

降水对 Ku/Ka 频段星地链路衰减特性的影响研究

咸明皓, 刘西川, 姬文明, 蒲康, 胡帅, 高太长

(国防科技大学气象海洋学院, 江苏南京 211101)

摘要: 近年来, Ku 和 Ka 卫星在广播、通信和军事等领域应用数量越来越多, 传统的 Ku 和 Ka 频段星地链路降水衰减预报模型基于经验关系和理想假设, 考虑降水微物理特性不足, 针对此问题, 在实测降水粒子微物理特征的基础上定量分析了降水垂直分布、粒子形状、粒子取向、粒子相态等对 Ku 和 Ka 频段信号衰减的影响特性. 结果表明, 与考虑降水非均匀垂直分布的计算结果相比, ITU 和 SAM 模型是基于降水分布均匀的假设, 无法代表降水垂直分布不均匀时的衰减情况; 降水粒子形状和取向对衰减的影响较小, 在 13GHz 和 32GHz 频段, 球形和非球形粒子衰减值的平均绝对偏差均在 0.01dB 以下, 不同粒子取向时衰减系数的平均绝对偏差最大值为 0.00098dB/km 和 0.0207dB/km; 不同相态的降水引起的衰减差异较大, 衰减系数从大到小依次是湿雪、水和冰. 研究结果可以为 Ku 和 Ka 频段星地链路传播特性评估及降雨反演新方法提供基本的理论支撑和数据参考.

关键词: 星地链路; Ku/Ka 频段; 降水; 衰减

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2020)03-0417-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.03.001

Research on the Effect of Precipitation on the Attenuation Characteristics of Earth-Space Link at Ku/Ka Band

XIAN Ming-hao, LIU Xi-chuan, JI Wen-ming, PU Kang, HU Shuai, GAO Tai-chang

(College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing, Jiangsu 211101, China)

Abstract: In recent years, the number of satellites with Ku and Ka band has been increasing in the fields of broadcasting, communication and military. However, traditional prediction models of rain attenuation for earth-space links in Ku and Ka band are based on empirical relationships and ideal assumptions, which consider insufficient precipitation microphysical properties. Aiming at this problem, the effect of vertical distribution of precipitation, particle shape, particle orientation and phase on signal attenuation are quantitatively analyzed based on measured rainfall data. The results show that compared with the calculation results of nonuniform vertical structure of rainfall, ITU and SAM models are based on uniform precipitation distribution, which cannot represent the attenuation when the vertical rainfall is nonuniform. The particle shape and orientation affect the attenuation for a slight degree, the mean absolute error of attenuation from spherical and non-spherical raindrops are below 0.01dB at 13 GHz and 32 GHz, and the maximum mean absolute error of specific attenuation for different particle orientations is 0.00098dB/km and 0.0207dB/km. There are different attenuation caused by precipitation with different phases, the values in descending order is wetsnow, water and ice. These results will provide basic theoretical support and data reference for evaluation of propagation characteristics and estimation of rainfall by earth-space links at Ku and Ka band.

Key words: earth-space link; Ku and Ka band; precipitation; attenuation

1 引言

日益增长的数据传输速率需求和逐渐凸显的频谱

拥堵问题使得星地通信系统的工作频段已经超过 10GHz^[1]. 目前, 卫星广播和通信常用 Ku 和 Ka 频段, 并且随着对频带宽度需求的增加, 未来 EHF 波段也将应

用于星地通信系统中^[2]. 工作频率上升的同时,降水引起的信号衰落问题也凸显出来,这极大地降低了星地系统的实用性和可靠性. 因此,准确地预测降水引发的信号衰减十分必要. 目前,国内外已经在多个地区开展了大量的包括 Ku 和 Ka 波段在内的降水信号衰减实验,基于此建立了多个雨衰预报模型^[2-9],其中国际电联 (ITU) 的预报模型^[6]和 SAM (Simple Attenuation Model) 模型^[7]应用最为广泛,其中 ITU 模型根据实验数据得到幂律函数系数与电波频率、极化方式的详细经验关系,然后根据 0.01% 概率的年均单点统计降雨量计算任意概率条件下的雨致衰减;SAM 模型则给出了更为简单的幂律系数与电波频率的关系模型,并且结合统计数据得到层状云和对流云降水条件下雨强的水平分布模型,并在此基础上计算降水衰减. 在国内,杨瑞科等^[8]开展了测量青岛、海口和北京地区 Ku 和 Ka 波段星地链路降雨衰减时间序列的实验;张轶等^[9]提出了基于差分平稳时序的 Ka 波段雨衰预测的方法,与 ITU 模型相比具有参数少、计算量少的优势;刘西川等^[10-12]从降水粒子谱分布和粒子形状等微物理特征的角度计算降水衰减,结果表明与 ITU 等经验模型相比存在较大的差异.

