

微波波段大气的衰减作用之实验研究^{*}

赵柏林 朱元竞 韩庆源

(北京大学地球物理系)

提 要

本文研究了微波波段($\lambda=5\text{ mm}-3.2\text{ cm}$)大气的衰减作用。用微波辐射计,根据太阳射电法和大气辐射法进行大气微波吸收值的测量,同时用探空记录计算大气微波吸收值,两者进行比较和分析它们的相关。本文研究了大气微波吸收值与大气总水汽含量或地面气象要素(如温度、比湿)之间的关系,提供预告大气微波吸收值的可能性。云层对于大气吸收值的影响,文中也作了讨论。

一、引 言

大气微波衰减值是经常使用的参量,在遥感、雷达、通讯和射电天文学等方面有着重要的意义。在文献[1—6]中,曾从不同角度讨论大气微波衰减的作用。本文企图从下面几个方面进一步讨论微波波段大气的衰减作用:

1. 在北京地区用8.5 mm微波辐射计测量太阳射电和大气辐射,分析大气的吸收特性。利用北京天文台3.2 cm射电望远镜测量大气辐射的资料,研究大气的吸收作用。
2. 在北京地区用5 mm—1.35 cm多频段微波辐射计测量大气辐射,分析大气微波吸收频谱特性。
3. 用北京地区探空记录计算大气的微波吸收值与实测值比较,并分析它们间的相关性与偏离度。
4. 分析大气微波吸收作用对于大气总水汽含量的依赖性,及与地面气象要素(如温度、比湿)的相关性。从而讨论预告大气微波吸收值的可能性。
5. 分析云层对于大气微波吸收值的影响。

二、测 量 仪 器

在测量大气微波吸收的实验中,使用了5 mm—3.2 cm波段5个频率的微波辐射计。8.5 mm微波辐射计,频率为35.3 GHz,噪声系数 $<12\text{ dB}$,天线为卡塞格伦式,抛物面口径为37 cm,主波瓣波束宽度为 1.5° 。微波辐射计有两个检定负载,一个在机箱以内,它与比较源相同,用以校正零点;另一个在机箱外部,用以校准增益。补偿支路采用固态噪声源,用恒流源为电源供给。接收机用甘氏振荡器和正交场混频器,中频放大器带宽为80 MHz,机箱温度为 53°C ,温度起伏 $\leq 2^\circ\text{C}$,方位角范围为 $0-360^\circ$ (精度 $\pm 0.5^\circ$),仰角范围 $0-90^\circ$ (精度 $\pm 0.1^\circ$)。附有太阳瞄准器,仪器外形如图1中所示。5 mm和1.35 cm微

^{*} 本文于1985年1月5日收到,1985年6月6日收到修改稿。

波辐射计的结构与 8 mm 微波辐射计的结构相似。1.35 cm 微波辐射计, 频率为 22.235 GHz, 噪声系数为 9.6 dB, 卡塞格伦式抛物面天线, 其口径为 1.2 m, 主波瓣波束宽度为 1° 。5 mm 微波辐射计, 频率为 52.8 GHz 和 54.4 GHz, 卡塞格伦式抛物面天线口径为 26 cm, 主波瓣波束宽度为 1.5° 。噪声系数为 14 dB。5 mm—1.35 cm 波段中, 4 频段微波辐射计联合观测, 有如图 2 中所示。

3.2 cm 大气辐射探测资料是北京天文台提供的。射电望远镜的天线主瓣半功率宽度为 1.7° , 接收机为 Dicke 调制系统, 超外差式, 本振频率为 9.395 GHz, 双边带接收, 中频带宽 20 MHz, 整机噪声系数 25—30, 当时间常数 1 s 时, 噪声起伏约 1.0—1.5 k, 增益稳定性约 1%^[7]。

