

不同类型降水对毫米波传播特性的影响研究

刘西川¹, 刘磊^{1*}, 高太长¹, 任景鹏²

(1. 解放军理工大学气象海洋学院, 江苏南京 211101;

2. 解放军93811部队气象中心, 甘肃兰州 730020)

摘要: 为了提高复杂降水条件下毫米波传播衰减的评估精度, 通过分析多个地区的降水谱特征, 得出具有代表性的层状云降雨、积层混合云降雨、积雨云降雨以及干雪、湿雪的谱分布参数, 然后结合降水粒子的形状、相态、介电模型, 计算降水体目标在毫米波波段的散射特性。结果表明, 降水强度不是唯一影响毫米波传播衰减的因素; 降水粒子相态、谱分布、入射波频率和温度等对毫米波传播特性均有不同程度的影响, 其中谱分布和数密度是影响降雨对毫米波衰减的主要因素; 冰水构成比例是影响降雪对毫米波衰减的主要因素; 不同相态的降水, 尤其是干雪、湿雪和雨对毫米波传播影响的差异较大; 而温度的影响较小。并建立了考虑谱分布和温度的降水衰减模型。

关键词: 降水粒子; 类型; 谱分布; 毫米波; 衰减特性

中图分类号: P407.7 **文献标识码:** A

Effect of different precipitation on characteristics of millimeter wave propagation characteristics

LIU Xi-Chuan¹, LIU Lei^{1*}, GAO Tai-Chang¹, REN Jing-Peng²

(1. College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;

2. Center of Meteorology, Unit No.93881 of PLA, Lanzhou 730020, China)

Abstract: To promote the evaluation precision of millimeter wave transmission attenuation in the complex precipitation condition, representative size distribution parameters for five kinds of precipitations (stratiform rain, mixed stratiform and cumulonimbus rain, cumulonimbus rain, dry snow and wet snow) were obtained by analysis of precipitation characteristics in many areas. Combined with the shape, phase and dielectric model of the precipitation particles, the scattering characteristics of precipitation particle clusters at the millimeter waveband were calculated. The numerical simulation results show that the precipitation intensity is not the only factor that influence the millimeter wave propagation characteristics; the phase of particle, drop size distribution, incidence wave frequency and temperature have different effects on the millimeter wave propagation. The size distribution and number density are the main factors influencing the millimeter wave propagation attenuated by rain. The composition of ice and water are the main factors influencing the millimeter wave propagation attenuated by snow. The phase of precipitation particles also have strong effect on the millimeter wave propagation. There are distinct differences between the snow and rain. The temperature is the least factors. At precipitation attenuation model was established based on the drop size distribution and temperature is established.

Key words: precipitation particles; types; size distribution; millimeter wave; attenuation characteristics

PACS: 92.60.Ta, 42.68.Ay

引言

微波在大气中传播时会受到大气介质的影响而发生吸收、衰减、散射、极化以及传播路径的弯曲等, 其中降水现象对毫米波等较短波长的影响尤为明

显, 从而大大影响了基于毫米波的通信、制导、遥感等系统的性能^[1], 因此研究降水在毫米波段的散射和衰减特性对民用和军用均具有重要的实际意义。由于降水对电磁波的衰减与降水的物理模型、电波的极化方向、工作波长、接收地点的位置及海拔高度

收稿日期: 2012-03-23, 修回日期: 2012-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(41076118, 41205125)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (41076118, 41205125)

作者简介 (Biography): 刘西川(1985-), 男, 河北清河人, 博士研究生, 主要研究领域为大气遥感与大气探测, E-mail: liuxc85@gmail.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: dll@live.ca

Received date: 2012-03-23, revised date: 2012-10-21

等诸多因素有关,而且实际降水在时间和空间上是不均匀的,降水存在雨、雪、冰雹等多种相态,雨、雪、冰雹的形状各不相同,而且谱分布更是随地域、时间的变化而变化,这些因素导致降水具有复杂的散射特性,从而使得难以精确估计降水的衰减。