此外,近年来出现了一种利用全球广泛分布的星地链路信号在大气中的信号衰落效应测量降水的新方法^[13,14],广播卫星、通信卫星在地面的接收站数量极为庞大,只要有星地信号的区域就可以测量降水,因此不仅能够进一步提高降水监测的时空分辨率,而且极大地扩大了探测范围. 但是星地链路在大气中传播时,降水区高度、降水的谱分布、粒子类型及形状等宏观特征随时空变化复杂,传统的基于概率统计的经验模型难以精准计算降水引起的衰减特征,无法直接用于反演降水. 本文在实测降水微物理资料的基础上,系统讨论并定量分析降水垂直分布、降水粒子物理特性等对 Ku 和 Ka 波段星地链路降水信号衰减的影响特征,为基于 Ku 和 Ka 波段星地链路的大气传播特性评估以及降雨场反演提供技术基础.

2 星地链路斜程传播的降水衰减理论

当星地链路信号穿过降水区域时(如图 1 所示),由于降水粒子对电磁波的吸收和散射作用会致使信号产生衰减. 对于某一空间范围内大量降水粒子的衰减,可以看作多个粒子吸收和散射作用的线性叠加,因此整条链路上降水引起的衰减可以表示为

$$A_{\text{rain}} = 4.343 \times 10^3 \iint Q_{\text{ext}}(\varphi, \psi, D) N(D, h) \csc \theta_h dD dh \quad (1)$$

其中, $Q_{\text{ext}}(\varphi, \psi, D)$ 是粒子的消光截面,为吸收截面与散

射截面的和, φ, ψ 表示粒子取向, D 是降水粒子等效直径表征粒子的形状,消光截面可以使用 T 矩阵法^[15] 计算得到,具体表示为^[16]:

$$Q_{\text{ext}} = -\frac{1}{k^2 |E_0|^2} \text{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-1}^n [a_{mn}(p_{mn})^* + b_{mn}(q_{mn})^*] \quad (2)$$

其中, a_{mn}, b_{mn} 为入射场展开系数, p_{mn}, q_{mn} 为散射场展系数, 四者均与粒子的形状、相态、取向有关.

$N(D, h)$ 为雨滴谱与垂直高度有关,不同的高度粒子谱不同,常用 Gamma 谱来代表实际谱分布^[17],对于某一高度 h ,其雨滴谱表达式为:

$$N(D, h) = N_0(h) D^{\mu(h)} e^{-\lambda(h)D} \quad (3)$$

其中, $N_0(h)$ 是浓度参数, $\mu(h), \lambda(h)$ 是尺度参数.

同时,根据粒子谱分布,再结合降水粒子下落末速度 $v(D, h)$ 和水的密度 ρ 可以得到空间内某一高度上的降水强度 R (mm/h):

$$\begin{cases} R = (\pi/6) \int_0^{\infty} N(D, h) \rho D^3 v(D, h) dD \\ v(D, h) = 9.65 - 10.3e^{-0.6D} \end{cases} \quad (4)$$

