的边界条件为:

$$T_{BA}^{\downarrow}(\infty) = T_{c\lambda}, \quad (2.3.11)$$

$$T_{BA}^{\uparrow}(0) = \alpha_{s\lambda} T_s + (1 - \alpha_{s\lambda}) T_{BA}^{\downarrow}(0). \quad (2.3.12)$$

其中 T_{BA}^{\downarrow} 和 T_{BA}^{\uparrow} 分别表示大气射向地面和射向空间的微波辐射亮度温度; $T_{c\lambda}$ 是来自宇宙背景的微波辐射亮度温度; T_s 是地表温度; $\alpha_{s\lambda}$ 是地表比辐射率, 在大气微波遥感问题中, $T_{c\lambda}$ 可作为恒定的已知背景亮度予以扣除。

在边界条件(2.3.11)和(2.3.12)的情况下, 式(2.3.9)对应的解为:

$$T_{BA}^{\uparrow}(\infty) = \alpha_{s\lambda} T_s e^{-\int_0^{\infty} \alpha_{s\lambda} dl} + \int_0^{\infty} T(l) [(1 - \alpha_{s\lambda}) e^{-2 \int_0^l \alpha_{s\lambda} dl'} + 1] e^{-\int_l^{\infty} \alpha_{s\lambda} dl'} \alpha_{s\lambda} dl, \quad (2.3.13)$$

$$T_{BA}^{\downarrow}(0) = \int_0^{\infty} T(l) \alpha_{s\lambda} e^{-\int_0^l \alpha_{s\lambda} dl'} dl. \quad (2.3.14)$$

在地基大气遥感探测中, 微波辐射计接收到来自大气和宇宙空间的热辐射信号, 通过微波辐射计辐射能量转化为亮度温度,

$$T_{\downarrow s}(\theta, \nu) = T_c e^{-\int_0^{\infty} \alpha \sec \theta dz} + \int_0^{\infty} T(Z) \alpha \sec \theta e^{-\int_0^Z \alpha \sec \theta dz} dz. \quad (2.3.15)$$

其中:

T_c 为宇宙太空的亮度温度, 约为 2.7K;

θ 为天顶角;

ν 为微波辐射计的频率;

α 为氧气吸收系数, 它与 ν 和高度有关。

式(2.3.15)中 $T_c e^{-\int_0^z \alpha \sec \theta dz}$ 作为恒定的背景亮度可以在接收到的亮度温度中扣除, 则式(2.3.14)变为:

$$T^{\downarrow b}(\theta, \nu) = \int_0^{\infty} T(Z) \alpha \sec \theta e^{-\int_0^z \alpha \sec \theta dz} dz. \quad (2.3.15)$$

令 $\omega(\theta, z) = \alpha \sec \theta e^{-\int_0^z \alpha \sec \theta dz}$, 则式(2.3.14)变为:

$$T^{\downarrow b}(\theta, \nu) = \int_0^{\infty} T(Z) \omega(\theta, z) dz. \quad (2.3.16)$$

$\omega(\theta, z)$ 称为核函数(权重函数), $\omega(\theta, z)$ 的选择直接关系到大气温度廓线反演结果的精度和稳定性, 一直以来作为大气探测中的重点研究对象。

曾庆存^[9]对可遥感的物理参数进行了分析, 提出了可采用的两种遥感方法: 扫频法和扫角法。从测量一组不同波长通道的微波辐射值 T_{BA} , 反演出大气温度廓线的方法成为扫频法。从测量同一波长通道而不同天顶角 θ 时的大气微波辐射值 T_{BA} 中反演出大气温度廓线的方法成为扫角法。

2.4 大气透过率的计算

2.4.1 大气透过率的定义

由式(2.3.8)可以得到:

$$\tau(0, z) = \exp\left\{-\int_0^z k_e(z) \sec \theta(z) dz\right\}, \quad (2.4.1)$$

$$\tau(z, \infty) = \exp\left\{-\int_z^{\infty} k_e(z) \sec \theta(z) dz\right\}. \quad (2.4.2)$$

$\tau(0, z)$ 称为下行辐射的大气透过率, $\tau(z, \infty)$ 称为上行辐射的大气透过率。从公式中可以得到透过率函数的分布形式由吸收系数的分布形式唯一决定。对大气透过率函数的计算是辐射计算中的一个很重要的问题。目前存在多种计算大气透过率的方法^[11], 如逐线计算方法、带模式的计算方法、k 分布计算方法以及经验模式计算方法。

2.4.2 大气透过率的计算方法

(1) 逐线积分法(LBL)

逐线积分法就是逐条计入大气气体吸收谱线贡献的一种精确的大气透过率计算方法。逐线积分法(LBL)已广泛地用于大气辐射传输问题。气体的吸收带由几百到近

万条吸收线组成，在吸收带内吸收系数 k_ν 的变化很大。在吸收线中心附近，波数改变 0.001 cm^{-1} ，吸收系数 k_ν 就有量级的变化。为了精确计算一个波段 $\Delta\nu$ 内的平均透过率，可利用式(2.4.3)逐线积分：

$$\tau(\Delta\nu) = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} \exp(-k_\nu U) d\nu. \quad (2.4.3)$$

式(2.4.3)中的 k_ν 是许多吸收线叠加的结果，数值积分时，吸收线中心附近的积分步长要小于 0.001 cm^{-1} ，而在翼区积分步长可以到 0.1 cm^{-1} 。根据 HITRAN2004 数据库统计的结果，氧气分子一共有 6428 根吸收谱线。

逐线积分法作为计算 k 分布和相关 k 分布函数的基础以及作为检验 k 分布方法和相关 k 分布方法的参考标准，直接和间接地用在气候和其他气象领域的研究中。即便使用带模式方法，目前也是先用 LBL 方法得到精确的透过率，然后通过某种最佳拟合求得带参数。为了用较高的光学分辨率模拟通过大气的辐射传输，以逐线积分为基础来评价辐射吸收的贡献是十分必要的。

(2) 经验模式计算方法^[12]

美国空军地球物理实验室(AFGL)提出了一种用于计算大气透过率的经验模式计算方法，被称为 LOWTRAN 经验模式。它以 20 cm^{-1} 的光谱分辨率的单参数带模式计算 0 cm^{-1} 到 50000 cm^{-1} ($0.2\text{ }\mu\text{m} \rightarrow \infty$) 的大气透过率。该模式考虑了 H_2O 、 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 、 CO 、 O_2 、 N_2 和 O_3 的吸收作用以及分子散射和气溶胶散射作用，并给出了六种大气模式、五种气溶胶模式以及卷云模式、降水模式等供选择使用。

在 LOWTRAN 模式中，由于分子的吸收作用，在 20 cm^{-1} 波数间隔内的平均透过率用单参数的经验关系式表示为：

$$\bar{\tau}(\Delta\nu) = f(K_\nu \omega^* DS). \quad (2.4.4)$$

式(2.4.4)中 f 为 LOWTRAN 经验透过率函数，其中 K_ν 为 LOWTRAN 吸收系数， DS 为大气路程， ω^* 为 DS 路程中等效吸收物质密度。经验透过率函数以数据表形式给出，编入计算大气透过率的程序中，可以直接调用。LOWTRAN 采用了最新的光谱数据资料，这种经验模式应用已经十分广泛。

2.4.3 利用 LOWTRAN 7 计算大气透过率^[12]

LOWTRAN 系列是计算大气透过率及辐射的软件包，它是由美国空军地球物理实验室(AFGL)用 Fortran 语言编写^[26]，其主要用途是为了军事和遥感的工程应用。目前最新的版本是 1989 年公布的 LOWTRAN 7 版本。它以 20 cm^{-1} 的光谱分辨率的单参数带模式计算 0 cm^{-1} 到 50000 cm^{-1} ($0.2\text{ }\mu\text{m} \rightarrow \infty$) 的大气透过率、大气背景辐射、单次散射的阳光和月光辐射亮度、太阳直射辐照度。LOWTRAN 7 增加了多次散射的计算及新的带模式、臭氧和氧气在紫外波段的吸收参数。程序考虑了连续吸收、分子、

气溶胶、云、雨的散射和吸收、地球曲率及折射对路径及总吸收物质含量计算的影响。

如上所述, LOWTRAN 7 是一个光谱分辨率为 20 cm^{-1} 的大气辐射传输实用软件。作为一个实用的软件包, LOWTRAN 7 包括了辐射传输计算的基本数据。提供了 6 种参考大气模式的温度、气压、密度的垂直廓线、水汽、臭氧、甲烷、一氧化碳和一氧化二氮的混合比垂直廓线以及其他 13 种微量气体的垂直廓线, 城乡大气气溶胶、雾、沙尘、火山喷发物、云、雨的廓线和辐射参量如消光系数、吸收系数、非对称因子的光谱分布, 还包括地外太阳光谱。

多次散射的引入增加厂透过率计算的复杂性。一方面与以前的版本衔接, 一方面适应多次散射。LOWTRAN 7 在单纯计算透过率或者仅考虑单次散射时, 使用参数化经验方法计算带平均透过率, 而在计算多次散射时, 则采用 K—分布方法。

(1) 带透过率的计算

LOWTRAN6 及之前的版本中, 大气分十分为 6 组: 1)水汽; 2)臭氧 3)均匀混合气体: 二氧化碳、一氧化二氮、一氧化碳、甲烷和氧气; 4)水汽连续吸收; 5)氮的连续吸收; 6)臭氧的紫外波段和可见光段。对前 3 组, 20 cm^{-1} 中的平均透过率为:

$$\bar{\tau}(\nu) = F[c(\nu)Up''] \quad (2.4.5)$$

其中 f 为透过率函数, $c(\nu)$ 为吸收系数; n 为 $0.8\sim28.5\text{ }\mu\text{m}$ 波长范围中上述气体的各吸收带的经验参数, 由实验测得; U 为吸收物质量; P 为单位路径的大气压; Up'' 是该路径的有效吸收量。根据对许多吸收带的平均透过率测量得到 1、2、3 组气体的透过率函数。而在 LOWTRAN 7 中, 采用了双指数透过率表达 20 cm^{-1} 光谱区的平均透过率为:

$$\bar{\tau}(\nu) = \exp[-c(\nu)U(\frac{p}{p_0})^n(\frac{T_0}{T})^m]^a \quad (2.4.6)$$

其中的经验参数 c , a , m , n 用 HITRAN 86 的数据采用 FASCOD2 的远线计算降级到 20 cm^{-1} 分辨率得到。对水汽、二氧化碳、臭氧、一氧化二氮、一氧化碳、甲烷和氧气、一氧化氮、二氧化硫、二氧化氮、甲烷分子的各个吸收光谱带都分别计算了透过率, 这样, 使用者可改变气体的相对混合比。

(2) K-分布方法

LOWTRAN 需计算 20 cm^{-1} 有限光谱区上的平均辐射特征, 而多次散射的辐射传输处理的是单色辐射传输问题。对于吸收系数随波长变化十分剧烈的气体吸收, 如何将单色辐射传输的计算结果耦合到较宽的光谱区, 是辐射传输计算中的困难之一。LOWTRAN 7 采用 K—分布方法来解决这一问题。这一方法同时也可扩展为相关 A—分布, 处理大气的气体吸收随气压和温度变化(非均匀路径)问题。

对一均匀大气层, 有限光谱区的平均透过率为:

$$\begin{aligned}\tau(\Delta\nu) &= \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} \exp(-k_u) d\nu = \int_0^{\infty} f(k) \exp(-ku) dk, \\ &= \int_0^1 \exp(-ku) dg = \sum_{i=1}^N \exp(-k_i u) \Delta g_i.\end{aligned}\quad (2.4.7)$$

此处 u 为吸收气体的路径积分量。上式给出了 K —分布方法的导出过程。对一给定气体, $f(k)$ 表示了吸收系数在 k 到 $k+dk$ 之间的波数间隔与整个 $\Delta\nu$ 间隔之比。式 (2.4.7) 表明透过率取决于吸收系数在 $\Delta\nu$ 内的分布, 而与吸收系数的次序无关。积分 k —分布函数 $g(k)$ 可以离散化到 N 个 k_i 点上。在这 N 个伪吸收系数上作多次散射的辐射传输计算, 并以权重 Δg_i 求和, 以恢复问题的谱带平均代表性。

LOWTRAN 7 先将 $\Delta\nu$ 上的气体透过率用 N 项指数和拟合, 然后执行 N 次二流近似, 得到 N 组相应于 k_i 的伪单色通量垂直廓线, 然后类似于式 (2.4.7), 用 Δg_i 作权重求和得到实际物理上的通量。

LOWTRAN 7 中每层大气的总透过率为:

$$\tau_{\Delta\nu}(u_1, u_2) = T_1 T_2 T_{mc} T_{ms} T_{ae}.\quad (2.4.8)$$

这里 T_1 和 T_2 分别是水汽、二氧化碳、臭氧、一氧化二氮、一氧化碳、甲烷和氧气、一氧化氮、二氧化硫、二氧化氮、甲烷等 11 种均匀和非均匀分布吸收气体的透过率, T_{mc} 是分子连续吸收透过率, T_{ms} 是分子散射透过率, T_{ae} 是气溶胶消光透过率。包括气溶胶、雾、云和降水的消光。气体透过率可分别用指数和表示。对第 j 种气体, 在所考虑的吸收带上, 每 20 cm^{-1} 间隔上的透过率可表示为:

$$T_{\Delta\nu}(u_j) = \sum_{i=1}^N \exp(-k_i u_j) \Delta g_i.\quad (2.4.9)$$

这里 $N=3$ 。对于几种气体吸收带的重叠, 先计算对应伪吸收系数 k_i 的各气体的光学厚度, $\Delta\tau_y(z) = k_y u_j$, 再用此光学厚度权重求和的所有气体的总 k —分布作为指数和的权重:

$$\Delta g_i(z) = \frac{\sum_{j=1}^N \Delta\tau_y(z) \Delta g_j(z)}{\sum_{i=1}^N \Delta\tau_y(z)}.\quad (2.4.10)$$

在本课题中利用 LOWTRAN 7 程序计算了不同高度或者角度下的大气透过率, 具体参数设置如下:

1976 U.S. Standard Atmosphere

Vertical or slant path to space

Transmittance mode
No multiple scattering
Boundary temperature [K]: 273.0
Surface Albedo: 0.5
No aerosol extinction
Visibility [km]: 0.0
Air mass character = 1
Default to stratospheric background
Standard cirrus model
Current wind speed [m/s]: 0.0
24-h wind speed average [m/s]: 0.0
Rain rate [mm/h]: 0.0
Surface altitude [km]: 0.2
Cirrus random number generator seed: 0
Initial altitude [km]: 0.2
Initial wavelength [nm]: 200.0
Final wavelength [nm]: 10000000.0
Step size [cm⁻¹]: 1.0