国内外学者围绕这方面做了很多理论和实验方面的研究工作^[2-3],目前比较成熟的雨衰模型有 ITU-R 模型^[4]、Crane 模型、MPM 模型等^[5],张在峰^[6]研究干雪和潮湿雪在毫米波段的衰减率和反射率及其对毫米波雷达性能的影响,毛天鹏等^[7]给出在降雨影响下微波在大气中传输衰减的计算模型,刘西川等^[1]研究了降雨的谱分布对微波传播的影响。工程上往往对降水采取某种等效的经验公式来描述,但从物理角度而言,对降水结构进行精确的数学描述才是问题的关键。因此为了获取复杂降水条件下的毫米波传播特性,本文首先通过统计多个地区的降水谱特征,得出具有代表性的层状云降雨、积层混合云降雨、积雨云降雨以及干雪、湿雪的谱分布参数,然后结合降水粒子的形状、相态和介电模型,利用 T 矩阵法计算不同类型降水体目标在毫米波波段的衰减特性,讨论分析降水强度、相态、谱分布、入射波频率和温度等对毫米波传播特性的影响,并建立了考虑谱分布和温度的降水衰减模型。

1 降水粒子的物理性质及散射特性

降水粒子的形状、谱分布和折射率等物理性质是决定其散射特性的重要因素,随着大气探测技术的发展,这些物理性质都得到了更深入的认识,从而为降水散射特性的进一步了解奠定了准确的物理基础。

1.1 降水粒子形状

雨滴在空气中自由降落时受表面张力、空气动力、内部压力等作用,呈现底部平坦、顶部圆滑的形状,目前,雨滴形状有 PB 模型^[8]、PP 模型^[9]、BC 模型^[10]、近似椭球模型^[11]等多种模型。在实际的天气雷达探测、卫星遥感等应用中,大多将轴比(竖直轴与水平轴之比 b/a)作为描述雨滴形变的参数,本文采用 Thurai 和 Bringi 等^[12-13]得到的最新的轴比(b/a)与等效直径(D_{eq})的关系式(简称 TB 模型):

$$\frac{b}{a} = 1.065 - 6.25 \times 10^{-2} D_{eq} - 3.99 \times 10^{-3} D_{eq}^2 + 7.66 \times 10^{-4} D_{eq}^3 - 4.095 \times 10^{-5} D_{eq}^4 \quad (1)$$

雪花由多种冰雪晶聚合而成,多呈白色不透明枝状、六角形片状等,其直径一般在 2~3 mm 之间,

最大等效水滴直径可达 15 mm^[14]。根据文献^[6],直径小于 10 mm 的雪花,其水平尺寸/高度比的平均值接近于 1,直径大于 10 mm 的雪花,此比值的平均值接近于 0.9,而即使是水平尺寸/高度比为 0.9 的雪花,其散射特性也基本与球形情况一样,因此本文采用球形雪粒假定。

1.2 粒子谱分布

实际的降水粒子谱分布随地域、降水云和大气状态的不同而变化,目前常用的是 Gamma 谱分布:

$$N(D) = N_0 D^\mu e^{-\lambda D} \quad (2)$$

其中, D 为粒子的等效直径(mm), N_0 为浓度参数, λ 为尺度参数, R 为雨强(mm/h)。Gamma 分布对各类降水谱的拟合效果都很好,我国大部分降水符合这一分布^[15]。对于降雪,参数设置如下^[6]: $N_0 = 3.8 \times 10^3 R^{-0.87} \rho_s^{1/3}$, $\lambda = 2.55 R^{-0.48} \rho_s^{1/3}$, $\mu = 0$,其中干雪的密度 $\rho_{s,dry} = 0.017 D^{-1}$,湿雪的密度 $\rho_{s,wet} = 0.0724 D^{-1}$ ^[16]。

为了讨论不同降水对毫米波传播的影响,统计江苏^[17]、河南^[18]、黑龙江^[19]、宁夏^[20]、广东^[21]等不同地区测量的降水粒子谱分布,经分析后得出具有代表性的层状云降雨、积层混合云降雨、积雨云雨以及干雪、湿雪的典型谱分布参数,如表 1 所示。图 1 给出了降水强度为 10 mm/h 时的五类降水的谱分布,并与典型 MP 谱分布进行比较。