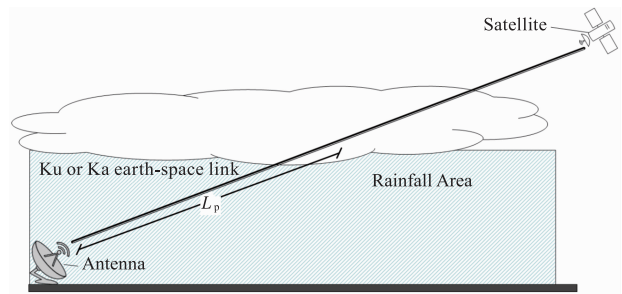


图1 星地链路示意图

3 星地链路传播降水衰减的影响分析

本文利用南京地区 2014 年 6 月 25 日微雨雷达和 OTTPARSIVEL 雨滴谱仪的实测资料分析降雨场特征,基于此定量分析降水垂直分布、降水粒子物理特性对星地链路信号传播衰减的影响. 此外,在仿真实验中,本文以在南京地区接收 ASIATASAT 5 卫星数据为例,所搭建的星地链路参数如表 1 所示.

表 1 星地链路仿真参数

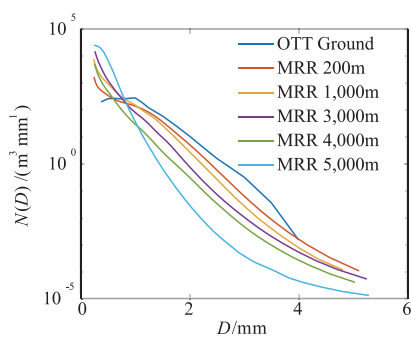
参数	数值
天线位置	32.06° N, 118.79° E
海拔高度	29m
仰角	43°
Ku 频点	13GHz
Ka 频点	32GHz
极化方式	垂直极化

3.1 降水垂直分布的影响

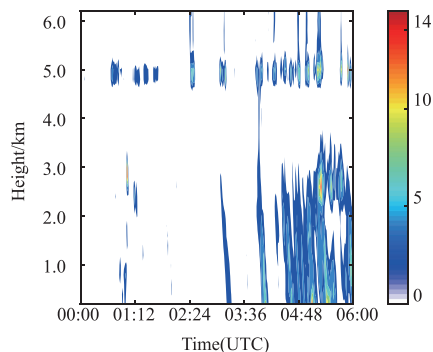
在自然条件下,由于蒸发、凝结、碰并增长等作用使得降水在垂直空间内分布并不均匀,基于南京地区 2014 年 6 月 25 日的微雨雷达^[18]和同一位置的 OTT PARSIVEL 雨滴谱仪^[19]数据得到降水垂直分布情况,图 2(a)为不同高度上雨滴谱分布的情况,具体谱参数如表 2 所示,图 2(b)为降雨强度的垂直分布示意图。

表 2 不同高度平均雨滴谱参数

Height	N_0	λ	μ
Ground	3.58×10^4	5.158	3.137
200m	2.32×10^4	4.964	2.467
1000m	8.46×10^3	3.761	0.244
3000m	2.08×10^3	2.501	-1.345
4000m	4.68×10^2	1.933	-1.621
5000m	7.36×10^5	7.280	0.947



(a)不同高度上的平均DSD



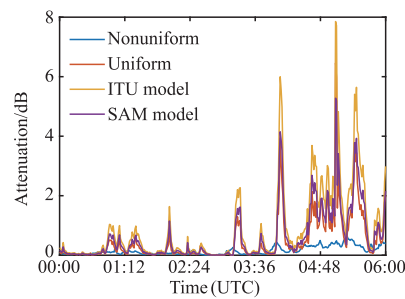
(b)降水强度垂直分布情况

图2 降水垂直分布

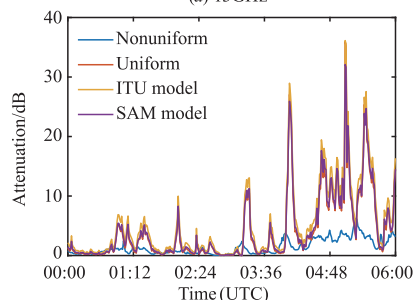
从图 2(a)中可以看到不同高度上的降水粒子数量均随粒子尺度的增加而减少,并且由于粒子在下落过程中的碰并作用导致高海拔处的小粒子数量多,低海拔处的大粒子数量多;从图 2(b)中可以看到在 4:00 - 6:00 期间出现了较为强烈的降水,也可以观察到相同时刻不同高度处的降水强度并不相同,这从宏观角度反映了降水垂直分布的不均匀。

