

2 实验

1992~1993 年利用双频(9.375 和 22.235GHz)射电望远镜和辐射计分别在河南新乡、北京、青海德令哈观测了大气衰减,观测仰角为 $3^\circ \sim 70^\circ$,观测方法采用太阳为源法、大气亮温斜线法^[3]和差瓣最大值法^[4],同时还进行气象探空,将测取的大气垂直剖面数据代入式(1)~(4)算出 A_{at} ,并把 A_{at} 代入式(5)算出 A_e 的理论值.

3 观测结果

我们在 9.375、20.6、22.235 和 31.6GHz 等频段在不同季节分别取得有用资料 204 组、68 组、28 组和 54 组.各频段各季节实测天顶衰减的平均值 $\overline{A_{at}}$ 、等效高度的平均值 $\overline{h_e}$ 、实测地面大气吸收系数的平均值 $\overline{\alpha_{at}}$ 和天顶衰减的理论平均值 $\overline{A_{at}}$ 以及它们的标准偏差值 s' 见表 1.

表 1 天顶衰减和等效高度的实测结果
Table 1 Experimental results of zenith and effective height

参数	频段 (GHz)													
	9.375				20.6				22.235				31.6	
	春	夏	秋	冬	春	夏	春	夏	秋	春	夏			
$\overline{A_{at}}$ (dB)	0.064	0.075	0.06	0.058	0.601	1.202	0.670	1.430	0.611	0.422	0.543			
$S_{A_{at}}$ (dB)	0.004	0.004	0.003	0.003	0.260	0.230	0.170	0.192	0.172	0.090	0.144			
$\overline{\alpha_{at}}$ (dB·km ⁻¹)	0.017	0.027	0.016	0.013	0.162	0.432	0.272	0.642	0.270	0.142	0.201			
$S_{\alpha_{at}}$ (dB·km ⁻¹)	0.004	0.004	0.001	0.001	0.006	0.009	0.054	0.071	0.057	0.032	0.048			
$\overline{h_e}$ (km)	3.68	2.78	3.91	4.27	3.760	2.78	2.580	2.240	2.450	3.000	2.700			
S_{h_e} (km)	0.46	0.37	0.51	0.20	0.080	0.130	0.120	0.211	0.110	0.151	0.133			
$\overline{A_{at}}$ (dB)	0.066	0.007	0.062	0.06	0.611	1.340	0.700	1.640	0.690	0.470	0.553			
$S_{A_{at}}$ (dB)	0.002	0.003	0.001	0.001	0.080	0.111	0.181	0.215	0.162	0.060	0.082			

大气衰减随仰角变化的实测值和理论计算值见表 2. 表 2 中 $\overline{A_{at}}$ 是实测值, $\overline{A_{at}}$ 是理论值.

表 2 不同仰角的大气衰减
Table 2 Atmospheric attenuation for different elevation angles

频率 (GHz)	大气衰减 (dB)	仰角 (°)															
		3				10				20				40			
		春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
9.375	A_{at}	1.11	1.36	1.10	1.05	0.34	0.42	0.35	0.33	0.19	0.23	0.18	0.18	0.10	0.12	0.10	0.09
	A_{at}	1.32	1.63	1.13	1.20	0.37	0.44	0.37	0.35	0.20	0.21	0.19	0.18	1.10	0.13	0.10	0.08
20.6	A_{at}	12.82	22.04			3.84	7.68			2.26	3.85			1.40	2.42		
	A_{at}	13.19	22.83			3.91	7.78			2.86	4.14			1.44	2.45		
22.235	A_{at}	14.37	14.37	10.73		4.48	9.00	4.13		2.17	3.62	2.14		1.14	2.42	1.12	
	A_{at}	16.55	30.93	12.64		5.27	9.91	5.22		3.92	5.04	2.72		1.84	3.01	1.73	
31.6	A_{at}	7.09	9.79			2.25	3.09			1.24	1.55			0.65	0.82		
	A_{at}	8.06	11.45			3.00	3.54			1.27	1.73			0.66	0.81		

4 分析

4.1 大气等效高度与地面水汽密度的关系

假定大气等效高度 h_e 与地面水汽密度 ρ_0 成线性关系, 即

$$h_e = m + n\rho_0, \quad (11)$$

式(11)中 m 和 n 是回归系数. 我们把实测的 h_e 和 ρ_0 代入式(11)完成了回归, 各波段的 m 、 n 值及 h_e 与 ρ_0 的相关系数 $\gamma(h_e, \rho_0)$ 见表 3.