表 1 不同类型降水谱分布的典型参数

Table 1 Parameters of drop size distribution of different precipitations

降水类型	$N_0/(m^{-3}mm^{-1})$	$\lambda/(mm^{-1})$	μ
层状云降雨	$2.1 \times 10^4 R^{-0.384}$	$5.38 \times R^{-0.186}$	2.93
积层混合云降雨	$2.3 \times 10^3 R^{-0.384}$	$3.42 \times R^{-0.186}$	1.88
积雨云降雨	$0.4 \times 10^3 R^{-0.384}$	$1.74 \times R^{-0.186}$	0.91
干雪	$3.8 \times 10^3 R^{-0.87} \rho_{s,dry}^{1/3}$	$2.55 \times R^{-0.48} \rho_{s,dry}^{1/3}$	0
湿雪	$3.8 \times 10^3 R^{-0.87} \rho_{s,wet}^{1/3}$	$2.55 \times R^{-0.48} \rho_{s,wet}^{1/3}$	0

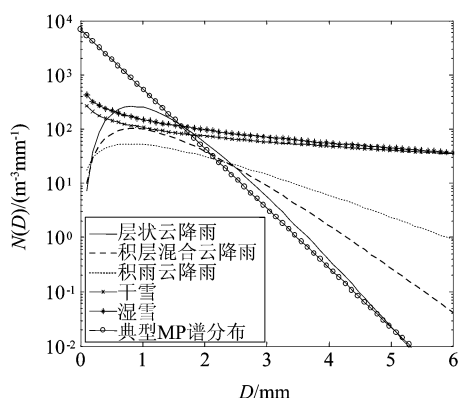
由图 1 可知,对于降雨,层状云降雨中小雨滴的数密度最大,积雨云降雨中大雨滴的数密度最大,而积层混合云降雨介于两者之间;对于降雪,湿雪在小滴段的数目大于干雪在小滴段的数目,而在大滴段则基本一致;典型的 MP 分布仅在大滴段与层状云降雨一致,与其他类型的降雨均有不同的偏差。

1.3 粒子折射率

水和冰的折射指数 $m(f, T)$ 是频率 f 和温度 T 的函数,与介电常数 $\varepsilon(f, T)$ 的关系为^[22]:

$$m(f, T) = \sqrt{\varepsilon(f, T)} = \sqrt{\varepsilon' - i\varepsilon''} \quad (3)$$

纯水和纯冰的复折射率计算公式见文献^[23]。雪

图1 不同类型降水的粒子谱分布($R = 10 \text{ mm/h}$)Fig. 1 Particle size distribution of different precipitation ($R = 10 \text{ mm/h}$)

存在干雪、潮雪、湿雪等多种形式,其介电常数取决于水和冰的比例^[6]:

$$\begin{cases} \varepsilon_s = \frac{1 + uF}{1 - F} \\ F = W \frac{\varepsilon_{\text{water}} - 1}{\varepsilon_{\text{water}} + u} + \frac{\sqrt{W} - W}{0.92} \cdot \frac{\varepsilon_{\text{ice}} - 1}{\varepsilon_{\text{ice}} + u} \end{cases}, \quad (4)$$

其中, W 为水在雪花中的体积比, u 为形状数.对于干雪, $W = 0.05\%$, $u = 2$;对于湿雪, $W = 3\%$, $u = 20$.

1.4 单个粒子的散射特性

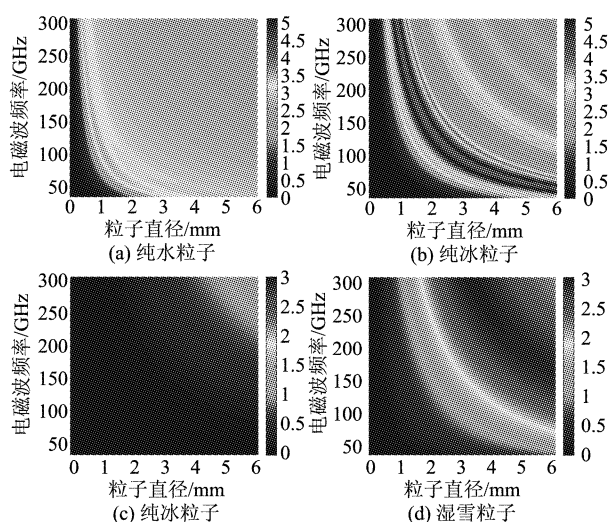
图2为利用T矩阵法^[24]计算 $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时纯水、纯冰、干雪、湿雪四种粒子的衰减效率因子,四种粒子随直径和电磁波频率的变化呈现复杂的变化特征,其中,纯水粒子在小滴段的衰减效率因子大于纯冰粒子的衰减效率因子,在大滴段则正相反,而且纯冰粒子的衰减效率因子随直径和频率的变化呈现波动的特征;湿雪和干雪的衰减效率因子普遍小于纯水和纯冰粒子的衰减效率因子,湿雪的衰减效率因子大于干雪的衰减效率因子,这主要是由雪花的冰水成分决定的.