Ku 和 Ka 频段信号在降水垂直分布均匀(Uniform)和不均匀(Nonuniform)条件下的降水衰减与 ITU 和 SAM 模型预报衰减值比较如图 3 所示。总体而言,Ku 和

Ka 波段在降水垂直分布不均匀情况下的衰减小于另外三者,在出现强降水的时段这种现象更为明显。同时,均匀条件下得到的衰减与 ITU 和 SAM 模型计算的衰减相比基本相同,整体而言,ITU 模型计算出的衰减值最大,SAM 模型次之,降水垂直分布均匀条件下的衰减最小。



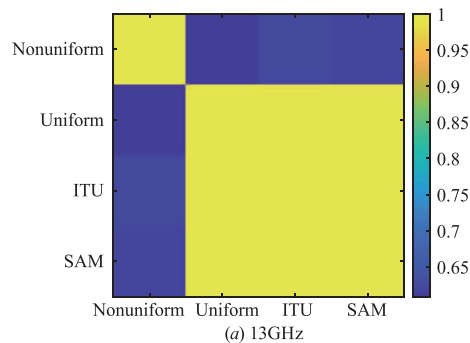
(a) 13GHz



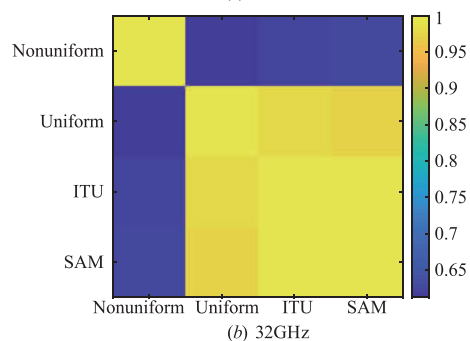
(b) 32GHz

图3 不均匀条件衰减、均匀条件衰减、ITU衰减和SAM衰减比较

从图 4 给出的四者相关系数的情况可以看出,不均匀条件下的降水衰减与另外三者间的相关系数不高,均在 0.61 左右属于中度相关,而另外三者之间的相关



(a) 13GHz



(b) 32GHz

图4 不均匀条件衰减、均匀条件衰减、ITU衰减和SAM衰减间的相关系数

系数均在 0.98 以上属于高度相关,具有很好的 consistency,特别是随着频率增加这三者的相关系数相应地升高。

从上述结果中可以看到,ITU 和 SAM 模型得到的衰减值与假设降水垂直分布均匀时的衰减具有很好的 consistency,但与实际降雨场中的衰减存在明显的差异.主要原因在于:宏观角度来讲,不同高度上降水衰减系数与雨强的关系存在较大差异(图 5),高度越高,相同降水强度对应的衰减系数越小,而 ITU 和 SAM 模型计算降水衰减都是以地面单点降水强度得到的衰减系数为基础计算整条路径上的衰减,忽视了衰减系数在垂直空间上的分布;微观角度来讲,在 Ku 和 Ka 波段降水粒子的消光截面与其尺度呈正相关(图 6),即降水粒子越大其对信号的衰减作用越强,由图 2(a)可知,高海拔处小粒子数量较多,低海拔处大粒子数量较多,ITU 和 SAM 模型计算降水衰减时以地面降水参数为基础,假设垂直方向上的降水分布均匀且与地面一致,所以出现 ITU 和 SAM 模型得到的衰减值偏大且与降水垂直分布均匀时的衰减基本一致的情况。