A) 计算上述参数条件下不同高度的大气透过率

分别计算 0.2、0.5、1、2、3、5、10、20、30、40、50Km 的大气透过率，由于数据量很大，在这里就不用数据表格形式列出，如图 2.4.1 和图 2.4.2 所示。

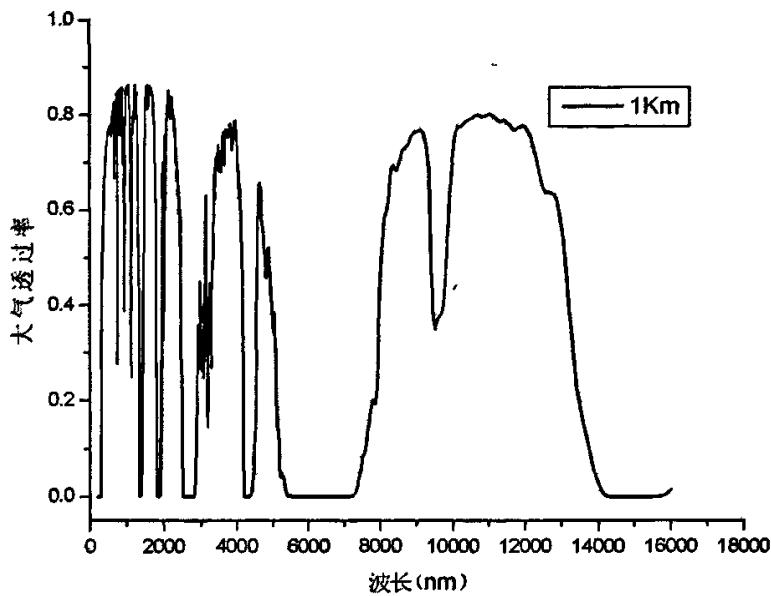


图 2.4.1 1Km 高度的大气透过率

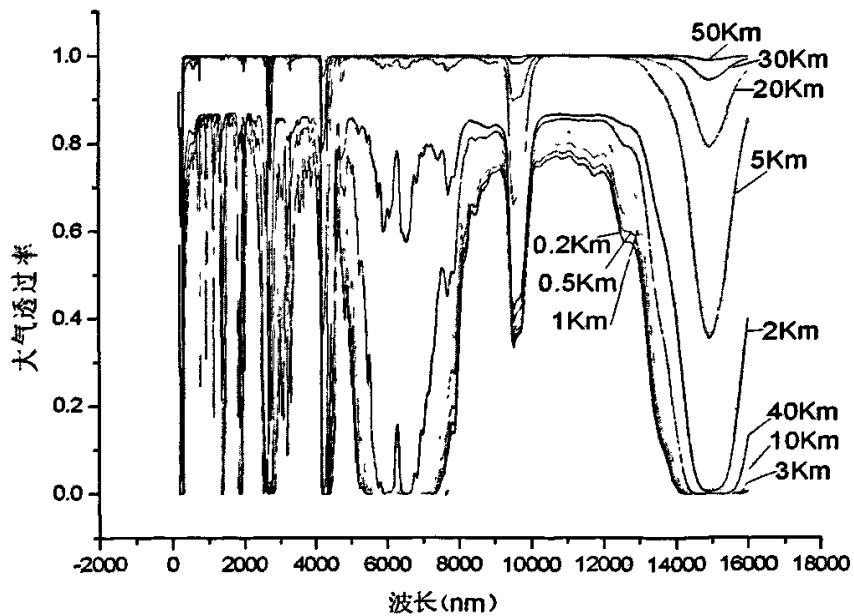


图 2.4.2 不同高度的大气透过率

从图2.4.1中可以看出大气透过率在不同的波段有不同的值，主要是由于不同的大气成分有不同强吸收带。水汽在整个长波波段都有吸收。二氧化碳对长波的吸收，以处于地球长波辐射峰值附近的最重要。大气臭氧主要分布在10~50km高度层，极大值在20~25km高度层，对平流层的热收支有重要意义。上述大气成分在特定波段存在强吸收带，使总透过率在特定波段急剧下降。从图2.4.2也可以看出同一波段在不同高度的透过率是不一样的，但是增加还是下降的趋势是一样的，这个和透过率的计算公式相符合。

B) 计算上述参数条件下不同角度的大气透过率

分别计算0、1、2、5、10、15、20、25、30、35、40、45、50度的大气透过率，由于数据量很大，在这里就不用数据表格形式列出，如图2.4.3和图2.4.4所示。

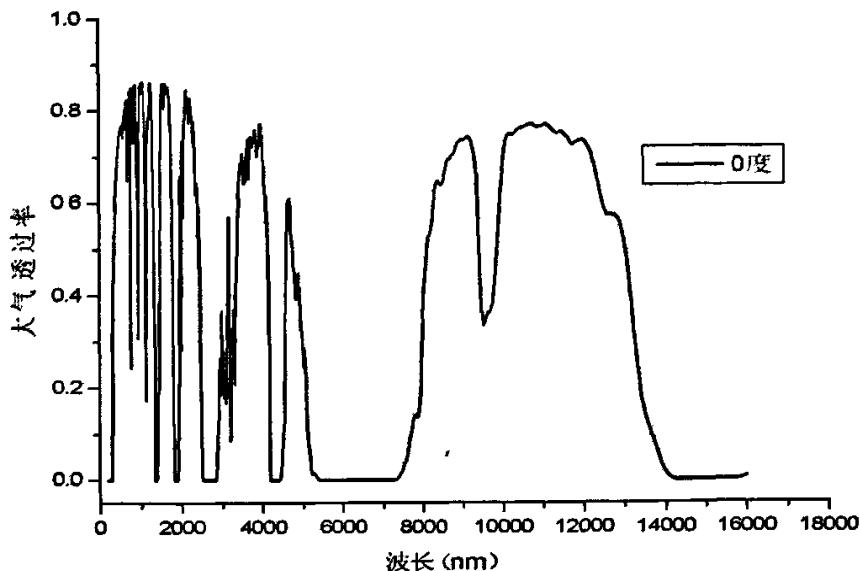


图2.4.3 天顶角为0度的大气透过率

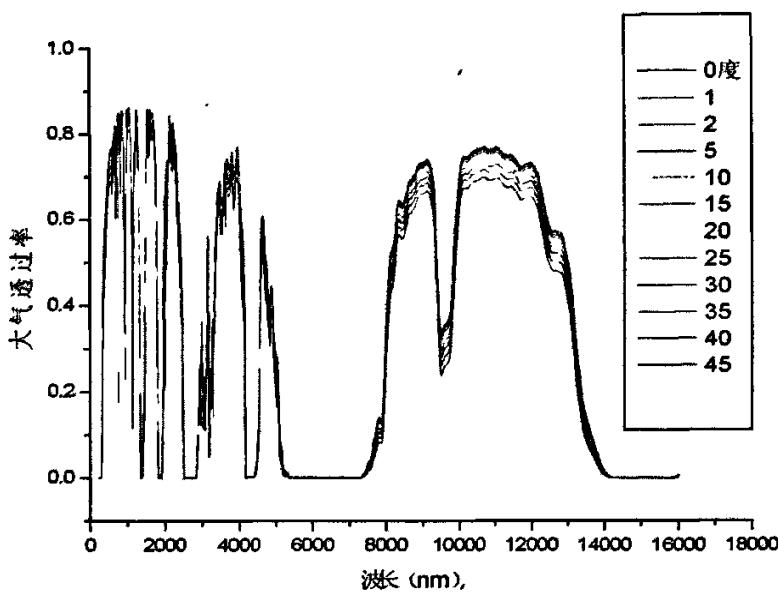


图 2.4.4 不同天顶角的大气透过率

从图2.4.3描述的大气透过率和图2.4.1相似,这主要是因为在计算不同高度的大气透过率时采用天顶角为0度。而图2.4.4描述的是不同天顶角时(0~45度)大气同一高度(地面)的透过率,从图2.4.4可以看出不同天顶角状态下的大气透过率的曲线非常相似,但是也存在着不同之处。天顶角越大,该天顶角下的大气透过率的值也越大。N个不同角度存在着N个不同的大气透过率曲线,根据大气辐射传输方程的定义,也就组成了N个方程进行反演。

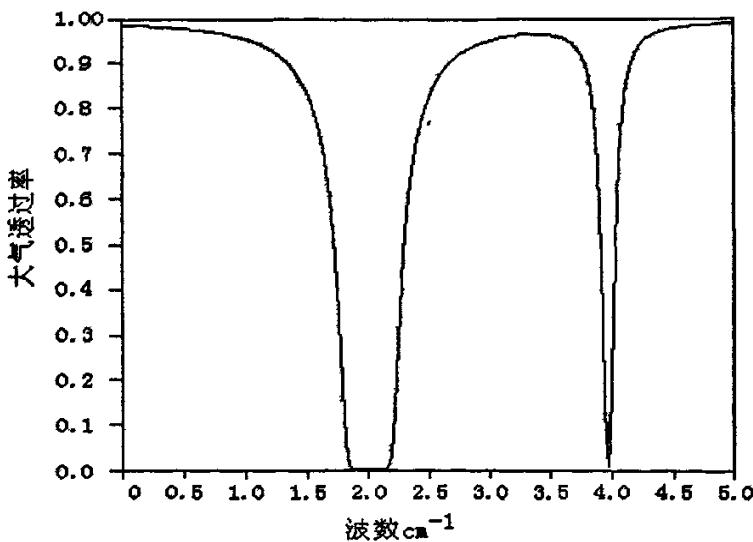


图 2.4.5 氧气吸收带的大气透过率

对于大气透过率，经常采用波数 cm^{-1} 来代替波长，大气氧气分子主要分布在 $0 \sim 1.0E-05\text{ cm}^{-1}$ 和 $1.666572 \sim 3.961085\text{ cm}^{-1}$ 之间，利用 HITRAN04 数据库，计算了在这一范围内的大气透过率，如图 2.4.5 所示。

2.5 权重函数的计算

权重函数与大气温度有关，但是在 5 毫米频段它们的垂直分布对大气温度廓线变化的依赖性很小，只需用 $T(z)$ 的初值就可以满意的估算出来。这样，就可以近似认为权重函数与 $T(z)$ 无关，这就是利用辐射传输方程利用线性化形式求解温度剖面具有很好精度的原因。权重函数的意义就是：在高度 z 处，单位厚度的薄气层内温度平均变化一度对辐射亮温的贡献。利用辐射传输方程求解温度廓线在很大程度上依赖于权重函数的分布特性。例如，当权重函数是与温度廓线无关的常数时，几乎存在无穷多的廓线使辐射传输方程成立，这就是解的不唯一性。最理想的权重函数是 δ 函数^[13]，利用一个信道的测量信息能唯一确定一个高度上的温度。这样，就可以利用 n 个不相关的信道确定 n 个不同高度上的温度。在 5 毫米波段，由于大气温度廓线遥感的频率主要是氧气分子吸收的频段，而氧气分子的密度变化是连续的，实际上不会出现理想权重函数。

在上面讨论大气透过率的基础上，这里主要讨论遥感大气反演中的一个重要的参数—权重函数的计算。

（1）上行辐射亮温的权重函数

根据节 2.2 中大气辐射传输方程，上行辐射亮温的权重函数为：

$$\begin{aligned} \omega^{\uparrow}(\theta, z) &= \alpha \sec \theta e^{-\int_z^{\infty} \alpha \sec \theta dz}, \\ &= \alpha \sec \theta \tau(z, \infty). \end{aligned} \quad (2.5.1)$$

当利用星载微波辐射计进行大气遥感的时候就要用到上行辐射亮温的权重函数这个参量。目前世界上进行大气微波遥感的卫星已经很多了，其中主要的观测体系是美国的 TOVS 和 ATOVS。TOVS 主要运行在美国第四代极轨业务环境卫星(TIROS-N, NOAA-6/7/.../14) 上。ATOVS 主要运行在美国第五代极轨业务环境卫星 NOAA-K/L/M/N 系列卫星上^[3]。ATOVS 的业务运行大大改进了卫星大气探测产品的精度和应用范围，实现了利用卫星进行全天候大气垂直之目的，为天气、气候分析和预报，尤其是数值天气预报提供了大量的不可缺少的信息。在这些卫星中每颗卫星都有自己的观测通道组合，在 5 毫米波段常用的遥测大气温度廓线的七个通道如表 2.5.1 中所示。

利用星载微波辐射计七个常用通道进行了权重函数的计算，计算条件为：美国标准大气 (1976) 和 $\theta = 0$ 。

表 2.5.1 星载辐射计常用七通道的权重函数

通道号	频率 (GHz)	权重函数的峰值高度 (hPa)
1	50.5	近地面
2	53.2	近地面
3	54.35	400
4	54.9	250
5	58.4	20
6	58.825	70
7	59.4	50

根据前面讨论过的氧气 5 毫米吸收带吸收系数和大气透过率, 利用式(2.5.1)我们计算了这七个通道在整个大气层下的权重函数分布, 如图 2.5.1 所示。从图中可以看到每个通道都有自己对应的峰值高度, 权重函数的曲线基本上不重叠, 说明这七个通道式线性无关的。

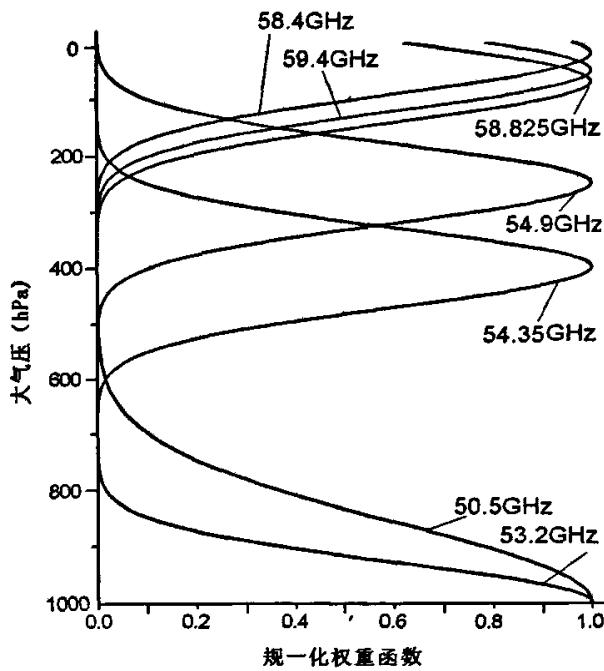


图 2.5.1 七个通道的规一化权重函数

(2) 下行辐射亮温的权重函数

在本课题中主要讨论的地基微波辐射计遥感大气温度廓线，所以要对下行辐射亮温的权重函数进行讨论。根据 2.2 节我们知道，下行的辐射亮温的权重函数：

$$\begin{aligned}\omega^{\downarrow}(\theta, z) &= \alpha \sec \theta e^{-\int_0^z \alpha \sec \theta dz}, \\ &= \alpha \sec \theta \tau(0, z).\end{aligned}\quad (2.5.2)$$