表 3 各波段的 m 、 n 值及其标准偏差
Table 3 The regression coefficient and standard deviation at each band

波段 (GHz)	m	n	$\gamma(h_e, \rho_0)$	s_m	s_n
9.375	5.97	-0.060	0.69	0.32	0.02
20.60	6.33	-0.308	0.72	0.26	0.17
22.235	6.41	-0.331	0.76	0.23	0.16
31.60	6.32	-0.271	0.86	0.20	0.09

分析中只选用了 $\rho_0 \leq 14 \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的数据, 所以表 3 中的 m 、 n 只适用于低温和中湿的情况. 由表 3 可见大气等效高度与地面水汽密度的相关性.

4.2 各波段大气等效高度的比较

由表 1 可见, 9.375、20.6 和 31.6GHz 频段夏季的等效高度近似相等, 春季的等效高度相差也不大, 其它季节这 3 个频段的大气等效高度的情况有待进一步研究.

由表 1 还可见, 22.235GHz 频段实测等效高度在同一季节里比其它 3 个频段都低, 这是由于 22.235GHz 频段是水汽分子谐振吸收的频段, 其吸收系数比其它频段大得多, 所以实测结果是合理的.

4.3 等效高度随季节变化的规律

由表 1 可见, 大气等效高度随季节变化的规律是夏季最低, 春秋季节次之, 冬季最高, 从式(11)和表 2 可见, 地面水汽密度愈高, 大气吸收系数愈大, h_e 愈低, 由此可见等效高度随季节的变化是水汽随季节变化的反映, 大的吸收系数对应低的等效高度.

4.4 大气衰减随仰角变化的规律

从表 2 可见, 实测大气衰减值随仰角升高而降低, 仰角大于 20° 时, 衰减随仰角呈余割变化, 其变化规律与式(5)一致. 仰角小于 20° 时实测结果随仰角降低逐步偏离式(5)计算结果, 而与以式(9)代入式(6)的计算结果一致. 当仰角低于 5° 时, 实测值逐步偏离以式(9)代入式(6)的计算值, 两者偏离值随仰角减小而增大. 我们认为这种现象是由地面辐射, 散射和反射的能量进入天线波瓣而造成的.

4.5 实测结果与理论计算结果的比较

4.5.1 实测等效高度与理论值的比较

实测等效高度是指把实测 A_{ao} 和 α_{ao} 代入式(10)算出的 h_e , 理论等效高度是指用 Clough、

Liebe 和 CCIR^[5]的模式算出 A_{∞} 和 α_{∞} 代入式(10)算出的 h_e . 实测 h_e 和理论计算的 h_e 随 ρ_0 的变化见图 1. 图 1 给出的数值都是年平均值. 由图 1 可见, 在 $\rho_0 \leq 14 \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 情况下 Clough 与 Liebe 的计算结果非常接近, CCIR 的计算结果偏大. 但这 3 种方法的计算值都小于实测值, 这是实测 α_{∞} 值偏小造成的. 应该指出, 实测 h_e 偏高不会引起大气衰减值偏大, 因为大气衰减值等于吸收系数与等效高度之积.

4.5.2 大气衰减随仰角变化的实测值与理论值的比较

当仰角 $E=90^\circ$ 时, 由表 1 可见, 在 9.375、20.6 和 31.6GHz 频段的天顶衰减的实测值与理论值非常接近, 这说明用实测 h_e 和 α_{∞} 计算 A_{∞} 与用理论 h_e 和 α_{∞} 计算 A_{∞} 结果是一致的. 而在 22.235GHz 频段, 实测的 A_{∞} 明显小于理论的 A_{∞} , 这是由于辐射计工作频率与理论计算采用的频率不完全一致所引起的.