2 降水对毫米波传播的影响

降水粒子符合独立散射的条件,因此可以通过多个粒子散射的线性叠加计算得到单位体积内粒子的散射特性^[25],降水粒子群的衰减系数为:

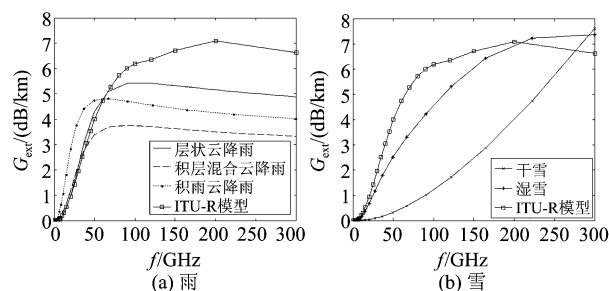
$$G_{\text{ext}}(\text{dB/km}) = 10 \log_{10} e \int_0^\infty \frac{\pi D^2}{4} Q_{\text{ext}}(D) N(D) dD \quad (5)$$

其中, $N(D)$ 为降水粒子的尺度谱分布, Q_{ext} 为单个粒子的衰减效率因子.

图2 不同类型降水粒子在毫米波段的衰减效率因子($T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$)Fig. 2 Extinction efficiency of different precipitation particles at millimeter waveband ($T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$)

2.1 频率的影响

设温度 $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$,降雨强度 $R = 10 \text{ mm/h}$,降水对毫米波的衰减系数随频率的变化情况如图3所示,并与ITU-R雨衰模型进行比较.图3(a)中层状云降雨与积层混合云降雨在低频段基本一致,积雨云降雨则大于前两者,降雨衰减系数在高频段从大到小依次为层状云降雨、积雨云降雨和积层混合云降雨;ITU-R模型在低频段与层状云降雨、积层混合云降雨基本一致,比积雨云降雨偏低,在高频段比三类降雨的衰减系数偏高.图3(b)中干雪在低频段的衰减系数远小于湿雪的衰减系数,当频率超过270 GHz时干雪的衰减系数超过湿雪的衰减系数;ITU-R模型与湿雪衰减系数的变化趋势基本一致,但是低频段偏高,在高频段偏低.图3(a)与图3(b)相

图3 降水衰减系数随频率的变化($T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $R = 10 \text{ mm/h}$)Fig. 3 Attenuation coefficient of different precipitation versus frequency ($T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $R = 10 \text{ mm/h}$)

比,在低频段,衰减系数从大到小依次为积雨云降雨、积层混合云降雨、层状云降雨、湿雪和干雪;在高频段,衰减系数从大到小依次为湿雪、层状云降雨、积雨云降雨、积层混合云降雨、干雪;而 ITU-R 模型只能代表一般的层状云降雨和湿雪,与积层混合云降雨、积雨云降雨、干雪的差异较大。

2.2 降水强度的影响

选取常用的 35 GHz、94 GHz 和 140 GHz 频段,设温度 $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$,分别对不同降水强度条件下毫米波穿过降水介质后的衰减系数进行分析,如图 4 所示.在 35 GHz 频段,当降水强度小于 65 mm/h 时,衰减系数从大到小依次为湿雪、层状云降雨、积雨云降雨、积层混合云降雨和干雪,当降水强度大于 65 mm/h 时,衰减系数从大到小依次为湿雪、层状云降雨、积层混合云降雨、积雨云降雨和干雪,其中,ITU-R 模型和层状云降雨的变化趋势基本一致;在 94 GHz 频段,ITU-R 模型与层状云降雨、干雪、湿雪的变化趋势基本一致,与积层混合云降雨和积雨云降雨差别较大;在 140 GHz 频段,当降水强度小于 30 mm/h 时,衰减系数从大到小依次为干雪、湿雪、层状云降雨、积雨云降雨和积层混合云降雨,当降水强度大于 30 mm/h 时,衰减系数从大到小依次为干雪、湿雪、层状云降雨、积层混合云降雨和积雨云降雨,其中,ITU-R 模型和层状云降雨和湿雪的变化趋势基本一致;三个频段相比较而言,不同类型降水的衰减系数存在较大的差异,ITU-R 模型仅能够描述一般的层状云降雨和湿雪的情况,与积层混合云降雨、积雨云降雨、干雪的差异较大。