那么对于特定的 $\theta = \theta_0$ ， $\omega^{\downarrow}(\theta_0, z)$ 总是在 $z = 0$ 处取得最大值 $\alpha \sec \theta_0$ 。随着高度逐渐增加， $\omega^{\downarrow}(\theta_0, z)$ 逐渐减少到 0。

在计算氧气吸收系数的时候得出，在 5 毫米吸收带中，氧气的吸收系数和氧气在大气中的密度成正比。那么对于 5 毫米吸收带中的某一波长 λ ，该波长上的氧气吸收系数随高度的增加而减小，如图所示，在图 2.5.2 中列出了 8 个波长的吸收系数和高度的关系。

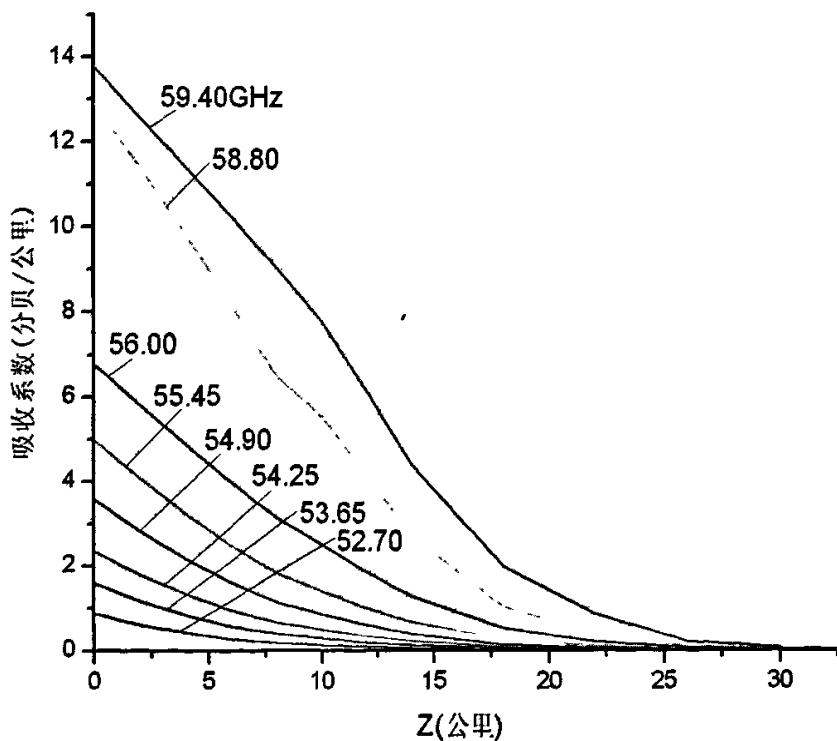


图 2.5.2 5 毫米吸收带中吸收系数和高度的关系

对于地面遥感，在大气吸收较强的信道，半峰全宽度较窄，所观测的下行辐射主要是来自于贴近地面的薄气层。因此，怎样变换权重函数的形状，使其在不同的高度

上有最大值，将对提高反演温度剖面的精度有重要影响。

图 2.5.3 表示了地基微波辐射计遥感大气温度廓线的常用的 7 通道的规一化亮温度权重函数（垂直探测， $\theta=0$ ）。

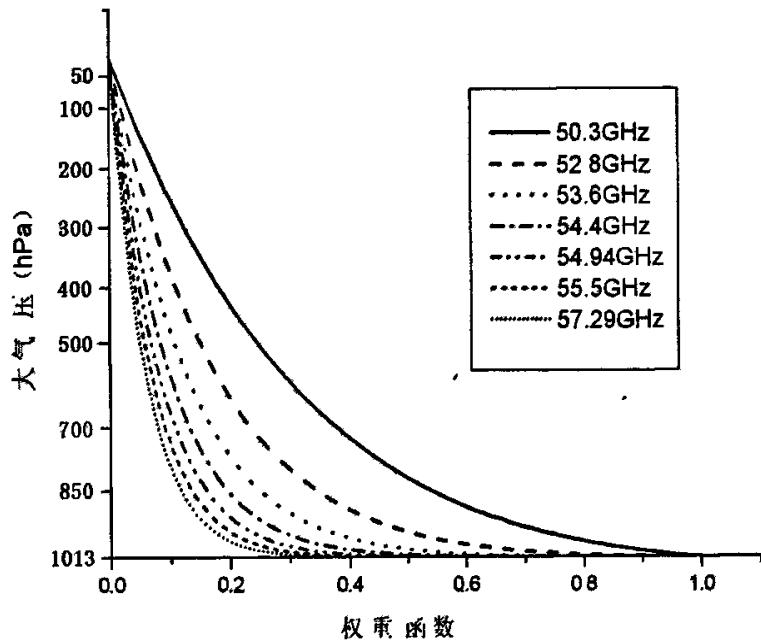


图 2.5.3 常用 7 通道的亮温度规一化权重函数

3 大气温度廓线的反演

根据辐射传输方程, 利用上行或者下行温度测量值求解大气温度的垂直分布函数 $T(Z)$, 称为大气温度遥感的求解过程, 即大气温度廓线的反演过程。由于大气的辐射传输方程为线性第一类 Fredholm 积分方程, 要解出 N 个高度上的气象要素层结值, 至少要建立 N 个方程。目前存在两种方法^[11], 一是固定天顶角, 用一个 N 通道的微波辐射计同时观测大气在 N 个不同频率处的辐射亮温值, 得到 N 个不同的测量值, 建立 N 个方程求解。这种方法称为扫频法(频谱法)。另一种方法是只用一个频率的(单通道)辐射计测量大气在 N 个不同天顶角处的辐射亮温度, 得到 N 个不同的测量值, 也可以建立 N 个方程求解。这种方法称为扫角法(扫描法)。单纯的扫频法通常取 $\theta = 0$ (天顶角), 这样便于计算, 不许考虑大气折射率及大气参数水平分部的不一致性。扫描法所用的辐射计可能价格低廉一些, 但反演计算中需考虑到的低仰角探测时地表反射和大气折射的影响, 特别是当大气不是球面分层均匀时, 反演结果难以代表大气要素的垂直分布。

3.1 目前反演方法的种类

在反演理论方面, 可分为统计反演方法和非统计反演方法^[13]。统计反演方法是根据大量历史资料, 建立亮温测值与大气参数的统计关系进行求解。典型的统计反演方法有:

- (1) 岭回归解法
- (2) 约束解法
- (3) 最小二乘法
- (4) 统计控制法
- (5) 经验正交函数展开法
- (6) 经验正交回归法

统计的反演方法方程稳定, 计算速度快, 但反演精度往往不够。非统计反演是根据辐射传输方程进行求解, 典型的非统计反演有:

- (1) 线性迭代法^[33]
- (2) Chahine 迭代^[34]
- (3) Smith 迭代^[35]
- (4) Backus-Gilbert 反演法
- (5) Susskind 等提出 T 物理反演法^[36]
- (6) Chedin 等提出了改进的初始化反演法(统计物理法)
- (7) Eyre 提出了最优估计法^[37]。

Smith 迭代和 Chahine 松弛法这两种方法忽略了大气温度场的内在联系, 从而影响了反演精度。目前业务上基本上不用这两种方法, 较常用的有 Smith^[35]的物理反演法和 Chedin 方法。曾庆存^[19]也提出一种迭代方法, 该方法可以联合反演温度和水汽廓线, 同时又指出可用最速下降法来求解温度和水汽廓线。李俊^[16]提出的迭代算法是该方法的一种变形。

近年来国内外又有一些新的反演方法^{[16] [17]}。1994 年, h.churnside^[38]首先用三层 BP 神经网络方法反演大气温度廓线。1999 年^[40], Fabio 用五层神经网络方法反演大气温度, 该神经网络结构的功能不仅担负反演逆问题本身的任务, 而且还扮演着数据的特征提取和缩小维数的作用。由于神经网络方法是一种非线性统计反演方法, 该方法对低空逆温和湿度变化有比较强的反映能力和很好的稳定性。1998 年, Pick、Trokhimovski^[39]等利用 60GHz 微波辐射计扫角反演大气边界层温度廓线, 和探空仪相比其 rms 在 1K 以内。然而, 在大气边界层, 由于辐射计能够连续给出比探空仪更多点的信息, 而反演的逆温的强度和高度跟探空仪一致。因此, 在实用方面显得更有价值。但是, 利用微波辐射计反演大气更精细的结构, 尚须进一步地研究。一般来说, 反演大气温度廓线的平均 rms 误差, 在 1-10 公里范围内, 大约在 1~3.5K 之间。利用非线性反演方法好于线性反演, 如神经网络方法。一些方法可以联合在一起, 利用更多的信息来求解温度廓线, 如自变量扩展法、迭代法联合、权重平均联合、经验正交法联合等。现在, 微波辐射计还可以与其它测量手段联合观测, 相互间提供信息, 如云高计提供云高, 被动红外高温计提供云层温度, 探空仪提供统计先验信息, 卫星遥感测量和地基遥感测量相接合, 主被动遥感相结合等。选择合适的方法, 综合利用信息, 可以进一步来优化解, 如神经网络方法和迭代法输入云的信息等都可以进一步来优化解。

3.2 牛顿非线性迭代法^[19]

假设有 K 个通道同时观测大气, 定义 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_K)^T$, 其中 y_i 为第 i 个通道的辐射量或者亮度温度。那么求解大气温度廓线等同于求解下面这个方程:

$$J(X) = \|Y^* - Y(X)\| = \text{极小值} \quad (3.2.1)$$

式(3.2.1)中的 Y^* 为辐射计观测值向量,

$$X = (T_1, T_2, \dots, T_L, \ln q_1, \ln q_2, \dots, \ln q_L, \ln o_1, \ln o_2, \dots, \ln o_L, T_s, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots) \quad (3.2.2)$$

因为方程的不适定性, 需要引入附加条件才能得到稳定的解, 所以我们引入 Lagrange 乘子, 所以

$$J(X) = \|Y^* - Y(X)\| + \gamma \|X - X^0\| \quad (3.2.3)$$

其中 X^0 是 X 的初始猜值, γ 就是 Lagrange 乘子。

接下来就是选取范数 $\|\cdot\|$, 不同的范数定义对求解的结果产生不同的影响。范数其实是一种距离, 在我们微波遥感大气中经常采用 Mahalanobis 距离, 这种距离的效果最好, 所以得到

$$\|Y^m - Y(X)\| = [Y^m - Y(X)]^T E^{-1} [Y^m - Y(X)], \quad (3.2.4)$$

$$\|X - X^0\| = (X - X^0)^T B^{-1} (X - X^0). \quad (3.2.5)$$

其中 E 是一个对角矩阵, 为观测误差协方差矩阵, 它包含了仪器噪声, 系统误差和其它误差, B 是 X^0 的误差协方差矩阵。

反演的目的就是要从式(3.2.3)中求解 X , 使 $J(X)$ 极小。我们令 $J'(X) = 0$ 即

$$0.5J'(X) = \gamma B^{-1} (X - X^0) - F^T \cdot E^{-1} \cdot [Y^m - Y(X)] = 0. \quad (3.2.6)$$

我们采用一阶泰勒展开进行线性化处理得到

$$Y(X) = Y(X^0) - F \cdot (X - X^0). \quad (3.2.7)$$

其中 F 是 Y 对 X 的一阶导数矩阵, 将式(3.2.6)代入到式(3.2.7)中得到

$$X = X^0 + (F^T \cdot E^{-1} \cdot F + \gamma B^{-1})^{-1} \cdot F^T \cdot E^{-1} \cdot [Y^m - Y(X^0)]. \quad (3.2.8)$$

由于反演问题的非线性, 用上面这个方程进行迭代不管从收敛速度或者反演精度等方面都是存在不足, 因此在这里采用牛顿非线性迭代法, 即:

$$X_{n+1} = X_n - J'(X_n)^{-1} \cdot J(X_n). \quad (3.2.9)$$

对式(3.2.6)再求导数得到:

$$0.5J''(X) = \gamma B^{-1} + F^T \cdot E^{-1} \cdot F - F^T \cdot E^{-1} \cdot [Y^m - Y(X)]. \quad (3.2.10)$$

在迭代过程中 $[Y^m - Y(X)]$ 将越来越小, 为了简化计算过程, 忽略式(3.2.10)中的最后一项的影响, 则得到

$$0.5J''(X) = \gamma B^{-1} + F^T \cdot E^{-1} \cdot F. \quad (3.2.11)$$

其中 $J''(X)$ 被称为 Hessian 矩阵, 将式(3.2.11)代入式(3.2.9)得到牛顿非线性迭代法求解形式如下:

$$\delta X_{n+1} = (F_n^T \cdot E^{-1} \cdot F_n + \gamma B^{-1})^{-1} \cdot F_n^T \cdot E^{-1} \cdot (\delta Y_n + F_n \cdot \delta X_n). \quad (3.2.12)$$

其中 $\delta X_n = X_n - X^0$;

$$\delta Y_n = Y^m - Y(X_n). \quad (3.2.14)$$

在一定条件下, X_n 会收敛于一个 X^* ; 这个就是要求的解。对于收敛性判断, 有各种标准, 例如用 $|X_{n+1} - X_n|$ 小于某一个值, 或者 $J(X)$ 小于某一个值。在实际应用中要根据具体情况而定。

3.3 反演大气温度廓线的几个问题

虽然目前对大气温度廓线的反演有多种方法, 但是在实际资料处理中仍存在许多问题:

- (1) 关于反演的不稳定性问题。由于第一类 Fredholm 积分方程的不稳定性, 必须引入一些附加条件, 常用的办法是引入初始猜想值。初始猜想值实际上是求解方程时迭代的起始点。如果初始猜想值越接近真实值, 则迭代的收敛性、收敛速度及求解精度都比较好。因此选择一个较好的初始猜想值是很重要的, 一般用统计回归的反演结果作为初始猜想值。曾庆存指出^[9], 由于温度场具有自相关性, 只需有限的几个相互独立的参数就能表示大气温度结构的变化, 对于水汽结构也是一样。因此, 可以将大气温度廓线和水汽廓线表示成它们前几个经验正交函数的线形组合, 减少要反演的参数个数, 提高反演的稳定性。
- (2) 关于非线性问题。由于辐射传输方程是一个非线性方程, 传统的方法是将辐射传输方程线性化, 然后利用“最小信息法”等方法求解线性化后的方程, 实际上这使用求解线性化问题的方法来处理非线性问题。曾庆存^[9]提出用“最速下降法”反演大气温度廓线, 这对处理非线性问题是有效的, 特别是对求解辐射传输方程式有效的。
- (3) 权重函数的计算。无论用线性还是非线性方法进行反演, 权重函数的计算都是关键的一步。曾庆存^[9]利用一阶变分原理得到了 P 坐标下利用吸收系数表示的水汽权重函数的解析形式, 李俊^{[16][17]}利用同样的方法得到了气压坐标 P 下用大气透过率 T 表示的温度权重函数的解析形式, 解决了大气辐射传输方程的线性化问题。