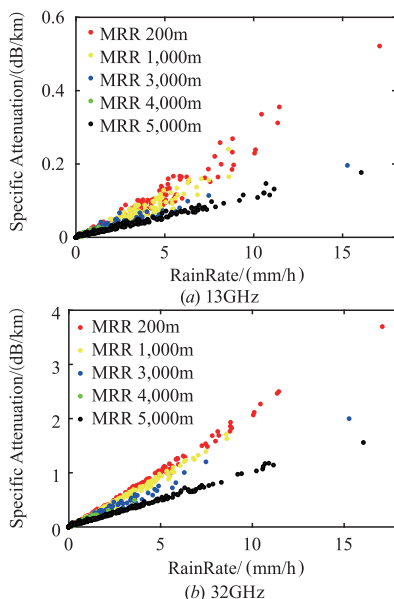


图5 MRR实测不同高度雨强与衰减系数关系

根据上述分析,ITU 和 SAM 雨衰预报模型只能代表降水垂直分布均匀情况下的信号衰减,而在分布不均匀的条件下会存在较大的误差.以 32GHz 信号为例

表 3 不均匀条件下衰减值与均匀条件下衰减值、ITU 衰减值和 SAM 衰减值之间的数据指标 MAE、RMSE、NMAE

	MAE (dB)		RMSE (dB)			NMAE (%)		
	13GHz	32GHz	ITU	13GHz	32GHz	ITU	13GHz	32GHz
ITU	0.764	4.199	ITU	1.390	6.972	ITU	13.11	11.27
SAM	0.507	3.361	SAM	0.941	5.942	SAM	13.08	11.82
UN	0.387	3.181	UN	0.804	5.865	UN	15.02	12.26

3.2 雨滴形状及取向的影响

由于在下落过程中受到空气阻力、表面张力等多

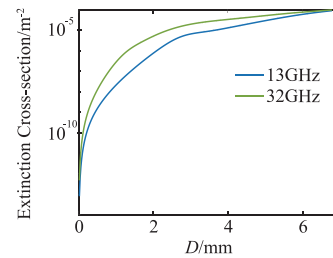


图6 Ku和Ka波段消光截面随降水粒子尺度的变化

(图 7),地面雨强变化趋势与 ITU、SAM 模型以及垂直分布均匀时的衰减变化趋势高度一致,相关系数均在 0.99 以上,而与垂直分布非均匀时的衰减变化趋势存在差异,相关系数仅为 0.607,这也证明了 ITU 和 SAM 模型对降水垂直分布均匀性的假设。

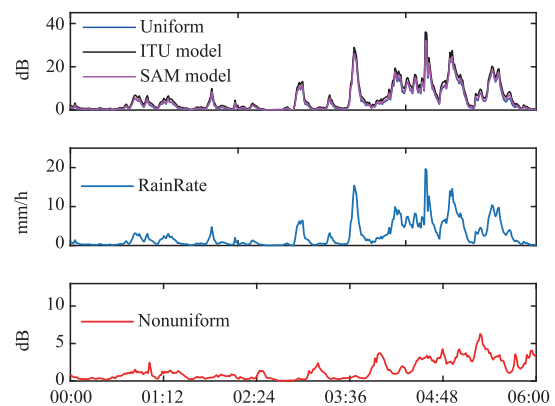


图7 衰减值与降水强度变化趋势的比较

以降水垂直分布不均匀条件下得到的衰减作为真值,与另外三者间的 MAE (Mean Absolute Error)、RMSE (Root Mean Square Error) 与 NMAE (Normalized Mean Absolute Error) 如表 3 所示. MAE 和 RMSE 表明在 Ku 和 Ka 波段,SAM 模型比 ITU 模型更加准确. NMAE 表明在 Ku 和 Ka 波段降水垂直分布对 SAM 模型的影响最大、对 ITU 模型次之,并且影响随着频率增加而减弱.综上所述,降水垂直分布会对 Ku 和 Ka 波段的星地链路衰落产生显著的影响,传统的 SAM 模型和 ITU 雨衰预报模型只能代表降水垂直分布均匀性较好条件下的衰减,而对降水垂直分布不均匀条件下的衰减预报会产生明显的偏差。

力的影响,雨滴的实际形状并不是简单的球体,而是呈一种底部平坦、顶部圆滑的形状^[20]. 为在计算雨滴消光

截面时能够更加真实地反映粒子特性,本文将采用 PB 旋转椭球体雨滴模型^[21],其轴比(b/a)与降水粒子等效直径 D_{eq} 的满足下列关系式:

$$b/a = 1.03 - 0.062D_{eq} \quad (5)$$

其中, b 和 a 分别代表降水粒子的垂直尺度和水平尺度。

不同直径雨滴的 PB 模型与球形模型比较如图 8 所示,对于当雨滴尺度小于 1mm 时其形状近似于球形,随着尺度的增加,雨滴形状趋近于椭球形,并且尺度越大其与球形的差异越明显. 与理想的球形模型相比, PB 模型更加符合实际雨滴形状。