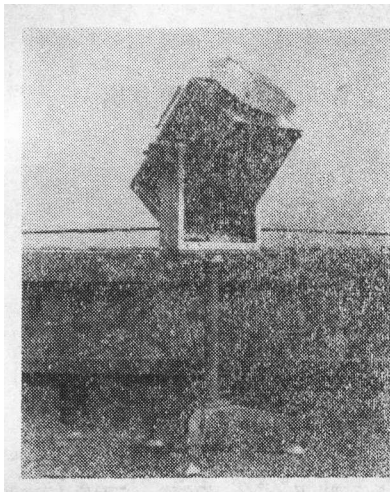


图 1 8.5 mm 微波辐射计

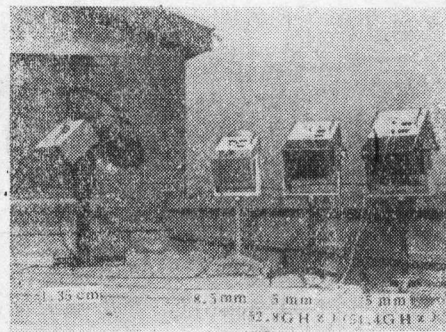


图 2 5 mm—1.35 cm 微波辐射计联合观测

三、测 量 方 法

在实验中, 采用三种方法进行大气微波吸收值的测量:

1. 太阳射电法

利用地球以外的星体为射电源测量大气吸收值是一种有效的方法。在地球以外射电源中以太阳为最强。虽然月亮的辐射比较稳定, 一些研究中以月亮为辐射源, 但它的辐射流量比太阳小很多, 考虑到微波辐射计的噪音电平, 难以达到测量要求的信噪比^[8]。太阳辐射由于黑子、爆发等的影响, 使它的射电强度有变化, 但是太阳流量在 8 mm 波长附近的波段局部源的贡献是小的。例如紫金山天文台多次测量的结果, 在 8.6 mm 波段太阳流量的平均值为 $S_\odot = 2548 \pm 29$ sfu ($1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ watt/m}^2\text{Hz}$), 测量的偶然误差为 1.1%^[9]。Suzuki 和 Kawabata 用干涉仪观测的结果表明, 在此波长上太阳上局部源的贡献是很小的, 任何一个局部源的流量密度不会超过 5 sfu^[10]。因此我们可以认为此波段上太阳流量是平静的。

当天线指向射电源时, 天线等效噪声温度为

$$T_{as} = \left(1 - \frac{1}{L}\right) T_L + \frac{1}{L} \iint_{\Omega_s} \frac{G(\theta, \phi)}{4\pi} [T_b e^{-\Gamma(z)} + (1 - e^{-\Gamma(z)}) T_s] d\Omega \quad (1)$$

其中, L, T_L 为天线和馈源的损耗和温度, $G(\theta, \phi)$ 为球面坐标下天线的增益, T_b 为射电源的亮度温度, T_s 为该方向的大气平均温度。

当天线指向该方向冷空时, 天线等效噪声温度 T_s 为

$$T_s = \left(1 - \frac{1}{L}\right) T_L + \frac{1}{L} \iint_{\Omega_s} \frac{G(\theta, \phi)}{4\pi} (1 - e^{-\Gamma(z)}) T_s d\Omega \quad (2)$$

$\Gamma(z)$ 为在天顶角 z 方向上大气吸收值。通常在同一仰角上观测 T_{as} 和 T_s 时, 可认为 $\Gamma(z)$ 不变, 则由 (1-2) 式得到

$$T_{as} - T_s = \frac{1}{L} e^{-\Gamma(z)} \iint_{\Omega_s} \frac{G(\theta, \phi)}{4\pi} T_b d\Omega = \frac{T_b}{L} e^{-\Gamma(z)} \quad (3)$$

(3) 式中取 $T_b = \iint_{\Omega_s} \frac{G(\theta, \phi)}{4\pi} T_b d\Omega$, Ω_s 为射电源的立体角。对于平面分层大气, $\Gamma(z) = \Gamma_0 \sec z$, Γ_0 为垂直方向上大气吸收值。则由 (3) 式有

$$\ln(T_{as} - T_s) = \ln\left(\frac{T_b}{L}\right) - \Gamma_0 \sec z \quad (4)$$

及

$$\Gamma_0 = -\frac{d}{d \sec z} \ln(T_{as} - T_s) \quad (5)$$

由 (4-5) 式可知, 只要测出 $T_{as} - T_s$ 随天顶角 z 的变化, 就可以求出大气吸收值 Γ_0 。用 8.5 mm 微波辐射计测量大气吸收值的记录, 如图 3 中所示。