4 遥感大气廓线的毫米波辐射计

4.1 毫米波辐射计

4.1.1 物质微波热辐射原理

根据量子论^[5]，物体内的电子产生能级跃迁，随着能级的跃迁，物体或吸收、或辐射电磁能，产生电磁辐射或吸收。处于绝对零度以上的任何物体在所有的频率上均辐射电磁能。其辐射的大小与物体的温度和性质有关，这就是普朗克定律的基本内容。

量子理论也迅速扩展到其他领域，由于热的存在使电阻内的电子进行无规则的热运动，使电子和分子碰撞，从而在电阻两端产生热噪声电压。1928年Johnson检测出电阻中由于电子热运动产生的热噪声电压为：

$$\bar{v}^2 = 4kT\Delta f \quad (4.1.1)$$

同时Nyquist根据热力学统计理论证明了在电阻中产生的热噪声电压的均方值与Johnson所测值相同。这与普朗克黑体辐射定律之间存在等价关系，这种等价关系为用黑体对微波辐射计进行整体定标提供了理论依据。

普朗克定律反映了黑体辐射的一般规律。如果有一个物体，它在任何温度下都能吸收任何频率的全部入射辐射而无任何反射，则此物体称为绝对黑体。黑体的吸收率为1，反射率为0。它是一种理想的完全吸收体。黑体在吸收外界辐射的过程中，由于要使温度保持不变，就必须要向外辐射同样的能量，因此，黑体也是一个完全的发射体。

普朗克根据他的量子假设，推导出黑体辐射的出射率的表达式，它是热辐射理论中最基本的定律。它表明，黑体在所有方向上均匀辐射电磁能量，黑体的谱亮度B_f为：

$$B_f = \frac{2hf^2}{c^2} \left(\frac{1}{e^{hf/kT} - 1} \right) \quad (4.1.2)$$

式中 h: 普朗克常数 = 6.63×10^{-34} (焦耳·秒);

c: 光速 = 3×10^8 (米/秒);

f: 频率 (赫);

k: 波尔兹曼常数 = 1.38×10^{-23} (焦耳/开);

T: 温度 (开)。

普朗克黑体辐射公式表明，黑体的谱亮度是温度和频率的函数，而与辐射的方向无关。

在较低频率下，用瑞利-琼斯公式可以很好的近似普朗克辐射定律的公式，在数学上它比普朗克定律简单，表达式如下：

$$B_f \approx \frac{2f^2kT}{c^2} = \frac{2kT}{\lambda^2} \quad (4.1.3)$$

λ : 波长 (米), 这就是瑞利-琼斯公式。

按照瑞利-琼斯近似, 在带宽为 Δf , 实际温度为 T 时黑体的亮度定义为:

$$B_b = B_f \Delta f = \frac{2kT}{\lambda^2} \Delta f. \quad (4.1.4)$$

将一个无损微波天线放在温度为 T 的黑体闭室中, 天线所接收到的黑体闭室的辐射温度为:

$$P_b = \frac{1}{2} A_e \int_{\lambda}^{\lambda + \Delta f} \int_{4\pi} L(\theta, \phi) F_n(\theta, \phi) d\Omega df. \quad (4.1.5)$$

式中 A_e : 天线有效面积 (米²);

$F_n(\theta, \phi)$: 天线归一化辐射方向图;

$L(\theta, \phi)$: 黑体亮度, 黑体亮度是指单位频率, 单位立方角上的功率。其表达式

$$为 L(\theta, \phi) = \frac{2kT}{\lambda^2}.$$

若天线终端检测功率只限制在一窄带 Δf 内, $\Delta f \ll f^2$, 这是通常的情况, 则 B_f 在 Δf 上近似于常数, 则式 (4.1.5) 可以简化为:

$$P_b = kT \Delta f \frac{A_e}{\lambda^2} \int_{4\pi} F_n(\theta, \phi) d\Omega. \quad (4.1.6)$$

由于对天线方向图的积分与天线的有效面积 A_e 有关, 就是:

$$\int_{4\pi} F_n(\theta, \phi) d\Omega = \Omega_p = \frac{\lambda^2}{A_e}. \quad (4.1.7)$$

所以 (4.1.6) 可以进一步简化为:

$$P_b = kT \Delta f. \quad (4.1.8)$$

这表明, 温度和辐射温度之间有直接的线性关系, 它与 Nyquist 证明的温度为 T 的电阻两端的有用噪声功率是同一结果。表明从带宽为 Δf 的理想接收机的观点出发, 连接到接收机输入端的天线等效为一个电阻, 该电阻称为天线辐射电阻。这为微波辐射计定标提供了理论依据。

4.1.2 毫米波辐射计的工作原理

毫米波辐射计是一种被动式的接收机, 它本身不发射信号, 而是接收由天线收集起来的辐射能量。这些辐射能量来自场景自身的辐射以及其对其他辐射源辐射能量的反射。与传统的接收机不同的是, 辐射计的待测信号通常比接收机的噪声功率小得多, 这就要求辐射计必须具备较高的灵敏度。但是接收机噪声波动和增益起伏的存在会影

响辐射计的灵敏度。因此自从毫米波辐射计问世以来，人们就致力于研究提高系统灵敏度和长期稳定性的方法。辐射计系统的噪声不确定性和增益不稳定性决定了毫米波辐射计的最小可检测信号，而增益的不稳定性起主要作用，因此，在辐射计的研究中一个很重要的方面就是用什么样的理论和技术来减少或消除系统增益的波动及其带来的影响。辐射计从出现到现在获得了很大的发展，先后研制成功了全功率辐射计、迪克型辐射计、负反馈零平衡迪克型辐射计、噪声相加型辐射计、相关辐射计等多种类型的辐射计^[20]。

全功率型辐射计是结构最简单的辐射计，原理框图如图 4.1.1。

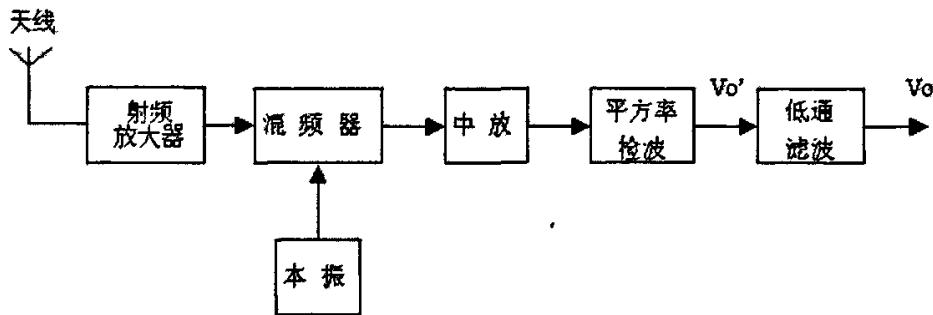


图 4.1.1 全功率型辐射计的原理框图

平方律检波器的检波输出电压与输入信号电压振幅的平方成正比，因此，在全功率辐射计中，输出电压 V_o' 与输入天线温度 T_A 成线性关系。因为输入的天线温度是随机噪声信号，辐射计内部又存在各种噪声，所以平方率检波器的输出电压 V_o' 包含直流分量和交流分量。统计分析表明， V_o' 的标准差和均值之比为 1，因此很难从 V_o' 中得出天线温度的正确估值。解决这个问题的方法是在平方率检波后加入低通滤波器，滤除 V_o' 中的高频起伏分量，使其标准差与均值之比降低为 $1/\sqrt{\beta\tau}$ 。其中， β 为高频前端等效噪声带宽， τ 为低通滤波器的积分时间。

设辐射计输出端电压为 V_o ，系统增益为 G_s ，系统等效噪声温度为 T_{sys} 。则有：

$$V_o = G_s T_{sys} = G_s (T_A + T_{REC}) \quad (4.1.9)$$

其中 $G_s = \kappa\beta\gamma GG_p$ ， $T_{sys} = T_A + T_{REC}$ ；

式中： κ ： 波尔兹曼常数， $\kappa = 1.38 \times 10^{-23}$ (焦耳/开)；

β： 高频前端等效噪声带宽；

γ： 平方律检波器的功率灵敏度常数(伏/瓦)；

G ： 检波前功率增益；

G_p ： 低通滤波器电压增益；

T_A ： 天线输出端的噪声温度；

T_{REC} ： 接收机等效噪声温度。

由于输出电压 V_o 中包含随机误差, 且随机误差的绝对值和方向以不可预见的方式变化着, 必然会造成检测 T_A 的不确定性。定义辐射计能检测到的天线温度最小变化量为辐射计的灵敏度或温度分辨率 ΔT_{mn} , 它表征了辐射计检测物体最小温差的能力, 检测的温差愈小, 说明辐射计测量的温度分辨力愈高。

一般说来, 毫米波辐射计系统的随机误差由辐射计系统的噪声波动和接收机增益的快速变化组成的, 相应地, 辐射计的温度分辨率由两部分组成: 由系统噪声波动引起的温度不确定性和由系统增益起伏引起的温度不确定性。由系统噪声波动引起的温度不确定度 ΔT_N 为:

$$\Delta T_N = \frac{T_{sys}}{\sqrt{\beta\tau}} = \frac{T_A + T_{REC}}{\sqrt{\beta\tau}}。 \quad (4.1.10)$$

由系统增益起伏引起的温度不确定度 ΔT_G 为:

$$\Delta T_G = T_{sys} \frac{\Delta G_s}{G_s}。 \quad (4.1.11)$$

式(4.1.11)中 ΔG_s 是系统增益波动量。由于噪声波动和增益起伏是由互不相关的机制造成的, 因而其统计特性是无关的。因此, 全功率辐射计的灵敏度为:

$$\Delta T_{mn} = \sqrt{(\Delta T_N)^2 + (\Delta T_G)^2}。 \quad (4.1.12)$$

把式(4.1.10)和式(4.1.11)代入式(4.1.12), 经化简得到:

$$\Delta T_{mn} = (T_A + T_{REC}) \sqrt{\frac{1}{\beta\tau} + \left(\frac{\Delta G_s}{G_s}\right)^2}。 \quad (4.1.13)$$

由于全功率辐射计接收机在高增益情况下不易保证增益的稳定性, 因此不能达到理论上的灵敏度。这意味着全功率辐射计与理想系统相比, 灵敏度下降了许多。因此, 在接收机的增益起伏未得到显著改善的条件下, 一般形式的全功率辐射计的灵敏度很难提高。为了能够提高辐射计灵敏度, 人们先后设计了迪克型辐射计、负反馈零平衡迪克型辐射计、噪声相加型辐射计、相关辐射计等多种类型的辐射计。

4.1.3 毫米波辐射计的定标

毫米波辐射计定标就是建立辐射计的输出指示与输入天线温度之间的定量关系的过程, 是实现毫米波遥感定量测量的前提。它直接影响毫米波辐射计的测量精度, 是辐射计应用中的关键技术之一。

毫米波辐射计的定标主要采用两种方法^[20]。第一种方法是接收机与天线分别定标的方法, 接收机定标旨在确定接收机的输出指示与接收机输入端噪声温度之间的关系, 天线定标旨在建立辐射计天线输入噪声温度与天线输出噪声温度之间的关系。第

二种方法是整体定标法，就是把接收机和天线看作一个整体进行定标，将天线对准已知亮温的辐射源，通过改变辐射源的辐射量得到不同的输出指示，从而确定输出指示和输入天线温度之间的定量关系达到定标的目的。由于分别定标方法需要测量天线的辐射效率才能将天线温度和输出指示联系起来，操作起来十分繁琐，而采用整体定标方法比较精确，重复性好，操作简单，所以一般都倾向于采用整体定标方法。

为了建立精确已知的天线温度，可以把底部贴有毫米波吸收材料的铝盒子置于天线口面处作为定标辐射源。当铝盒子中不放入任何制冷剂时，吸收材料的温度等于环境温度，此时读取辐射计的输出指示，可以得到一个常温定标点；当在铝盒子中放入液氮使吸收材料全部浸泡在其中时，读取辐射计的输出指示，便得到一个低温定标点。由于一般的辐射计具有良好的线性度，因此可以通过两点法对辐射计进行整体定标。定标示意图如图 4.1.2 所示。

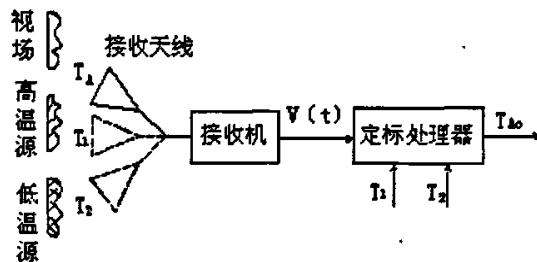


图 4.1.2 辐射计定标示意图

常温定标源的温度可以通过电子温度计直接测量得到。在确定低温定标源的温度时，考虑到液氮沸点的绝对温度随气压的变化而变化，需要进行修正，修正公式为：

$$T_A = 77.36 - 0.011(760 - P) \quad (4.1.14)$$

式中 T_A 为修正后的天线温度， P 为大气压强，以毫米汞柱为单位。

4.2 毫米波辐射计的系统设计

4.2.1 毫米波辐射计的通道选择

通道选择，就是要选择一组最佳的辐射计工作频率或者观测角度，根据辐射传输方程组求解大气温度廓线，以便得到误差最小、最稳定的解。通道选择，除了要考虑辐射计的制造技术水平和造价以外，要认真选择辐射计中心频率^[23]：

①尽可能在该频率处大气吸收系数主要由一种气体决定。对于大气温度遥感，这种气体在大气中的含量要丰富且稳定，这就是在微波波段常选用 5 毫米氧气吸收带内频率的原因。

②辐射计中心频率有时要避开吸收线中心频率。根据吸收线型，在吸收线中心频率处吸收最强，稍偏离此中心，则吸收强度迅速下降。吸收强度随频率的灵敏变化，

不仅提高了对辐射计本振频率稳定度的要求,而且在辐射传输方程正演计算时要考虑吸收系数在辐射计通带内随频率的变化,使计算复杂。

设有维数为 K 的 M 个向量 \vec{T}_{Bi} , $i=1, 2, \dots, M$, 构成向量系^[11], 用矩阵 $\vec{T}_B(T_{BKM})_{K \times M}$ 表示, 则乘积为:

$$G = \vec{T}_B^T \vec{T}_B \quad (4.2.1)$$

的矩阵行列式称为原向量系 \vec{T}_{Bi} 的 Gram 行列式, 记为 $G[\vec{T}_{B1}, \dots, \vec{T}_{BM}]$ 。显然, 其性质有:

(1) 若向量系中仅有一个向量, 则:

$$G[\vec{T}_{B1}] = \vec{T}_{B1}^T \vec{T}_{B1} = \left\| \vec{T}_{B1} \right\|^2 \quad (4.2.2)$$