2.3 温度的影响

选取 35 GHz、94 GHz 和 140 GHz 频段,降水强度 $R=10\text{ mm/h}$,分别对不同温度条件下毫米波穿过降水介质后的衰减系数进行分析,如图 5 所示.在 35 GHz 频段,衰减系数从大到小依次为积雨云降雨、层状云降雨、积层混合云降雨、湿雪和干雪,其中湿雪衰减系数随温度的变化率最大,从 251 K 到 273 K 增大了约 28%;在 94 GHz 频段,湿雪衰减系数随温度的变化率最大,从 251 K 到 273 K 增大了约 15%;在 140 GHz 频段,衰减系数从大到小依次为湿雪、层状云降雨、积雨云降雨、积层混合云降雨和干雪,其中湿雪衰减系数的变化率最大,从 251 K 到 273 K 增大了约 9%.综合比较而言,温度对湿雪的影响最大,对雨的影响较小,从 271 K 到 300 K 范围内最大变化率不超过 4%。

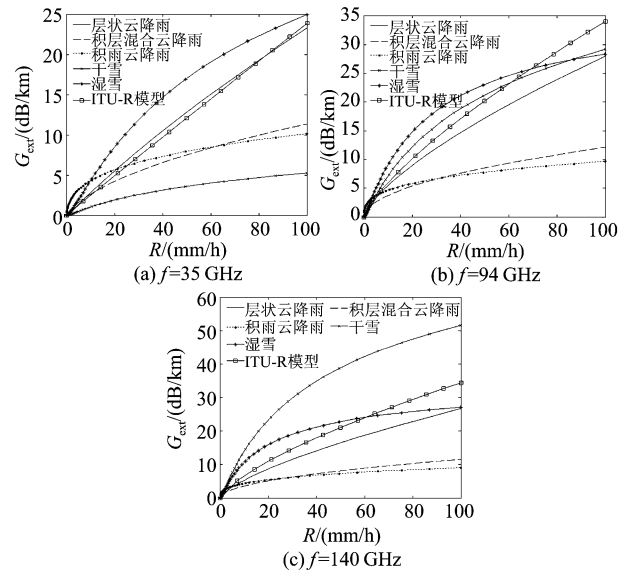


图 4 降水衰减系数随降水强度的变化 ($T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig. 4 Attenuation coefficient of different precipitations versus precipitation intensity ($T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$)

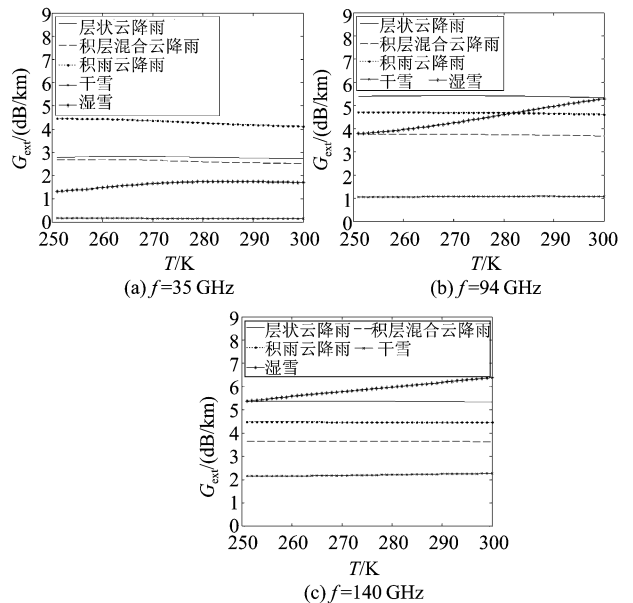


图 5 降水衰减系数随温度的变化 ($R=10\text{ mm/h}$)
Fig. 5 Attenuation coefficient of different precipitation versus temperature ($R=10\text{ mm/h}$)