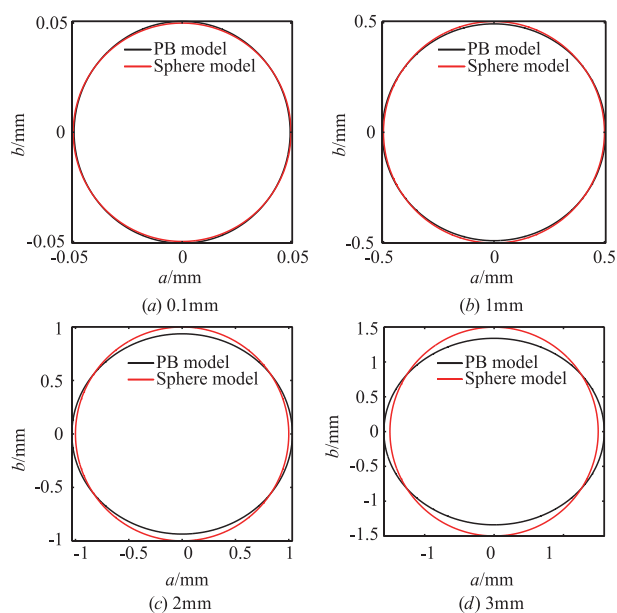


图8 雨滴PB模型与球形模型比较

因为雨滴不是理想的球体,所以当不同偏振状态的星地链路信号从不同角度经过同一雨滴时,雨滴的消光作用是不同的,因此会对降水引起的宏观衰减产生影响,即星地链路信号入射雨区时,雨滴取向的变化会引起信号衰减的变化. Ku 和 Ka 波段球形和非球形降水粒子的消光效率因子如图 9 所示. 整体而言,球形与非球形降水粒子的消光效率因子在 Ku 和 Ka 波段均随粒子尺度的增加而增加,且非球形粒子消光效率因子大于球形粒子. 其中,在 Ka 波段当粒子尺度小于 3mm 时,球形和非球形粒子的消光效率因子基本相同且随尺度的增加而增加,当粒子尺度大于 3mm 时,两种粒子的消光效率因子在 3 附近呈波动状态. 因此,粒子形状会对降水引起的信号衰减产生影响。

降水粒子为球形和非球形时的 Ku 和 Ka 星地链路衰减比较如图 10 所示,整体而言,所有数据点都分布在直线 $y=x$ 上,两者的差异较小. 其中,13GHz 和 32GHz 频点上两者衰减的 MAE 值分别为 0.0032dB (2.24%) 和