(2) 若 \vec{T}_{Bi} 与 \vec{T}_{Bj} 正交, 则:

$$G[\vec{T}_{B1}, \vec{T}_{Bj}] = G[\vec{T}_{B1}] G[\vec{T}_{Bj}] = \left\| \vec{T}_{B1} \right\|^2 \left\| \vec{T}_{Bj} \right\|^2 \quad (4.2.3)$$

(3) 若原向量系中向量两两正交, 则:

$$G[\vec{T}_{B1}, \dots, \vec{T}_{BM}] = \prod_{i=1}^M G[\vec{T}_{Bi}] = \prod_{i=1}^M \left\| \vec{T}_{Bi} \right\|^2 \quad (4.2.4)$$

为了用 Gram 行列式的值来衡量向量系的相关程度, 先对向量进行标准化, 以最大 $\left\| \vec{T}_{Bi} \right\|$ 除以各向量, 使向量系的最大长度为 1, Gram 行列式的值恒在 0 与 1 之间。标准化后的向量系数 $\vec{T}_{B1}, \dots, \vec{T}_{BM}$ 为 ε 线性相关, ε 是一个正小数。作为相关性指标, 其值愈小, 向量系的相关性程序愈强。

对一组线性独立向量系 $\vec{T}_{B1}, \dots, \vec{T}_{Br}$ (用矩阵 \vec{T}_{Br} 表示), 设 $\sum_{i=1}^r \alpha_i \vec{T}_{Bi}$ 为向量 \vec{T}_{Br+1} 在 $\vec{T}_{B1}, \dots, \vec{T}_{Br}$ 所张的线性子空间中的最佳逼近向量, 误差向量为:

$$\vec{e} = \vec{T}_{Br+1} - \sum_{i=1}^r \alpha_i \vec{T}_{Bi} = \vec{T}_{Br+1} - \vec{T}_{Br} \vec{\alpha} \quad (4.2.5)$$

所谓最佳, 就是使 $\left\| \vec{e} \right\|$ 极小。

由于

$$\left\| \vec{e} \right\|^2 = \vec{e}^T \vec{e} = \vec{T}_{Br+1}^T \vec{T}_{Br+1} - \vec{\alpha}^T \vec{T}_{Br}^T \vec{T}_{Br+1} - \vec{T}_{Br+1}^T \vec{T}_{Br} \vec{\alpha} + \vec{\alpha}^T \vec{T}_{Br}^T \vec{T}_{Br} \vec{\alpha} \quad (4.2.6)$$

令 $\frac{\partial}{\partial \vec{\alpha}} \|\vec{e}\|^2 = 0$ 得

$$\vec{\alpha} = (T_{Br}^T T_{Br})^{-1} T_{Br}^T \vec{T}_{Br+1} \quad (4.2.7)$$

把 $\vec{\alpha}$ 代入式(4.2.5)和式(4.2.6)，得最佳逼近值：

$$\vec{e} = (I - T_{Br} (T_{Br}^T T_{Br})^{-1} T_{Br}^T) \vec{T}_{Br+1} \quad (4.2.8)$$

$$\|\vec{e}\|^2 = \vec{e}^T \vec{e} = \vec{T}_{Br+1}^T (I - T_{Br} (T_{Br}^T T_{Br})^{-1} T_{Br}^T)^2 \vec{T}_{Br+1} \quad (4.2.9)$$

显然由 $\vec{e}^T T_{Br} = 0$ ，即误差向量 \vec{e} 与所给线性独立向量系 $\vec{T}_{B1}, \dots, \vec{T}_{Br}$ 各向量正交。

又因为：

$$\|\vec{e}\|^2 = \frac{G(\vec{T}_{B1}, \dots, \vec{T}_{Br+1})}{G(\vec{T}_{B1}, \dots, \vec{T}_{Br})} \quad (4.2.10)$$

如果 $\|\vec{e}\|^2 \leq \varepsilon$ ，则因 $G(\vec{T}_{B1}, \dots, \vec{T}_{Br}) \leq 1$ ，得 $G(\vec{T}_{B1}, \dots, \vec{T}_{Br+1}) \leq \varepsilon$ ，表示向量系 $\vec{T}_{B1}, \dots, \vec{T}_{Br+1}$ 为 ε 线性相关。所以 $\|\vec{e}\|^2$ 是 \vec{T}_{Br+1} 关于正交向量系 $\vec{T}_{B1}, \dots, \vec{T}_{Br}$ 的相对相关性指标。实际计算中，考虑到向量系 $\vec{T}_{B1}, \dots, \vec{T}_{Br}$ 的正交性，式(4.2.7)可以写成：

$$\alpha_i = \frac{\vec{T}_{Bi}^T \vec{T}_{Br+1}}{\|\vec{T}_{Bi}\|^2} \quad i=1, 2, \dots, r \quad (4.2.11)$$

如果现在有 M 个通道的辐射亮温度，样本容量为 K ，则这些资料构成含 M 个 K 维向量的向量系 $\vec{T}_{B1}, \dots, \vec{T}_{BM}$ ，先以 $\max_i \|\vec{T}_{Bi}\|$ 去除各向量，并记为 \vec{T}_{Bi} 。然后对这 M 个向量经正交处理产生 $L (< M)$ 个线性独立向量作为正交基 \vec{T}_{Bj}' ， $j=1, 2, \dots, L$ ，如果对 T_B 的 M 个向量中的任意一个向量 \vec{T}_{Bi} ，有：

$$\left\| \vec{T}_{Bi} - \sum_{j=1}^L \alpha_j \vec{T}_{Bj}' \right\|^2 \leq \varepsilon \quad (4.2.12)$$

则表明 \vec{T}_{Bi} 与这 L 个正交基 ε 线性相关。这些通道的亮温值可以在允许误差的范围内由组成正交基的 L 个通道的亮温值得出，即 M 个通道中至多有 L 个独立信息。

在通道的实际选择过程中，只需要利用最佳逼近值指标确定向量的取舍，不必计算标准化的 Gram 行列式，所以不需要用 $\max_i \|\vec{T}_{Bi}\|$ 去除各个向量。

具体的计算步骤如下：

(1) 确定第一个正交基 \vec{T}_{B1} ，一般挑选在待求高度上核函数有峰值、信息量大的通道的温度向量作为第一正交基。

(2) 对其余的各向量进行正交化。由式(4.2.7)和式(4.2.8)得到

$$\vec{T}_{Bi}^{(1)} = \vec{T}_{Bi} - \vec{T}_{B1} \alpha_{1i} \quad (4.2.13)$$

或

$$\vec{T}_{Bi}^{(1)} = \vec{T}_{Bi} - \frac{\vec{T}_{Bi} \vec{T}_{B1}^T \vec{T}_{B1}}{\|\vec{T}_{B1}\|^2} \quad i=2,3,\dots,M \quad (4.2.14)$$

其中公式中小括号中表示已经产生的正交基个数。经过正交化后的向量系 $\vec{T}_{Bi}^{(1)}$, $i=2,3,\dots,M$ 都与正交基 \vec{T}_{B1} 正交。

(3) 挑选下一个正交基。由于 $\|\vec{T}_{Bi}^{(1)}\|^2$, $i=2,3,\dots,M$ 表现了正交化之前向量与现有正交基的相对相关性指标, 若其中第 i 个向量的相对相关性指标满足 $\|\vec{T}_{Bi}^{(1)}\|^2 \leq \varepsilon_i$, 则该向量与已有的正交基之间是 ε_i 线性相关的, 可以舍去这一个向量。

(4) 设已经选出第 L 个正交基 $\vec{T}_{B1}^{(L-1)}$, 一共得到 L 个正交基, 分别为 $\vec{T}_{B1}, \vec{T}_{B2}^{(1)}, \vec{T}_{B3}^{(2)}, \dots, \vec{T}_{BL}^{(L-1)}$ 构成正交矩阵 T_{Br} , 对原向量系中其余的各向量 \vec{T}_{Bi} , $i=L+1, \dots, M$, 进行正交化

(5) 比较 $\|\vec{T}_{Bi}^{(L)}\|^2$, $i=L+1, \dots, M$, 舍弃 $\|\vec{T}_{Bi}^{(L)}\|^2 \leq \varepsilon_i$ 的向量, 选取最大 $\|\vec{T}_{Bi}^{(L)}\|^2 > \varepsilon_i$ 对应的正交化向量, 设此向量为 $\vec{T}_{Bi+1}^{(L)}$, 作为第 $L+1$ 个正交基。

(6) 重复步骤 4 和 5, 直到再无正交基可选为止。

此时, 已确定的一组正交基所对应的原向量系中的向量序号即为所选择的一组通道, 它们是供挑选的 M 个通道中一组最佳的通道。供挑选的通道数量 M , 可以根据微波辐射计的带宽确定频率通道个数, 根据天线波束宽度确定角度通道个数, 也可以根据核函数特性做出大致判断, 以提高通道选择的实际意义。

1972 年 Howler 利用 54.5GHz 测量晴空时近地面层逆温和不稳定层结温度廓线, 反演精度在 5km 高度以下平均为 1K。1978 年我国北京大学的赵柏林^[23] [24] 在工作刚开展时选用 52.8~52.9GHz 测得对流层温度廓线。因为多频率通道垂直探测辐射计具

有便于自动控制、无机械运动等优点,发展较快。Miner 等(1972)利用三通道(51.53GHz、52.92GHz、54.03GHz)和五通道(51.382GHz、51.986GHz、52.963GHz、54.041GHz、59.629GHz)波谱仪测量 10km 以下大气温度,各高度上误差均方在 2~5K 之间。

以上列举的各种各样的微波辐射计都是地基微波辐射计,在本课题中主要研究的也是地基微波辐射计。一般情况下地基微波辐射计使用 50~60 GHz 之间的频段作为探测频道,其中利用 50 GHz 附近的频段探测高层大气,而利用 60GHz 附近的频段探测低层大气^[25]。例如用 54.0GHz, 54.5GHz 或 55.0GHz 只能以较高的反演精度(平均为 1.17K)测到 5km 左右以下大气温度,而用 52.5GHz 可以探测到 10km 高度,但反演精度平均值下降到 1.27K。选用 54GHz 以上的频段云几乎没有影响。频率越高,对高空的温度反应能力就越差,对低空的温度反应能力就越强。例如, 53GHz 以下的频段,对 10km 高空以下的温度都有一定的反应能力; 60GHz 频段,只对 1000m 低空以下的温度具有反应能力。反演表明, 53GHz 以下的频段,对 10km 高空以下的温度反演精度大约在 2~3K;然而 60GHz 的频段,对低空大气边界层的温度反演精度,据国外报道^[26]甚至可达到 0.5K。综合考虑探测结果的反演精度和微波辐射计的成本,地基微波辐射计一般采用扫频和扫角相结合的观测方式。

表 4.2.1 50~60GHz 频段内可作为探测通道的频率

通道号	频率 (GHz)	临近通道频率差 (GHz)	本课题中采用的通道号
1	59.9	0.5	
2	59.4		
3	58.8	0.85	是
4	57.95		
5	57.3	0.6	
6	56.7		
7	56.05	0.6	
8	55.45		是
9	55	0.6	
10	54.4		
11	53.85	1	是
12	52.85		

根据前面 R_1 模式的氧气分子吸收系数谱线结构，在 50~60GHz 频段内可以作为微波辐射计探测通道的频率如表 4.2.1 所示。由于通道之间的相关，单纯增加通道个数(增加频率通道或增加观测角度)，并不能使反演精度成比例地提高。因此，对众多的可使用通道进行挑选，不仅对辐射计的设计具有指导意义，且对反演计算也有实际意义。

结合上面所述的通道选择方法，在课题中最终选取了其中的四个频率 (52.85GHz、53.85GHz、55.45GHz 和 58.80GHz) 作为微波辐射计的探测通道，用来观测反演 10km 以内的大气温度廓线。

电子技术水平的发展，辐射计频率稳定度提高，通道带宽减小，测量精度提高，频率通道数增加很快，所提供的独立信息增加了，相关的通道也随之增加。人们利用通道的相关性，在辐射测量资料预处理中检验数据的可靠性。因此，提高辐射计的性能、增加探测通道仍是必要的。

4.2.2 毫米波辐射计的带宽选择

辐射计的用途在很大程度上决定了辐射计的带宽，一般用于探测大气参数的微波辐射计应该具有很窄的频带，这样它接近于被测大气成分的谐振谱线。从表 4.2.1 列出了 50~60GHz 频段内可以作为微波辐射计探测通道的频率之间带宽，那么在选择毫米波辐射计的带宽时，就必须考虑两个通道之间的影响。

从上面讨论的辐射计灵敏度的定义，从式(4.1.13)可以得到全功率辐射计的灵敏度和高频前端等效噪声带宽 B 有关系。增加 B 可以提高辐射计的灵敏度，但是会使频谱灵敏度降低，这个对于测量吸收谱线参数的辐射计是不合适的。另外增加带宽会使得高频前端的噪声温度增加而受到影响。

大气的微波辐射信号是非常弱的，所以要求从技术上保证大气微波辐射计具有足够的灵敏度。要想提高微波辐射计的灵敏度，就要尽量选用低噪声的部件，使得微波辐射计的整机噪声温度尽可能低，同时增大接收机的带宽，也可以增加积分器的积分时间。

4.2.3 天线带宽与性能对辐射计设计的影响

在微波辐射计系统中，通常由天线接收来自天线主瓣方向和所有旁瓣方向的微波噪声，微波噪声进入辐射计接收机后经过信号变换和放大，得到与接收辐射信号强度相对应的输出指示。

天线接收来自主瓣的微波噪声，把旁瓣方向引入的噪声当作干扰的信号。因此可

可以把天线温度表示为^[5]:

$$T_A = \frac{\iint_{\Omega} T_{AP}(\theta, \phi) F_n(\theta, \phi) d\Omega}{\iint_{4\pi} F_n(\theta, \phi) d\Omega} + \frac{\iint_{\Omega} T_{AP}(\theta, \phi) F_n(\theta, \phi) d\Omega}{\iint_{4\pi} F_n(\theta, \phi) d\Omega} \quad (4.2.15)$$

式中, $T_{AP}(\theta, \phi)$ 为视在温度分布, K;

$F_n(\theta, \phi)$ 为天线归一化方向图。

定义主瓣贡献的平均视在温度 \bar{T}_{ML} :

$$\bar{T}_{ML} = \frac{\iint_{\Omega} T_{AP}(\theta, \phi) F_n(\theta, \phi) d\Omega}{\iint_{\Omega} F_n(\theta, \phi) d\Omega}, \quad (4.2.16)$$

旁瓣贡献的平均视在温度 \bar{T}_{SL} :

$$\bar{T}_{SL} = \frac{\iint_{4\pi - \Omega} T_{AP}(\theta, \phi) F_n(\theta, \phi) d\Omega}{\iint_{4\pi - \Omega} F_n(\theta, \phi) d\Omega}. \quad (4.2.17)$$