3 衰减模型的改进与建模

为了满足复杂降水条件下毫米波传播评估的需求,分别针对层状云降雨、积层混合云降雨、积雨云降雨、干雪和湿雪五种不同相态和谱分布的降水,在 ITU-R 模型的基础上考虑衰减系数与温度之间的近似线性关系,通过拟合建立基于指数函数的衰减系

数与温度、电磁波频率的经验关系:

$$G_{\text{ext}} = a + bt + (c + dt)R^e, \quad (6)$$

其中, t 为温度($^{\circ}\text{C}$), R 为降水强度(mm/h), a 、 b 、 c 、 d 、 e 分别为对应衰减系数的参数, 如表 2 所示, 其中降雨适用的温度范围为 $t \geq -10^{\circ}\text{C}$, 降雪适用的温度范围为 $t \leq 0^{\circ}\text{C}$.

4 结论

在降水粒子谱分布、形状、相态和介电模型的基础上, 利用 T 矩阵法计算不同类型降水体目标在毫米波波段的衰减特性, 讨论降水强度、相态、谱分布、入射波频率和温度等对毫米波传播特性的影响, 并建立考虑谱分布和温度的降水衰减模型. 结果表明,

降水强度并不是影响降水对微波衰减的唯一因素, 降水粒子相态、谱分布和温度对毫米波传播衰减均有不同程度的复杂影响; 在相同降水强度下, 不同相态和不同谱分布降水的衰减系数最大可能相差数倍, 这一影响不能忽略, 而温度的影响则相对较小; 与 ITU-R 雨衰模型相比发现, 本文研究的基于统计实测谱分布的降水对毫米波传播的衰减模型, 将谱分布和温度均考虑在内, 可以为多种复杂降水条件下毫米波传播衰减的精确评估提供更准确的依据. 但在实际应用中实际降水特征难以实时获取, 也就限制了雨衰模型的优化选择. 下一步考虑建立基于归一化粒子谱分布的微波衰减模型, 并进行实测检验.