0.0196dB (1.47%),因此在 Ku 和 Ka 波段粒子形状对降水引起的信号衰减影响并不明显。

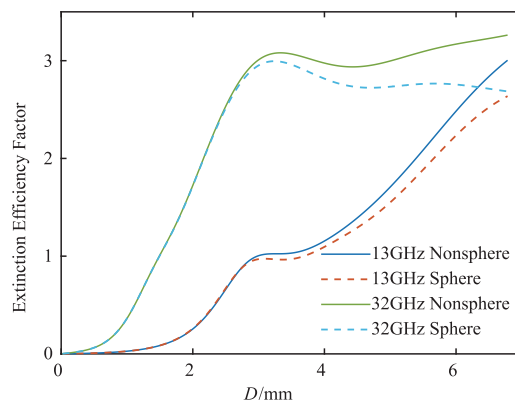


图9 Ku、Ka波段球形与非球形粒子消光效率因子比较

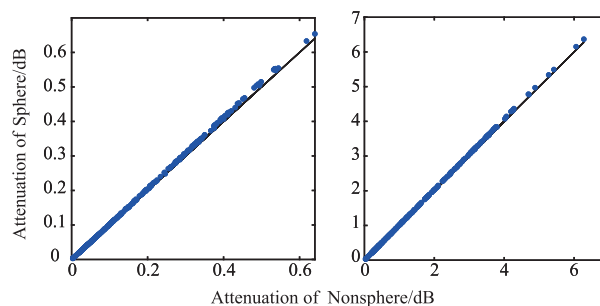


图10 Ku、Ka波段粒子为球形和非球形时的衰减比较

另外,当天线位置改变或接收不同卫星时,需要调整天线的仰角和方位角,会引起信号经过降水粒子时的方向发生改变,等价于信号方向保持不变而粒子的取向发生了变化. 由于本文采用 PB 旋转椭球体模型作为降水粒子形状,所以对于同一个粒子,信号方位角的改变不会对消光截面产生影响,因此本文讨论仰角改变时对降水衰减的影响来反映粒子取向的影响. Ku 和 Ka 波段信号在不同天线仰角条件下降水粒子消光效率因子随尺度的变化如图 11 所示. 由图可知,不同仰角时降水粒子消光效率因子与尺度呈正相关并且随着仰角的增加而增加. 其中,在 Ku 波段,小尺度粒子不同取向时的消光效率因子基本相同,随着尺度的增加它们之间的差异逐渐增大;在 Ka 波段,小尺度粒子不同取向时的消光效率因子基本相同,随着尺度的增加其各自在某一个值附近波动,并且相互之间存在明显差异. 因此,在 Ku 和 Ka 波段粒子取向会对降水引起的信号衰减产生影响。

图 12 给出了在实测降雨场内不同天线仰角时雨致衰减系数散点图比较,可以看到仰角改变引起的粒子取向变化会对衰减产生影响,仰角越大衰减系数也越大,角度相差越大,其衰减系数差异也越大,并且这种趋势在 Ka 波段更为明显,但总体而言,数据点都分布在直线 $y=x$ 附近. 它们之间的 MAE 如图 13 所示,可

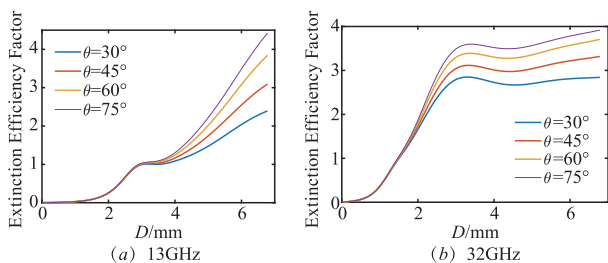


图11 不同天线仰角的消光效率因子比较

以看到差别很小,其中在 Ku 波段 MAE 最大值仅为 0.00098dB/km (2.70%), Ka 波段 MAE 最大值为 0.0207dB/km(6.34%)。图 14 给出了不同天线仰角时的衰减值,可以看到在两个频段仰角越低衰减越严重,这与图 11 中消光效率因子和图 12 中衰减系数随仰角的变化趋势相反。一般而言,仰角越低信号在降水区域传播路径越长,降水引起的衰减也就越严重,这是导致上述现象出现的原因。

综上所述,在 Ku 和 Ka 波段降水粒子形状和取向的改变会对衰减产生影响但其效果并不显著。同时,天线仰角改变引起传播路径长度的变化反而会对降水衰减产生强烈的影响,其效果远大于粒子形状和取向。