定义天线的主波束效率 η_M :

$$\eta_M = \frac{\iint_{\Omega} F_n(\theta, \phi) d\Omega}{\iint_{4\pi} F_n(\theta, \phi) d\Omega}, \quad (4.2.18)$$

则天线杂散因子为:

$$\eta_m = \frac{\iint_{4\pi - \Omega} F_n(\theta, \phi) d\Omega}{\iint_{4\pi} F_n(\theta, \phi) d\Omega} = 1 - \eta_M. \quad (4.2.19)$$

利用上面式子, 式(4.2.15)可以表示为:

$$T_A = \eta_M \bar{T}_{ML} + (1 - \eta_M) \bar{T}_{SL}. \quad (4.2.20)$$

由上式可知, 主瓣效率越大, 由旁瓣引入的测量误差也越小。为了减小测量误差, 应该尽量增大主波瓣宽度、抑制旁瓣、增加天线增益来提高天线主瓣效率。

实际的天线是有耗器件, 它接收的功率中一小部分以热损耗的形式被天线的结构材料吸收, 大部分馈入接收机。既然天线是一种有耗器件, 就会发出热辐射。当天线的热力学温度为 T_0 时, 天线发出的热噪声功率可以用相应的噪声温度 T_N 表示, 即有

$$T_N = (1 - \eta_i)T_0. \quad (4.2.21)$$

公式中的 η_i 是天线的辐射效率。因此天线的输出功率包括两个部分：一是入射功率被衰减后余下的部分，另一部分是有耗天线本身热辐射提供的附加热噪声功率，得到有耗天线的天线温度

$$T_A' = \eta_i T_A + (1 - \eta_i)T_0. \quad (4.2.22)$$

将式(4.2.20)代入上式，

$$T_A' = \eta_M \eta_i \bar{T}_{ML} + \eta_i (1 - \eta_M) \bar{T}_{SL} + (1 - \eta_i)T_0. \quad (4.2.23)$$

通过定标，辐射计的输出指示 V_0 和 T_A' 的关系式即可以确定，因而从测量得到的 V_0 可以求出对应的 T_A' 。主瓣贡献的有效视在温度 \bar{T}_{ML} 包含被测目标的微波辐射特征信息，在得到 T_A' 后可以求出来。

$$\bar{T}_{ML} = \frac{1}{\eta_M \eta_i} T_A' - \frac{1 - \eta_M}{\eta_M} \bar{T}_{SL} - \frac{1 - \eta_i}{\eta_M \eta_i} T_0. \quad (4.2.24)$$

在式(4.2.24)中除 T_0 可以精确测量外， η_i 和 η_M 的测量精度与测量方法有关， \bar{T}_{SL} 也是难于精确计算的参数。因此从式(4.2.24)得到的 \bar{T}_{ML} 只能认为视它的估值。为了得到更为接近实际的估值 \bar{T}_{ML} ，应该尽可能提高天线参数测量精度，取得比较精确的 η_i 和 η_M 。旁瓣的贡献主要来自主波束范围之外的所有背景的辐射，在许多情况下，背景很复杂，难以确定旁瓣区的视在温度分布。从式(4.2.24)可以看出 \bar{T}_{SL} 的估值误差对 \bar{T}_{ML} 的影响表现在公式的第二项，同样的估值误差 $\Delta \bar{T}_{SL}$ 引起 \bar{T}_{ML} 的估算误差 $\Delta \bar{T}_{ML}$ 与 η_M 有关， η_M 越大， \bar{T}_{SL} 估值误差对 \bar{T}_{ML} 的估值的影响越小。所以，用于大气遥感的微波辐射计天线应该具有尽可能高的主波束效率。

4.2.3.1 天线的多通道共用问题

在本课题中要求天线具有多频、双线极化、高主波束频率和快速扫描的能力。因此采用一种偏置抛物面扫描天线^[17]，并且利用一个具有正交模耦合器^[41]的波纹圆锥喇叭作为馈源，如图 4.2.1 所示。

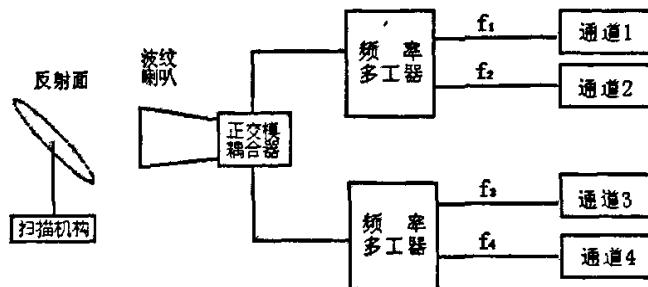


图 4.2.1 多频共用天线系统框图

从图 4.2.1 中可以看出, 天线接收到的微波辐射信号都由正交模变换器按极化方式分开, 分别进入水平和垂直极化通道, 然后信号进入接收机。

4.2.3.2 5mm 频段辐射计天线的性能指标

由于 5mm 频段微波辐射计的天线工作在大气、湿气、云层等气象条件敏感的频率上, 所以天线的主波束效率要求高达 95%~97%, 天线主要的技术要求如表 4.2.2 所示。

表 4.2.2 5mm 频段辐射计天线主要的技术要求

工作频率 (GHz)	52.85	53.85	55.45	58.80
半功率瓣宽 (.)	6 ± 0.5	6 ± 0.5	6 ± 0.5	6 ± 0.5
主波束效率	$\geq 95\%$	$\geq 95\%$	$\geq 95\%$	$\geq 95\%$
波束指向精度	$\pm 0.6^\circ$	$\pm 0.6^\circ$	$\pm 0.6^\circ$	$\pm 0.6^\circ$
交叉极化含量	$\leq 2\%$	$\leq 2\%$	$\leq 2\%$	$\leq 2\%$
驻波比	≤ 1.2	≤ 1.2	≤ 1.2	≤ 1.2

5mm 频段辐射计天线的测量结果如表 4.2.3 所示。

表 4.2.3 五毫米微波辐射计天线主要性能参数实测结果

频率 (GHz)	极化	测量面	主波束效率 (%)	3dB 瓣宽 (°)	交叉极化分量
52.85	水平	俯仰	96.4	6.0	1.13
	水平	方位		6.0	
	垂直	俯仰		6.0	
	垂直	方位		6.0	

53.85	水平	俯仰	95.7	6.0	1.13
	水平	方位		6.0	
	垂直	俯仰		6.0	
	垂直	方位		6.0	
55.45	水平	俯仰	96.8	6.0	1.12
	水平	方位		6.0	
	垂直	俯仰		6.0	
	垂直	方位		6.0	
58.80	水平	俯仰	95.9	6.0	1.09
	水平	方位		6.0	
	垂直	俯仰		6.0	
	垂直	方位		6.0	

4.3 接收机系统

4.3.1 总体方案设计

接收机系统将馈元接收的信号进行放大并交由数据采集系统进行采集。接收机系统包括高频电路、中频电路、检波对数放大电路及电平转换电路等^[21]。

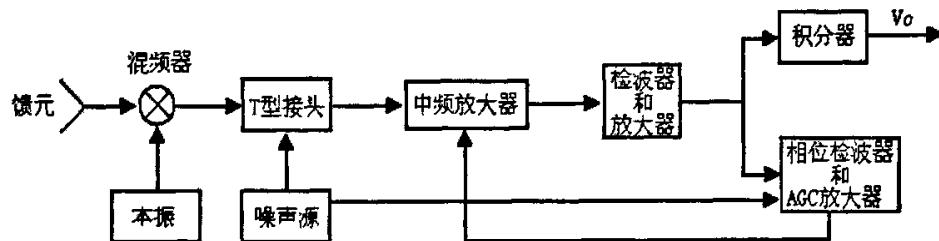


图 4.3.1 接收机系统整体方案

在 5 毫米微波辐射计中，我们采用全功率型接收机，如图 4.3.1 所示。和通常的全功率接收机相比较，可以发现图 4.3.1 所示的接收机增加了一个辅助通道，这个辅助通道包括噪声源、T 型接头、相位检波器和 AGC 放大器。这个辅助通道用来自动控制接收机的增益。

4.3.2 接收机各部分设计

4.3.2.1 高频电路

高频电路部分主要由喇叭天线、本振、混频器、T 型接头和噪声源组成，完成射频信号到第一中频的变换。其输出中频信号 $f_I=495MHz$ ，输出功率电平最大值 $P_{II,max}=-10dBm$ 。

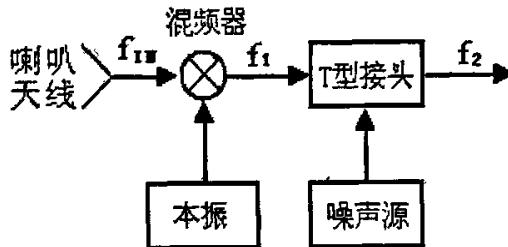


图 4.3.2 高频电路设计

本课题中采用的四频毫米波辐射计具有四个独立的通道，分别采用不同的波段。四个频率分别为 52.85GHz、53.85GHz、55.45GHz 和 58.80GHz。主要工作参数为：

(1) 辐射计中心工作频率： $f_{IN1} = 52.85 \text{ GHz}$ 、 $f_{IN2} = 53.85 \text{ GHz}$ 、

$f_{IN3} = 55.45 \text{ GHz}$ 、 $f_{IN4} = 58.80 \text{ GHz}$

(2) 辐射计中频带宽为： $B_{w1} = B_{w2} = B_{w3} = B_{w4} = 135 \text{ MHz}$

4.3.2.2 中频电路设计

中频电路主要完成以下功能：

(1) 进行频率选择，选取 $5 \text{ MHz} \sim 135 \text{ MHz}$ 的信号进行放大；

(2) 对中频信号进行平方率检波；

该部分主要由中频低噪声放大器、平方率检波器和放大器组成。输入信号功率 $P_{max} = -10 \text{ dBm}$ ，输出中频 $f = 10.7 \text{ MHz}$ ，输出功率最大值 $P_{max} = -21 \text{ dBm}$ 。

4.3.2.3 积分器与相位检波器

前面讲到这里采用的全功率辐射计与常用的全功率辐射计相比增加了一个辅助通道。噪声源产生方波调制信号，通过 T 型接头注入到主信道，由平方律检波器得出的信号经过放大分成两路。一路经积分器积分 1 秒输出，另一路经与噪声源注入噪声同步的相位检波器检波，输出一个正比于噪声源注入的高低温噪声差值和中低放增益乘积的直流电压，该电压和稳定的直流参考电压相减，产生接收机增益飘移的误差信号，该误差信号由 AGC 放大器放大后去调整接收机增益，达到接收机增益的稳定。

4.3.3 全功率辐射计周期定标技术

传统的全功率微波辐射计由于其自身的系统增益起伏严重的影响了高接收灵敏度特性，因此常常不能满足实际测量使用的要求。目前大多数辐射计采用模拟电路方法来降低或消除系统增益起伏对灵敏度的影响（如零平衡迪克辐射计等），但是这些

辐射计系统都较为复杂，并且其性能受到元器件影响较大^[21]。本系统中采用的是全功率微波辐射计，为了解决系统增益起伏严重的影响，在本课题中采用周期定标技术来解决这个问题。

在整个扫描过程中，反射面可以进行二维方向扫描，扫描由步进电机带动。接收机系统和天线系统都装在方位平台上，与方位平台一起扫描。方位扫描的控制范围在-200°~200°之间；反射面在俯仰沿一个固定方向做周期性扫描，从0°~360°，定义天顶为0°，在0°~90°之间观测大气，采样的步进角取整数度。在180°处放置高温定标源，在270°处放置低温定标源，所以系统采用周期定标技术，如图 4.3.3 所示。

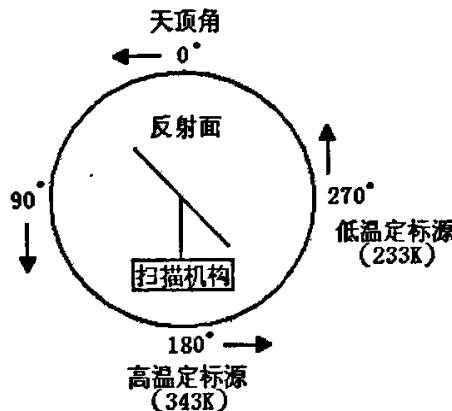


图 4.3.3 天线周期扫描

在本系统中的定标源采用微波黑体，将微波黑体加热到 343K 作为高温定标源，将微波黑体的温度降到 233K 作为低温定标源。

天线在做周期性圆周扫描中，因为在0°~90°之间观测大气，所以在0°~90°之间可以选取一个或者多个观测点。如果只选取一个观测点，一般为0°即天顶角垂直观测。如果选取多个观测点，即采用扫角方式进行观测。在本课题中采用四通道多观测点进行观测，很好的采用了扫频和扫角相结合的方式，有利于提高反演的精度。我们在每一周中选取六个观测点和两个定标视场，即每个周期内有八个观测点，利用两个定标点来反演观测点的亮度温度就是所谓的周期定标，这样可以有效的消除增益漂移带来的影响。

周期定标有两种方法^[22]：

(1) 采用本周期内的定标点进行定标

设每个观测点的输出分别为 V_j ，其中 j 表示第 j 个周期， i 表示一个周期内观测点号， $i=1\sim8$ 。这里将 V_{j1} 和 V_{j2} 作为低温顶标点和高温定标点的输出，对应的亮度温度用 T_L 和 T_H 表示，那么就可以得到：

$$T_{\mu} = \frac{T_H - T_L}{V_{js} - V_{jn}} (V_{\mu} - V_{js}) + T_H, \quad (4.3.1)$$

$$T_{\mu} = \frac{T_H - T_L}{V_{js} - V_{jn}} (V_{\mu} - V_{jn}) + T_L. \quad (4.3.2)$$

(2) 采用多个周期定标点的平均值进行定标

为了进一步减少增益漂移的影响, 应用多个周期的定标观测点的输出作为运算, 使定标的时刻与被反演观测点观测的时间相同, 即等效成观测和定标同时进行。

在全功率辐射计中采用周期定标技术可以消除系统增益漂移的影响。当周期内的增益漂移较大时利用第二种定标方法可以很好的改善增益漂移的影响, 当周期内的增益漂移较小时, 两种方法的计算结果差别较小。在不影响技术填标的前提下, 可用第一种方法计算。