表 2 五种类型降水衰减系数的计算参数

Table 2 Parameters of attenuation coefficient of precipitation

频率	降水类型	a	b	c	d	e
30 GHz	层状云降雨	-0.106 2	-4.5×10^{-4}	0.270 8	1.9×10^{-4}	0.942 1
	积层混合云降雨	-0.169 5	-7.2×10^{-4}	0.534 8	-5.8×10^{-4}	0.654 4
	积雨云降雨	-0.705 4	-2.6×10^{-3}	2.049 9	-4.2×10^{-3}	0.360 1
	干雪	-0.139 3	-2.8×10^{-4}	0.211 3	-6.6×10^{-4}	0.652 0
	湿雪	-0.627 4	5.9×10^{-3}	0.877 2	7.5×10^{-3}	0.727 6
50 GHz	层状云降雨	-0.240 1	-7.7×10^{-4}	0.763 7	-1.2×10^{-3}	0.780 9
	积层混合云降雨	-0.269 5	-8.3×10^{-4}	1.055 2	-1.8×10^{-3}	0.539 9
	积雨云降雨	-0.682 6	-2.0×10^{-3}	2.668 1	-4.9×10^{-3}	0.307 6
	干雪	-0.427 7	-6.3×10^{-3}	0.665 9	-1.3×10^{-4}	0.611 7
	湿雪	-1.290 9	0.012	1.939 8	0.019	0.602 9
75 GHz	层状云降雨	-0.212 2	-6.3×10^{-4}	1.051 9	-1.2×10^{-3}	0.717 4
	积层混合云降雨	-0.204 8	-6.3×10^{-4}	1.232 3	-1.6×10^{-3}	0.504 3
	积雨云降雨	-0.401 8	-1.3×10^{-3}	2.593 4	-3.4×10^{-3}	0.301 0
	干雪	-0.977 0	-7.8×10^{-4}	1.541 9	10.3×10^{-4}	0.581 8
	湿雪	-2.102 6	0.013	3.217 9	0.022	0.508 0
100 GHz	层状云降雨	-0.141 3	-5.9×10^{-4}	1.115 6	-9.5×10^{-4}	0.699 6
	积层混合云降雨	-0.128 9	-5.2×10^{-4}	1.235 2	-1.1×10^{-3}	0.496 5
	积雨云降雨	-0.225 9	-8.4×10^{-4}	2.436 1	-2.2×10^{-3}	0.303 0
	干雪	-1.726 5	-1.4×10^{-3}	2.736 0	1.9×10^{-3}	0.557 8
	湿雪	-2.934 6	0.013	4.484 0	0.02	0.439 3
150 GHz	层状云降雨	-0.053 7	-3.3×10^{-4}	1.093 8	-4.9×10^{-4}	0.692 5
	积层混合云降雨	-0.046 5	-2.6×10^{-4}	1.170 5	-4.8×10^{-4}	0.495 9
	积雨云降雨	-0.071 4	-2.9×10^{-4}	2.213 8	-0.7×10^{-3}	0.308 0
	干雪	-3.884 9	-2.6×10^{-3}	6.124 6	3.4×10^{-3}	0.510 3
	湿雪	-4.316 8	0.014	6.554 0	0.021	0.355 6
200 GHz	层状云降雨	-0.017 5	-1.2×10^{-4}	1.049 1	-1.9×10^{-4}	0.693 0
	积层混合云降雨	-0.013 9	-0.9×10^{-4}	1.114 2	-1.4×10^{-4}	0.498 1
	积雨云降雨	-0.016 0	-3.5×10^{-3}	2.082 3	0.85×10^{-4}	0.311 4
	干雪	-7.127 1	-6.5×10^{-3}	11.043 7	0.024 8	0.457 3
	湿雪	-5.233 4	0.016	7.927 4	0.024	0.311 5
300 GHz	层状云降雨	0.005 1	-2.3×10^{-4}	0.982 9	0	0.696 1
	积层混合云降雨	0.005 8	0	1.042 9	0.3×10^{-4}	0.501 9
	积雨云降雨	0.013 7	-0.25×10^{-4}	1.937 7	1.4×10^{-4}	0.315 0
	干雪	-18.684 1	-0.038 9	27.064 4	0.049 9	0.335 4
	湿雪	-6.003 3	6.7×10^{-3}	9.199 7	0.013	0.271 5