2. 大气辐射法

大气为射电辐射源, 天空的亮度温度及其分布是大气吸收值的函数。利用大气辐射测量大气的吸收值常常采用下面的公式^[5,6], 大气的亮度温度 T_b 为

$$T_b = T_m (1 - e^{-\Gamma_0 \sec z}) \quad (6)$$

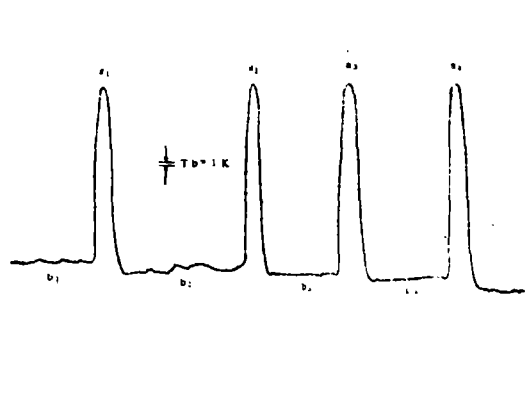


图 3 8.5 mm 微波辐射计测量大气吸收值的记录

($a_1 \cdots a_4$: 对准不同仰角太阳时的记录值, $b_1 \cdots b_4$: 相对应仰角时天空背景加上噪声补偿的读数记录, b_2 : 是由于有高层云影响使曲线出现跌落)

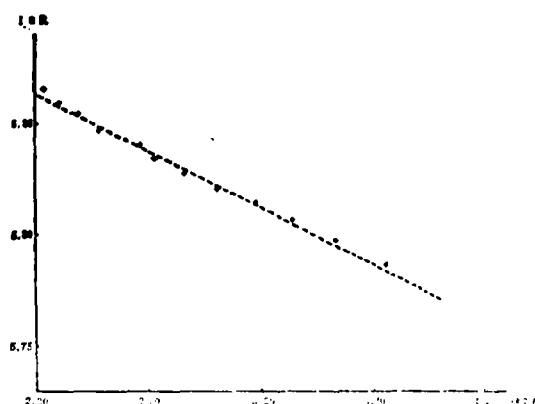


图 4 微波辐射计测量大气吸收值图
(R : $T_{as} - T_s$ 的相对值, 对准太阳及对准同方向背景时天线辐射读数差; Z : 天顶角; $\lambda = 8.5 \text{ mm}$, 1983 年 10 月 21 日 7:15—8:30)

其中, T_m 为大气平均温度, 对于 $\lambda = 3.2$ cm 波段, $T_m = T_0 - 32$ K, T_0 为地面温度^[11]。由于 $\Gamma_0 \sec z \ll 1$, (6) 式可近似为

$$\Gamma_0 = \frac{T_b}{T_m \sec z} \quad (7)$$

T_b 是从射电望远镜接收到的辐射, 经仪器订正后得到的大气辐射的亮度温度。

3. 遥感测量法

用 5 mm—1.35 cm 波段中四个频率的微波辐射计联合观测, 遥感测量大气温度和湿度。从而求得大气微波吸收值的频谱分布。微波遥感大气层结的方法见 [12, 13] 中所示。

四、测量结果及资料分析

1) 用 8.5 mm (35.3 GHz) 微波辐射计进行测量, 天线分别指向冷空和太阳, 由于两者差异很大, 所以在天线指向冷空时, 要加噪声补偿。测量时, 将天线固定置于太阳运行的前方。让太阳扫过天线主瓣, 记录仪记下的曲线见图 3 中所示。实测一般由 $z = 75^\circ$ 至 $z = 60^\circ$ 左右结束, 测量时间约一个多小时, 测量点在 12 个以上, 由这些组数据进行回归可求出 $\Gamma_{0.}$ 值。测量示例如图 4 中所示。当有云时, 使测量结果与晴空时有偏离; 在天空背景出现云时, 亮度温度有所升高 (见图 3)。当云层遮蔽太阳时, 测量的太阳亮度温度有所降低, 这时大气吸收值增大。

1983 年 9 月—10 月在北京西郊北京大学进行了测量。得到微波辐射计测量大气吸收值 $\Gamma_{0.}$ 。同时使用北京气象台探空资料进行计算, 亦可求出大气吸收值 $\Gamma_{0.}$ 。北京地区秋季, 8.5 mm 波段, 微波辐射计测量大气吸收值见表 1 中所示, 其平均值为 0.066。它与探空资料计算的大气吸收值相比较, 见图 5 所示, 探空资料计算大气吸收值的平均值为 0.0633。

表 1 大气吸收的微波辐射计测量值 $\Gamma_{0.}$ ($\lambda = 8.5$ mm)