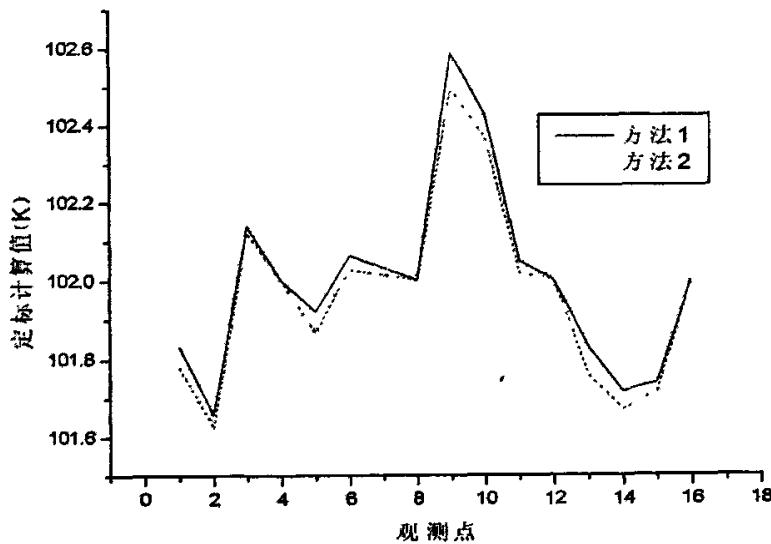


图 4.3.4 低温定标源的测量计算值

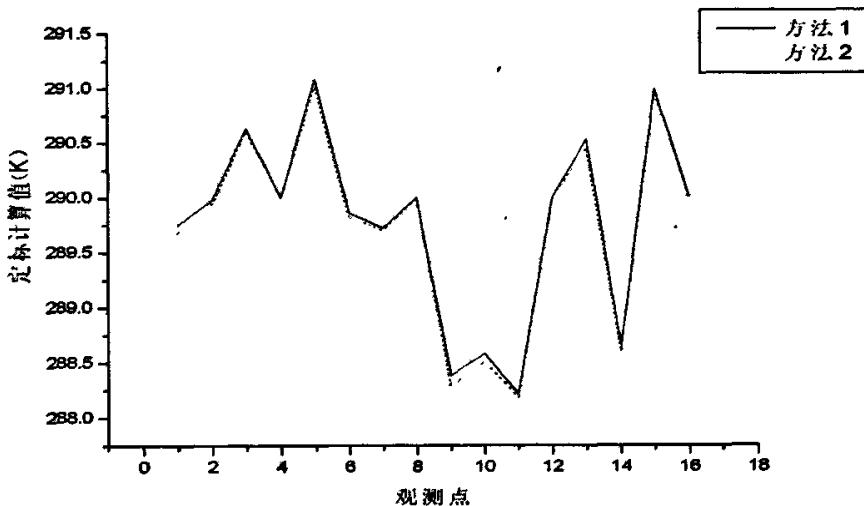


图 4.3.5 高温定标源的测量计算值

从上面两个图中可以看出两种方法都能够有效的消除增益漂移的影响。相比第一种方式，第二种方式改善增益漂移的效果更好一些，这两种方式将有利于全功率微波辐射计的应用和发展。

4.3.4 毫米波辐射计的绝对测量精度

微波辐射计的绝对测量精度是微波辐射计的主要指标之一，也是为以后能够利用精确的测量数据进行精确反演的前提和保证，所以在本节中分析微波辐射计中影响绝对测量精度的几个主要因素和如何提高绝对测量精度。

在 (4.2.23) 式中，第一项是主波瓣贡献，第二项是旁瓣贡献，第三项是天线本身的贡献。在大气遥感应用中，我们需要准确地测出 \bar{T}_{ML} 这个量。从 (4.2.24) 式可见，它与 T_A' 、 η_M 、 η_r 、 T_0 、 \bar{T}_{SL} 这五个量有关，这些量都影响微波辐射计的绝对测量精度。

T_A' 是天线输出端的总功率，它用温度表示，并且是一个被测量， T_A' 的测量精度直接影响微波辐射计的绝对测量精度。通过辐射计接收机的校准，把辐射计的输出电压 V_o 与 T_A' 联系起来，因此，接收机的校准精度影响了 T_A' 的测量精度。接收机的校准精度与校准噪声源温度的精确值和稳定性有关，也与传输线损耗(包括反射和耗散)的稳定性有关，要提高 T_A' 的测量精度，就要求高精度的接收机校准。

T_0 是天线的实际温度，也是一个可测量。从式 (4.2.24) 可以看出，若 T_0 测量不准确或者 T_0 变化都会影响微波辐射计的绝对测量精度，在实际情况下，天线周围的环境温度是不均匀的，而且经常变化，使在 T_0 测量中引进误差。

η_M 和 η_r 分别是天线的主波瓣效率和辐射效率，设计中要求微波辐射计的天线有

较高的主波瓣效率和辐射效率。主波瓣效率越高，则旁瓣的影响越小，辐射效率越高，天线环境温度的变化影响也越小，要精确测量 η_M 和 η_L 是比较困难的，因而它们限制了微波辐射计的绝对精度。

\bar{T}_{SL} 为天线旁瓣方向的加权平均亮度温度，这个量难以精确的测定，只能估计，而且实际上 \bar{T}_{SL} 经常变化，因此它也同样限制了辐射计的绝对测量精度。

所以影响微波辐射计绝对测量精度的因素很多，而且这些量是变化的。因此，提高微波辐射计的绝对测量精度是比较困难的；1995 年彭树生在其博士论文中详细分析了如何提高微波辐射计的绝对测量精度^[30]。为了减小 \bar{T}_{ML} 的测量误差，需要采用如下的措施：

- (1) 采用高主波束效率的天线；
- (2) 尽量减小天线旁瓣引入的能量；
- (3) 提高天线温度 T_A 的测量精度。

4.4 系统性能与遥感精度的关系

在大气微波遥感领域中，大气微波辐射计的探测性能尚受到微波辐射计的工作原理以及目前的技术条件、信息提取的能力等方面限制。在本节中讲述系统性能主要包括微波辐射计的测量精度对反演精度的影响、微波辐射计通道缺损对反演精度的影响、反演算法对反演精度的影响。

4.4.1 测量精度对遥感精度的影响

微波辐射计的测量精度主要取决于微波辐射计的灵敏度、天线性能、定标技术以及接收机性能等几个方面，在前面的各章节中已经给出了以上几个方面的原理以及在本课题中的设计应用。其中天线性能、周期定标技术以及接收机性能对整个系统造成的测量误差也可以看成微波辐射计的灵敏度的高低，所以在这里我们主要讨论微波辐射计的灵敏度对遥感精度的影响。

前面已经讲到全功率辐射计的灵敏度为：

$$\Delta T_{min} = (T_A + T_{REC}) \sqrt{\frac{1}{\beta\tau} + \left(\frac{\Delta G_s}{G_s}\right)^2} . \quad (4.4.1)$$

显然全功率辐射计的灵敏度与以下几个因数有关系：辐射计系统的噪声温度、高频前端等效噪声带宽 β 和积分时间 τ 。增加 β 可以提高灵敏度，但是也同时增加了高频前端的噪声温度 T_A 。增加积分时间 τ 也可以提高灵敏度，但 τ 的大小一般由遥感的用途决定^[31]。

降低系统噪声温度 $T_A + T_{REC}$ 可以提高辐射计的灵敏度，由于 T_A 是由被测场决定

的, 所以要降低系统噪声温度只有降低接收机等效噪声温度 T_{REC} 。由于实际上很难将 T_{REC} 引起的亮温测量误差与其他因素所引起的亮温测量误差区分开, 为了研究的方便, 这里暂且将所有因素引起的亮温测量误差都归于 T_{REC} 的影响。对微波辐射计各通道亮温均加上高斯噪声来模拟 T_{REC} , 分别在 0.2K~2.5K 内等间隔地取值作为高斯噪声的均方根差, 噪声的均值都为 0。当加上 0.2K 的 T_{REC} 时, 反演结果的总体均方根误差为 2.04K; 当加上 2.5K 的 T_{REC} 时, 反演结果的总体均方根误差为 3.18K。对于不同的 T_{REC} , 所得反演结果的均方根误差如图 4.4.1 所示。

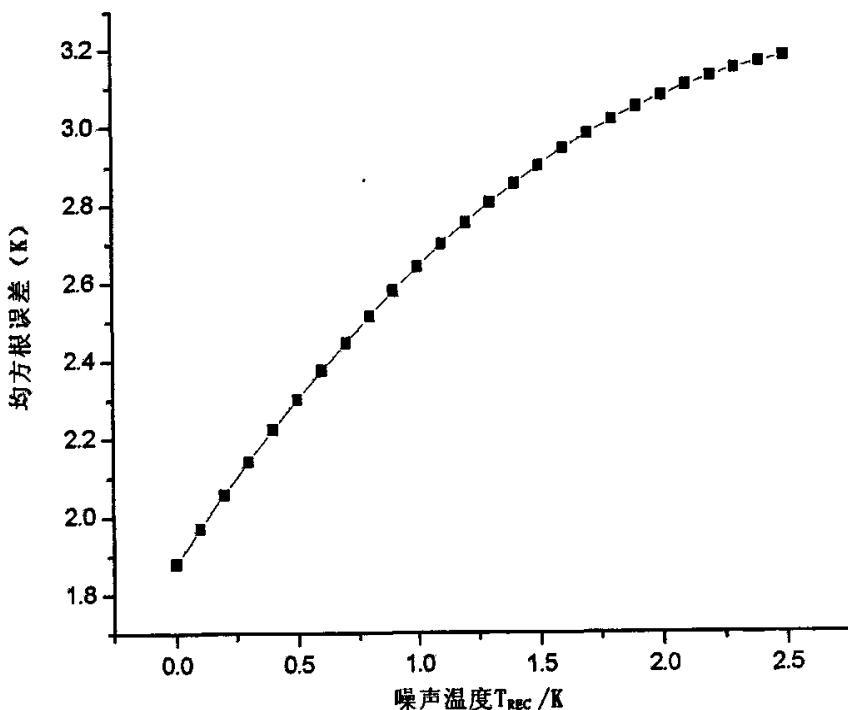


图 4.4.1 噪声对反演精度的影响

目前许多先进的大气微波辐射计的灵敏度已经达到 0.1K 左右, 而地面的发射贡献也仅为 0.1K, 这样不仅可以提高微波辐射计的测量精度, 还可以忽略地面这一贡献以提高反演的精度, 所以提高微波辐射计的灵敏度可以有效的降低反演结果的误差。

4.4.2 通道的缺损对遥感精度的影响

因为微波辐射计可以全天候不间断进行大气观测, 所以有可能在观测的过程中因为某些原因导致四个通道中的一个或多个通道不能正常工作。这样这就要求考虑通道

缺损对温度廓线反演性能的影响，在这里我们仅考虑一个通道缺损的情况。我们分别给四个通道中的一个通道的亮度温度加上均值为 0，均方根差为 0.5K 的高斯噪声。通过反演所得反演结果的误差如图 4.4.2、图 4.4.3、图 4.4.4 和图 4.4.5 所示。由图可见，单通道缺损对所缺通道权重函数峰值附近高度的温度反演有不同程度的影响，对其他高度上温度反演的影响可忽略。