REFERENCES

- [1] LIU Xi-Chuan, GAO Tai-Chang, QIN Jian, *et al.* Effects analysis of rainfall on microwave transmission characteristics[J]. *Acta Physica Sinica* (刘西川, 高太长, 秦健, 等. 降雨对微波传输特性的影响分析. *物理学报*), 2010, 59(3): 2156-2162.
- [2] Lhermitte R. Attenuation and scattering of millimeter wavelength radiation by clouds and precipitation[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1990, 7(6): 464-479.
- [3] Thurai M, Bringi V N, Rocha A. Specific attenuation and depolarisation in rain from 2-dimensional video disdrometer data[J]. *IET Microw. Antennas Propag.*, 2007, 1(2): 373-380.
- [4] P. 618-1, I. -R. , Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems, ITU-R Recommendations, P Series Volume, Radiowave propagation. 1996; Geneva.
- [5] YANG Rui-Ke. Research on the electromagnetic wave (light) propagation on earth-space paths [D]. Xi'an: Xidian University (杨瑞科. 对流地层-空路径电磁(光)波传播的若干问题研究. 西安: 西安电子科技大学). 2003.
- [6] ZHANG Zai-Feng. Electromagnetic scattering of snows and their effects on radar performance in MM wave band [J]. *Chinese Journal of Radio Science* (张在峰. 毫米波段雪的电磁散射及对雷达性能的影响. *电波科学学报*), 1999, 14(2): 178-185.
- [7] MAO Tian-Peng, ZHOU Dong-Fang, NIU Zhong-Xia, *et al.* The calculation model of attenuation due to clouds or fog and the analysis of its characteristics [J]. *Wireless Communications Technology* (毛天鹏, 周东方, 牛忠霞, 等. 毫米波云雾衰减计算模型及特性分析. *无线通信技术*), 2004, 13(3): 51-54.
- [8] Pruppacher H R, Beard K V, A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1970, 96: 247-256.
- [9] Pruppacher H R, Pitter R L. A semi-empirical determination of shape of cloud and raindrops[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1971, 28(1): 86-94.
- [10] Beard K V, Chuang C. A new model for the equilibrium shape of raindrops[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1987, 44(11): 1509-1524.
- [11] LIU Lei, LI Hao, GAO Tai-Chang. The approximate ellipsoid model for raindrop and its near-infrared scattering characteristics [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (刘磊, 李浩, 高太长. 雨滴的近似椭球模型及其近红外散射特性研究. *气象科学*), 2008, 28(3): 271-275.
- [12] Thurai M, Bringi V N. Drop axis ratios from a 2D video disdrometer [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, 22(7): 966-978.
- [13] Thurai M, Huang G J, Bringi V N, *et al.* Drop shapes, model comparisons, and calculations of polarimetric radar parameters in rain. [J]. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 2007, 24(6): 1019-1032.
- [14] YANG Jun, CHEN Bao-Jun, YIN Yan. Physics of clouds and precipitation[M]. Beijing, Meteorology Press (杨军, 陈宝君, 银燕. 云降水物理学. 北京, 气象出版社), 2011: 103-109.
- [15] CHEN Bao-Jun, LI Zi-Hua, LIU Ji-Cheng, *et al.* Model of raindrop size distribution in three types of precipitation [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (陈宝君, 李子华, 刘吉成, 等. 三类降水云雨滴谱分布模式. *气象学报*), 1998, 56(4): 506-512.
- [16] LIU Xi-Chuan, GAO Tai-Chang, LIU Lei, *et al.* Influences of precipitation on atmospheric extinction coefficient and visibility [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (刘西川, 高太长, 刘磊, 等. 降水现象对大气消光系数和能见度的影响. *应用气象学报*), 2011, 21(4): 433-441.
- [17] PU Jiang-Ping, ZHANG Wei, JIANG Ai-Jun, *et al.* Characteristics of gamma raindrop size distribution based on the precipitation particle spectrometer [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (濮江平, 张伟, 姜爱军, 等. 利用激光降水粒子谱仪研究雨滴谱分布特性. *气象科学*), 2010, 30(5): 701-707.
- [18] SHI Ai-Li, ZHENG Guo-Guang, HUANG Geng, *et al.* Characteristics of raindrop spectra of stratiform cloud precipitation in autumn 2002 in Henan province [J]. *Meteorological Monthly* (石爱丽, 郑国光, 黄庚, 等. 2002年秋季河南省层状云降水的雨滴谱特征. *气象*), 2004, 30(8): 12-17.
- [19] YUAN Cheng, FAN Ling, LI Ya-Bin. Microphysical features of precipitation in spring and summer in Harbin [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (袁成, 樊玲, 李亚滨. 哈尔滨地区春夏季降水微结构特征. *南京气象学院学报*), 2001, 24(2): 250-257.
- [20] NIU Sheng-Jie, AN Xia-Lan, SANG Jian-Ren. Observational research on physical feature of summer rain drop size distribution under synoptic systems in Ningxia [J]. *Plateau Meteorology* (牛生杰, 安夏兰, 桑建人. 不同天气系统宁夏夏季降雨谱分布参量特征的观测研究. *高原气象*), 2002, 21(1): 37-44.
- [21] LI Jing-Xin, NIU Sheng-Jie, WANG Shi-Gong, *et al.* Precipitation characteristics related to raindrop size distribution in laminated hybrid cloud [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)* (李景鑫, 牛生杰, 王式功, 等. 积层混合云降水雨滴谱特征分析. *兰州大学学报(自然科学版)*), 2010, 46(6): 56-61.
- [22] Liebe H J, Hufford G A, Manabe T. A model for the complex permittivity of water at frequencies below 1 THz [J]. *International Journal of Infrared Millimeter Waves*, 1991, 12(7): 659-667.
- [23] Jonathan H J, Wu DL. Ice and water permittivities for millimeter and sub-millimeter remote sensing applications [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2004, 5: 146-151.
- [24] Mishchenko M I, Hovenier J W, Travis L D. Light scattering by nonspherical particles theory, measurements, and applications[M]. 2000, San Diego, California: Academic Press.
- [25] SHENG Pei-Xuan, MAO Jie-Tai, LI Jian-Guo, *et al.* Atmospheric physics[M]. Beijing, Beijing University Press (盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学. 北京, 北京大学出版社), 2003.