日 期	3/IX	12/IX	13/IX	15/IX	19/IX	24/IX	25/IX	29/IX*
$ \gamma $ 相关系数	0.988	0.994	0.996	0.999	0.998	0.995	0.997	0.997
$\Gamma_{0.}$	0.0701	0.0847	0.0762	0.0853	0.0761	0.0595	0.0745	0.0706
日 期	4/X	6/X	13/X	21/X	22/X	23/X	26/X	27/X
$ \gamma $ 相关系数	0.995	0.997	0.994	0.998	0.997	0.999	0.999	0.999
$\Gamma_{0.}$	0.0587	0.0666	0.0626	0.0568	0.0501	0.0543	0.0561	0.0533

* 云天

大气吸收值 Γ_0 和大气总水汽含量 Q 成正比, 即

$$\Gamma_0 = a + bQ \quad (\lambda = 8.5 \text{ mm}) \quad (7)$$

探空资料计算值: $a = 0.0320$, $b = 0.0188$, 相关系数 $\gamma = 0.993$ 。

微波辐射计测量值: $a = 0.0409$, $b = 0.0153$, 相关系数 $\gamma = 0.819$ 。

其中, Q 为大气总水汽含量 (g/cm^2)。如图 6 中所示。当有云时, 大气吸收值和 (7) 式有较大的偏离。

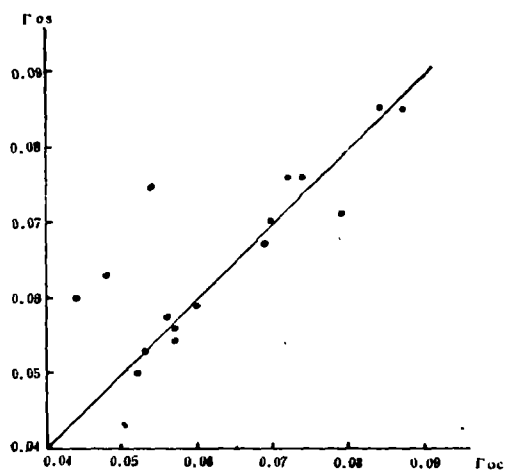


图 5 大气吸收微波辐射计
测量值 Γ_{os} 与探空资料计算值 Γ_{oc} ($\lambda = 8.5$ mm)

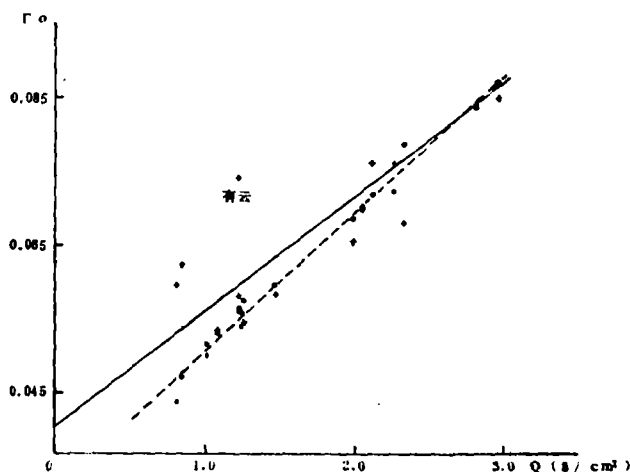


图 6 大气吸收值和总水汽含量的关系
($\lambda = 8.5$ mm, +—微波辐射计测量值,
0—探空资料计算值)

2) 3.2 cm 射电望远镜测量天空背景, 得到冷空大气的辐射, 由(6)式得到大气的吸收值 Γ_o 。观测是在北京西郊北京天文台进行的。我们分析了1978—1980年三年的观测资料。北京地区, 在3.2 cm波段, 年平均大气吸收射电望远镜测量值为0.0124, 探空资料计算值为0.0129。大气吸收值的季节变化, 见图7中所示。在3.2 cm波段, 大气吸收值 Γ_o 和大气总水汽含量 Q 成正比, 即

$$\Gamma_o = a' + b'Q \quad (\lambda = 3.2 \text{ cm}) \quad (8)$$

探空资料计算值, $a' = 0.0109$, $b' = 0.00087$, 相关系数 $\gamma = 0.962$ 。

射电望远镜观测值 ($Q \leq 4 \text{ g/cm}^2$): $a' = 0.0100$, $b' = 0.00151$, 相关系数 $\gamma = 0.75$ 。