在仰角 $E > 20^\circ$ 时, 由表 2 可见, 实测 A_e 略小于理论值, 两者之差随仰角增加而减小, 当 E 接近 40° 时, 其差值接近零. 由此可见, 当 $E > 40^\circ$ 时可以把大气看作平面分层, 即可用式(5)计算大气衰减. 当 $20^\circ \leq E \leq 40^\circ$ 时, 实测与理论值之差很小, 在工程中可以忽略不计, 式(5)仍可使用, 因此在这个范围里可把大气近似看作为平面分层.

当 $E < 20^\circ$ 时, 实测 A_e 仍然小于理论值. 两者之差随仰角减小而增大. 造成此现象的原因主要有: 低仰角大气折射量较大, 折射使实测仰角比真实仰角小, 造成 A_e 实测值小于理论值. 在 $E < 5^\circ$ 时, 除折射影响外, 地面辐射、散射和反射能量使天线升温, 也使 A_e 实测值减小.

5 结语

研究结果表明, 利用大气等效高度和地面大气吸收系数计算各个仰角的大气衰减是既简便又有效的方法, 32~9.5mm 波段的大气等效高度可用表 3 的回归系数代入式(11)算出, 地面大气吸收系数可把地面气象数据代入式(2)~式(4)算出, 这种方法不需要气象探空资料, 也不受地理位置限制. 这些研究结果对毫米波定位、通讯、遥感和射电天文的研究均有实用价值.

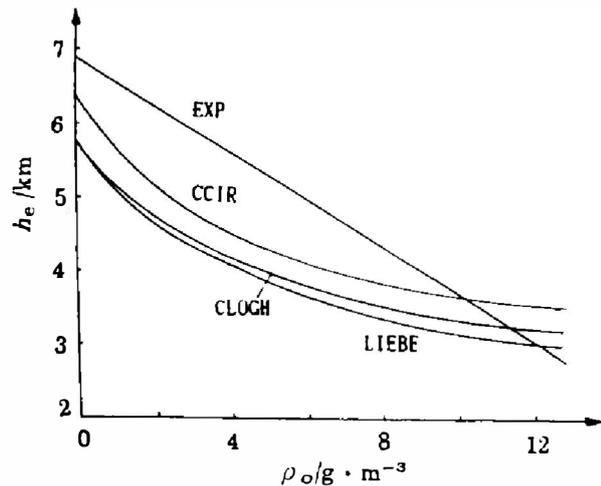


图 1 实测等效高度与理论值的比较
Fig. 1 Comparison between the experimental and theoretical values of effective height

参考文献

- 1 贾瑞进, 王凤霞, 赵益光. 电波科学学报, 1991, 6(1,2): 78-80
- 2 Altshuler E E. IEEE, 1986, Ap34: 717-718

- 3 Christian. *Radio Sci*, 1992, 27(3):211-230
- 4 张忠治, 李 兰, 贾瑞进. *电波科学学报*, 1986, 1(2):1-10
- 5 李 兰. *电波科学学报*, 1988, 3(1):1-8

EXPERIMENTAL STUDY ON THE DEPENDENCE OF ATMOSPHERIC ATTENUATION ON ELEVATION ANGLE AT WAVELENGTH BETWEEN 9.5~32mm

Jia Ruijin Wang Fengxia

(China Research Institute of Radiowave Propagation, Xinxiang, Henan 453003, China)

Abstract On the basis of the measurement and analysis about the atmospheric attenuation at 32, 14.6, 12.5 and 9.5mm bands, the dependence of atmospheric attenuation on elevation angle is studied in this paper. The simplified formula to calculate the atmospheric attenuation for the elevation angle of $3\sim 90^\circ$ is discussed. The dependence of the effective height of atmosphere on the surface vapor density is given. Finally, the difference between the experimental and theoretical values is analyzed and discussed.

Key words atmospheric attenuation, effective height of atmosphere.