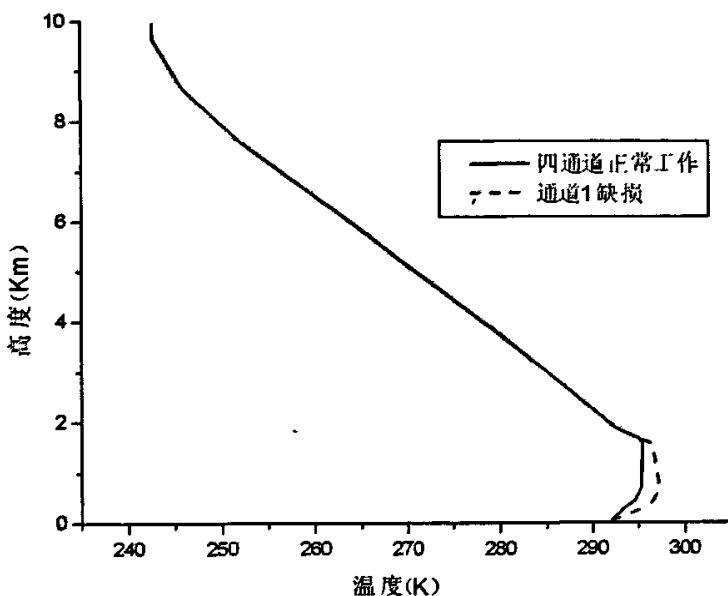


图 4.4.2 通道 1 (52.85GHz) 缺省和正常反演的比较

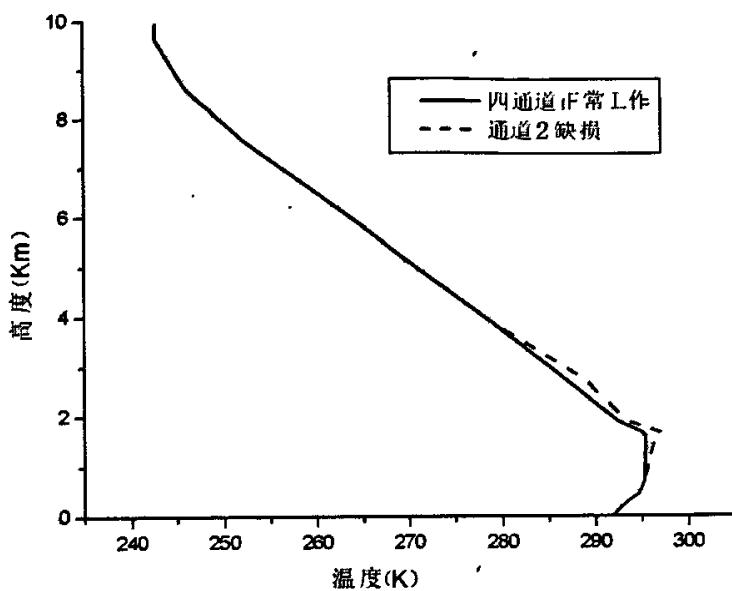


图 4.4.3 通道 2 (53.85GHz) 缺省和正常反演的比较

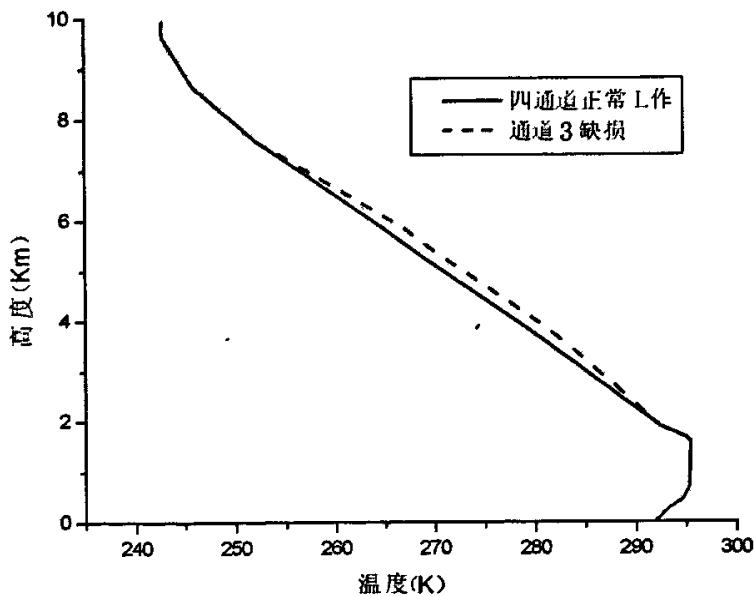


图 4.4.4 通道 3 (55.45GHz) 缺省和正常反演的比较

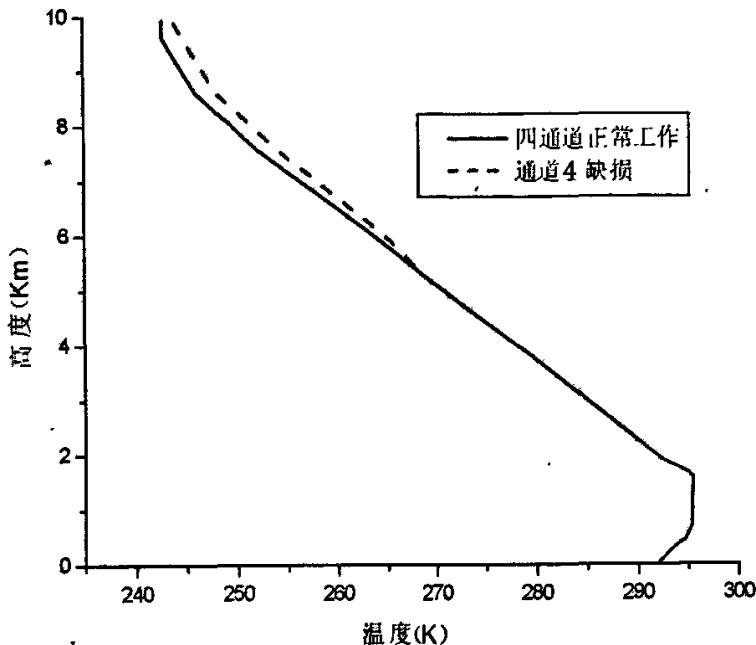


图 4.4.5 通道 4 (58.80GHz) 缺省和正常反演的比较

从上面的图可以看到辐射计的一个通道缺损时, 将会对该通道权重函数峰值附近高度上大气温度的反演有不同程度的影响, 对其他高度上温度反演的影响可忽略。所以如果在条件允许的情况下, 增加探测通道的数量可以使增加得到的独立信息, 利用通道的相关性, 在辐射测量资料预处理中检验数据的可靠性, 从而提高遥感精度。

4.4.3 反演算法对遥感精度的影响

本课题中主要讨论采用牛顿非线性反演方法对辐射计的测量亮温数据进行反演处理。牛顿非线性法对辐射计的测量精度要求较高。如果在 1000 米以下有逆温存在, 完全可以反演出逆温的结构来, 其强度和高度与无线电探空仪测量相似。但是微波辐射计能够给出温度的连续(时间、空间)的变化。一般来说, 在 1Km 米以下, 反演的温度误差在 1K 以下, 10Km 以下反演的温度误差一般也在 3K 以内。图 4.4.6 表示的就是采用牛顿非线性法反演值和无线电探空仪测量值的比较。从图中可以看到两条曲线非常相似, 得到了比较好的反演结果。

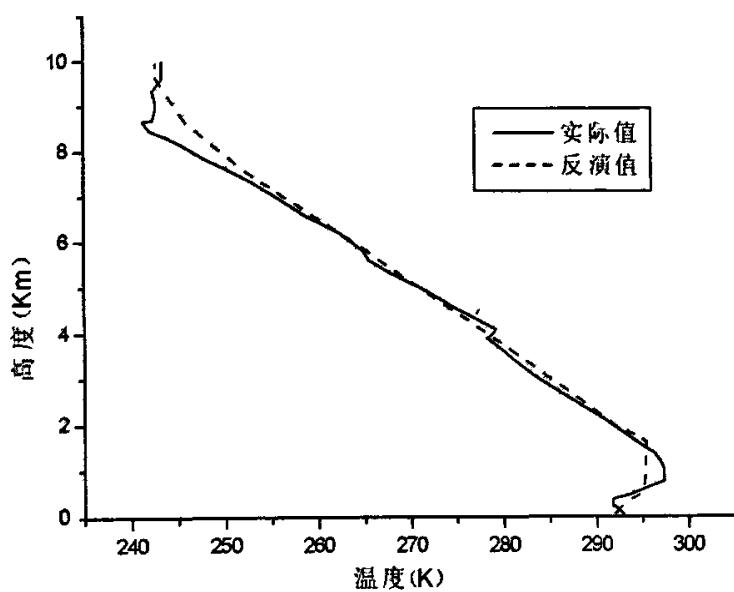


图 4.4.6 辐射计反演值和探空仪测量值的比较

5 结束语

本课题对毫米波辐射计遥感大气温度廓线的技术进行了研究,主要分为大气温度遥感理论和辐射计系统设计两个方面。

在大气遥感理论中首先探讨了大气辐射传输模式的原理,主要分析计算了用于遥感的几个关键参数:大气氧气分子的吸收特性、大气透过率、权重函数。在分析这些主要参数的基础上选择合适的反演方法,在本课题中采用的是牛顿非线性迭代法。

在辐射计系统设计中首先介绍了毫米波辐射计的工作原理、灵敏度和定标技术。接着结合前面介绍的大气温度遥感理论设计适合大气温度遥感的毫米波辐射计。主要工作包括辐射计的通道选择、带宽选择、灵敏度、天线设计、接收机设计和定标技术。在本课题中综合考虑各方面的因素采用四通道地基微波辐射计,可以有效观测并反演出了高度为10km以内的大气温度廓线。同时介绍了带宽选择、灵敏度、天线设计以及周期定标技术。最后分析了整个辐射计系统性能与遥感精度的关系,反演结果表明高度在5km以下时反演的均方根误差小于2~3K,高度在5km以上时反演的均方根误差约为2~3K,得到了很好的反演结果和精度。

本课题所做的工作是在晴空条件下完成的,没有考虑云雨的气象因素的干扰等复杂气象背景,在后续的工作中可以以此为基础进行研究。同时本课题以地基作为微波辐射计的观测平台,只能观测10km以内的大气温度廓线。而以卫星为平台的微波辐射计可以观测5km以上的大气温度廓线,那么如果将两者联合起来进行遥感将使反演的精度进一步的提高,所以在以后的研制过程中星载和地基微波辐射计的联合遥感将是一个重点。

致 谢

本文的研究和撰写是在我的导师彭树生副教授的悉心指导下完成的，他为本文的研究倾注了大量心血。彭老师严谨的治学态度，渊博的理论与专业知识，对事业孜孜追求的献身精神，民主平等的学术风气以及待人宽厚、平易近人的为人风格使我受益匪浅，在此表示衷心的感谢！

感谢师兄吴礼、常庆功对我的帮助，感谢教研室的赵刚峰、郁继宗、周晔、江亦涛等兄弟姐妹在生活和学习上提供的关心和鼓励，他们给我两年的研究生生活留下了美好的回忆。感谢好友万国建、冯建炎、施青松、卞刘卫、黄靓等，祝他们前途似锦！

感谢潘琳，是你给了我很多人生的快乐，祝你天天快乐！

深深感谢我的爸爸妈妈，是你们的辛勤汗水把我抚养长大，你们给了我永远的快乐，祝你们健康长寿！

考虑到作者水平有限、考虑不周和时间仓促等因素，论文中难免出现漏洞和错误之处，望评审和答辩老师积极提出批评和指正！我将不胜感激！

参考文献

- 1 周秀骥. 大气微波辐射及遥感原理. 北京: 科学出版社, 1982
- 2 PHILIP W.ROSENKRANZ. Shape of the 5 mm Oxygen Band in the Atmosphere. IEEE Trans on Antennas and Remote Sensing. 1975(4): 198-506
- 3 王寅虎, 孙龙祥. 应用 ATOVS 资料反演大气温湿廓线. 气象科学. 2001 (9) : 348—354
- 4 PHILIP W.ROSENKRANZ. Retrieval of Temperature and Moisture From AMSU-A and AMSU-B Measurements. IEEE Trans on Antennas and Remote Sensing. 2001(11): 2429-2435
- 5 F.T.乌拉比, R.K 穆尔, 冯健超. 微波遥感 第一卷 微波遥感基础和辐射测量学. 北京: 科学出版社, 1988
- 6 钱志铭, 李明熙. 标准大气 (美国, 1976). 北京: 科学出版社, 1982
- 7 廖国男. 大气辐射导论. 北京: 气象出版社, 1985
- 8 刘长盛, 刘文保. 大气辐射学. 南京: 南京大学出版社, 1990
- 9 曾庆存. 大气红外遥测原理. 北京: 科学出版社, 1974
- 10 张瑞生. 大气微波遥感. 山东: 山东科学技术出版社, 1989
- 11 张培昌, 王振会. 大气微波遥感基础. 北京: 气象出版社, 1995
- 12 吴北婴, 李卫. 大气辐射传输实用算法. 北京: 气象出版社, 1998
- 13 周秀骥. 气象卫星的红外遥测及反演 (二). 北京: 科学出版社, 1979
- 14 董超华. 气象卫星遥感反演和应用论文集上册. 北京: 海洋出版社, 2001
- 15 董超华. 气象卫星遥感反演和应用论文集下册. 北京: 海洋出版社, 2001
- 16 李俊, 曾庆存. 晴空时大气红外遥感及其反演问题 1_理论研究. 大气科学. 1997 (1): 1-9
- 17 李俊, 曾庆存. 晴空时大气红外遥感及其反演问题 2_反演试验研究. 大气科学. 1997 (3): 214-219
- 18 中国科学院大气物理研究所. 大气遥感探测问题的研究 (一). 北京: 国防工业出版社, 1977
- 19 李虎. 地基微波辐射计测量大气环境参数的研究. 中国电波传播研究所. 2001
- 20 张祖荫. 微波辐射计测量技术及应用. 北京: 电子工业出版社, 1995
- 21 彭树生, 殷兴辉, 徐之材. 五毫米大气遥感微波辐射计. 遥感技术与应用. 1995 (2): 38-41
- 22 彭树生, 徐之材. 微波辐射计的周期定标技术. 空间电子技术. 1991 (1): 65-71
- 23 赵柏林. 微波遥感大气层结的原理和实验. 北京: 北京大学出版社, 2001
- 24 赵柏林. 多频段微波遥感大气层结的实验研究. 北京: 北京大学出版社, 2001
- 25 张峰, 欧祥荣. 一种用于气象卫星多通道扫描微波辐射计. 空间电子技术. 1995 (4) : 7-10
- 26 David C.HOGG. Ground-based Remote Sensing and Profiling of the Lower Atmosphere Using Radio Wavelengths. IEEE Trans on Antennas and Propagation. 1980(2): 281-283
- 27 Arkady VTroitsky, Konstantin P. Thermal Sounding of the Atmospheric Boundary Layer in

- the Oxygen Absorption Band Center at 60 GHz. *IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing*. 1993(1): 116-120
- 28 徐之材, 彭树生. 长期稳定微波辐射计增益的一种方法. 紫金山天文台台刊. 1995(6): 127-131
- 29 谢瑞华, 沈宗珍, 刘波. 一种结构紧凑的正交模耦合器. 空间电子技术. 1997 (3): 34-36
- 30 彭树生. 提高微波辐射计绝对测量精度的研究. 中国科学院紫金山天文台. 1995
- 31 桂良启, 张祖荫. 提高微波辐射计灵敏度研究的综述. 遥测遥控. 2004 (11): 1-5
- 32 刘宝江. 提高微波辐射计测量精度研究. 遥感技术与应用. 2002 (2) : 90-94
- 33 Strand O N, SIAM J. Number Anal. 1974(11):798-825
- 34 Chahine. J. A. S . 1972(6):27-30
- 35 Smith W. Advance in Remote Sensing Retrieval Methods . 1985(10):221-232
- 36 Susskind J. Remote Sensing of Weather and Climate Parameters from HRSI MSU on TIROS-N. *J. Geophys. Res.* 1984(1):4677-4697
- 37 J.R Eyre. Inversion of Cloudy Satellite Sounding Radiances by Nonlinear Optimal Estimation, I: Theory and Simulation for TOVS. *Quat. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1989: 1001—1026
- 38 Chumsdie, J.H., T.A.Stermitz, J.A.Schroeder. Temperature profiling with neural network inversion of microwave radiometer data. *J.Atmos.Oceanic Techno.* 1994(11): 105-109
- 39 Yuri Gaevich, Trokhimovski, Westwater. Air and sea surface temperature measurements using a 60-GHz microwave rotating radiometer. *IEEE Trans Geosci Remote Sens.* 1998 (1) vol.36
- 40 Fabio Del Frate. Nonlinear principal component analysis for the radiometric inversion of atmospheric profiles by using neural networks., *IEEE Trans Geosci and Remote Sens.* 1999 (5):vol.37
- 41 赵恩惠, 沈宗珍. 探测大气温度廓线的微波辐射计. 空间电子技术. 1996 (4) : 21-28
- 42 李万彪, 吴龙涛. 气象卫星遥感探测海面大气温度垂直廓线. 北京大学学报 (自然科学版) . 2003 (9): 656—665
- 43 姚志刚, 陈洪滨. 七通道微波辐射计遥感大气温度廓线的性能分析. 气象科学. 2005 (4): 133-141
- 44 姚志刚, 林福龙. 星载微波辐射计遥感大气温度廓线的数值模拟. 解放军理工大学学报 (自然科学版) . 2005 (5): 491-496
- 45 E.R Westwater. Ground-based Remote Sensing of the Atmosphere by Combined Passive and Active Sensors. *IEEE Trans on Antennas and Remote Sensing*. 2003(7): 179-184
- 46 王振会. 利用气温垂直分布的统计特性讨论地面气温在大气温度遥感反演中的应用. 气象科学. 1989 (12): 437-444
- 47 殷兴辉, 徐之材. 毫米波喇叭天线的多模设计. 紫金山天文台台刊. 1995 (6): 132-139
- 48 胡大璋. 低层大气中氧气吸收的研究. 电波科学学报. 1996 (9): 27-32

- 49 沈宗珍, 赵思惠. 5毫米微波辐射计扫描天线. 空间电子技术, 1994 (3): 20—24
- 50 应国玲, 周长宝, 陈怀迁. 微波辐射计. 北京: 海洋出版社, 1992
- 51 赵柏林. 大气探测原理. 北京: 气象出版社, 1987
- 52 官莉. 卫星红外超光谱资料及其在云检测、晴空订正和大气廓线反演方面的应用. 南京信息工程大学, 2005
- 53 S.S.Peng. 5mm Band Radiometer for Atmosphere Remote Sensing. IEEE Trans on Antennas and Remote Sensing, 2004(12): 307-309