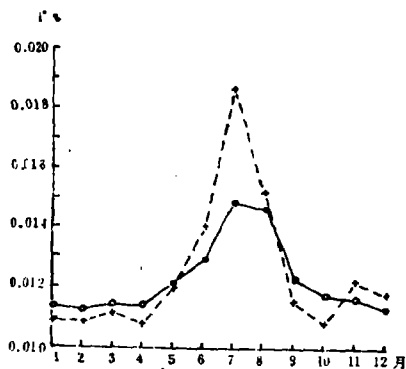


图 7 大气吸收值的年变化
($\lambda = 3.2$ cm, +---观测值
0——计算值)

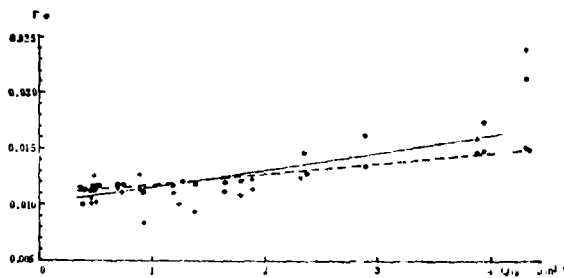


图 8 大气吸收值和湿度的关系
($\lambda = 3.2$ cm, +---观测值
0——计算值)

其中, Q 为大气总水汽含量 (g/cm^2)。如图8中所示。

3) 大气微波吸收的频谱特性

利用1981年9—10月北京地区5 mm (52.8 GHz 和 54.4 GHz) 微波辐射计, 1.35

cm(22.235 GHz)微波辐射计和 8.5 mm(35.3 GHz)微波辐射计联合观测遥感大气温度、湿度层结,得到大气微波吸收值的频谱;两者进行比较,见图 9 中所示。微波遥感实验值和探空资料计算值频谱分布是一致的。大气微波吸收值和地面气象要素(温度、湿度)有一定的相关。微波遥感得到大气微波吸收值和地面气象要素的关系,如 1.35 cm 和 8.5 mm 波段见图 10—11 中所示。其关系式为

微波遥感实验值

$$1.35 \text{ cm}(22.235 \text{ GHz}) \quad \Gamma_o(\times 10^3) = 43.3 + 10.9 q_o \quad \text{相关系数 } \gamma = 0.77。$$

$$0.85 \text{ cm}(35.3 \text{ GHz}) \quad \Gamma_o(\times 10^3) = 39.2 + 2.83 q_o \quad \text{相关系数 } \gamma = 0.75。$$

其中, q_o 为地面比湿(g/kg)。

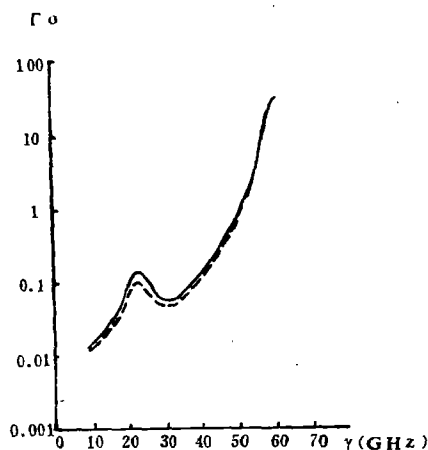


图 9 大气微波吸收值的频谱特性
(——探空资料计算值,
----微波遥感测量值)

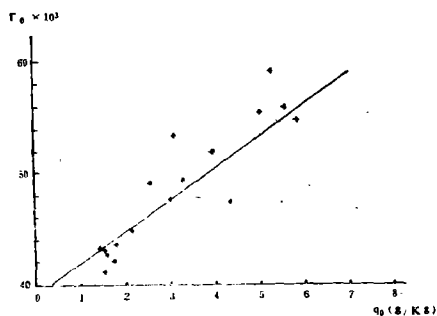


图 10 8.5 mm 大气吸收值和
地面比湿的关系
(微波遥感实验值)

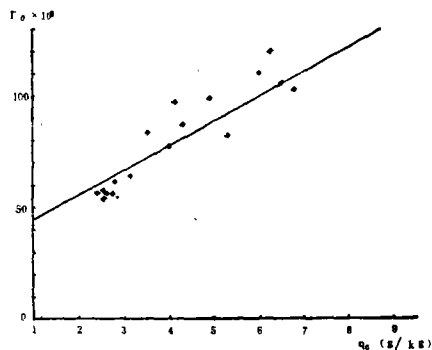


图 11 1.35 cm 大气吸收值和
地面比湿的关系
(微波遥感实验值)

如上所述,大气微波吸收值和地面的气象要素,如湿度有密切的关系。因此,在一些频段,如 $\lambda = 0.85 \text{ cm}, 1.35 \text{ cm}$, 可根据地面气象要素,进行大气微波吸收值的预测。

五、结 论

1. 使用微波辐射计(8.5 mm和3.2 cm)测量大气吸收值和探空资料计算大气吸收值相比较。在平均值上,两者是接近的,但是在个例上两者仍有所偏离。

2. 大气微波吸收值(包括微波辐射计测量及探空资料计算),表现出年变化的特征,夏季比较大。

3. 大气微波吸收值表现出与大气总水汽含量成正相关,在8.5 mm和3.2 cm波段其相关系数 >0.75 。

4. 用5 mm—1.35 cm多频段微波辐射计遥感大气微波吸收值的频谱分布和用探空资料计算值的变化趋势一致。大气微波吸收值与地面气象要素,如比湿,有一定的关系,提供了预告大气微波吸收值的可能性。

致谢:本工作承蒙付其骏先生的帮助,并惠允使用其观测资料,谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] Haroules, G. G., and W. E. Brown III, The simultaneous investigation of attenuation and emission by the earth's atmosphere at wavelengths from 4 centimeters to 8 millimeters, *Journal of Geophysical Research*, 74(9), 4453—4471, 1969.
- [2] Fogarty, W. G., Total atmospheric absorption at 22 GHz, *IEEE Trans. AP-23*(1) 441—445, 1975.
- [3] Lai-Iun Lo, B. M. Fanmin, and A. W. Straiton, Attenuation of 8.6 and 3.2mm radio wave by clouds, *IEEE Trans. AP-23*(6), 782—786, 1975.
- [4] Shinabukro, F. I., and E. E. Epstein, Attenuation and emission of atmosphere at 3.3 mm, *IEEE Trans. AP-18*(4), 485—490, 1970.
- [5] Altshuler, E. E., K. N. Wulfsberg and P. M. Kalaghan, Atmospheric emission statistics at 35 Gc, *Journal de Recherches Atmospheriques*, 8(1—2), 437—442, 1974.
- [6] Wulfsberg, K. N., Sky noise measurements at millimeter wavelengths, *Proc. IEEE* 52, 321—322, 1964.
- [7] 付其骏、郑禾平、李小聪、刘玉英、王淑兰, 厘米波段太阳射电的绝对定标与常规测量, *天体物理学报*, 2(3), 191—200, 1982.
- [8] 袁惠云、彭云楼、薛吟章、陈奇波、刘宗祝、杨庆仁, 用射电天文方法测量天线参数, *通信学报*, 3, 45—52, 1981.
- [9] 紫金山天文测量小组, 35 GHz 太阳电流量的绝对测量, *天文学报*, 23(2), 110—117, 1982.
- [10] Suzuki, I., Kin-Aki Kawabata, and H. Ogawa, Interferometer observations of the solar brightness distribution at 8.6 mm wavelength, *Solar Physics*, 48, 205—217, 1976.
- [11] Троицкий, В. С., и Н. М. Цейтлин, Радиоастрономическая методы абсолютных измерений интенсивности сигналов калибровки антенн и радиотелескопов на сантиметровых волнах, *Известия высших учебных заведений: Радиофизика*, IV(3), 393—414, 1961.
- [12] 赵柏林等, 微波遥感大气层结的原理与实验, *中国科学*, No. 9, 874—882, 1980.
- [13] 赵柏林等, 多频段微波遥感大气层结的实验研究, *中国科学*, No. 11, 1060—1066, 1984.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF ATMOSPHERIC ATTENUATION IN MICROWAVE BAND

Zhao Bolin Zhu Yuanjing Han Qingyuan

(Department of Geophysics, Peking University)

Abstract

The characteristics of atmospheric attenuation in microwave band ($\lambda=5\text{ mm}-3.2\text{ cm}$) are studied. Experimental results from the measurements of atmospheric attenuation by using solar radiation method and atmospheric radiation method in Beijing are compared with values calculated from radiosonde data to analyze their correlativity. The relationship between the atmospheric microwave absorption and total water vapor content or surface meteorological factors (for example, temperature, specific humidity) are discussed. It reveals the possibility of prediction of atmospheric microwave absorption. Effects of cloud on attenuation are also described.