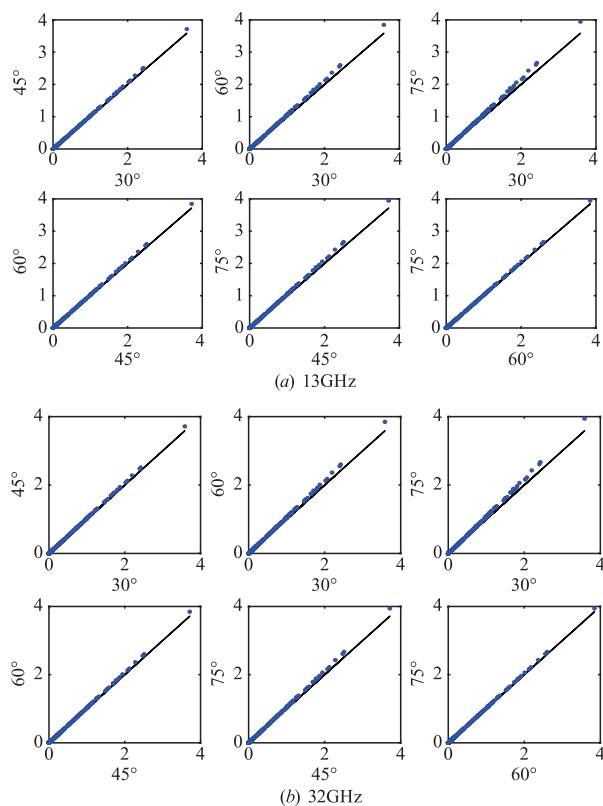


图12 不同天线仰角的衰减系数比较

3.3 降水粒子相态的影响

由于在不同的温度条件下存在凝结、融化等水的相变过程,所以降水粒子在空气中下落时可能会呈现

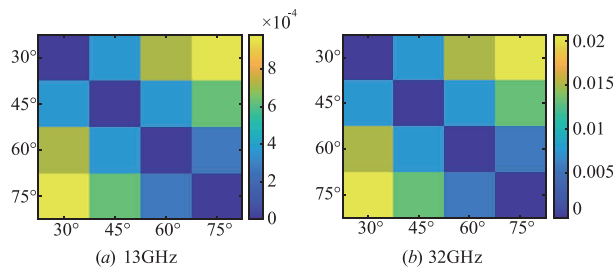


图13 不同天线仰角的衰减系数的MAE比较

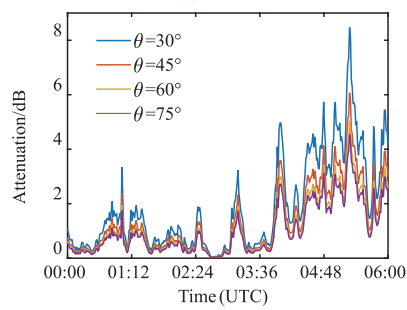
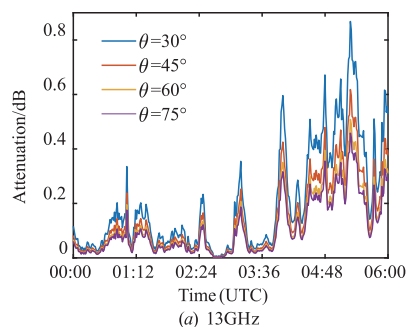


图14 不同天线仰角时的衰减值比较

出固态、液态和固液混合态等多种相态,相态的改变又会引起降水粒子特性的变化,从而对降水引起的信号衰减产生影响,这种影响主要是由不同相态粒子的复介电常数不同造成的,下面给出水、冰和湿雪(冰水混合态)的复介电常数模型。

根据 Double-Debye 模型^[22] 计算纯水的复介电常数:

$$\varepsilon_w(f) = (\varepsilon_0 - \varepsilon_1) / [1 - i(f/\gamma_1)] + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) / [1 - i(f/\gamma_2)] + \varepsilon_2 \quad (6)$$

其中

$$\theta = 1 - 300 / [273.15 + T(^{\circ}C)], \varepsilon_0 = 77.66 - 103.3\theta;$$

$$\varepsilon_1 = 0.0672\varepsilon_0, \varepsilon_2 = 3.52 + 7.52\theta;$$

$$\gamma_1 = 20.20 + 146.4\theta + 316\theta^2, \gamma_2 = 39.8\gamma_1.$$

1987 年, Matzler 给出冰的复介电常数计算模型^[23]:

$$\varepsilon_{ice}(f) = 3.1884 + 9.1 \times 10^{-4} * (T(K) - 273.15) + (\alpha/f + \beta \cdot f) i \quad (7)$$

其中

$$\alpha = (0.00504 + 0.0062\mu) e^{-22.1 \cdot \mu}, \beta = \beta_m + \Delta\beta;$$

$$\mu = 300/T - 1.0, \Delta\beta = e^{-9.963 + 0.0371(T - 273.15)};$$

$$\beta_m = 0.0207 e^{(335/T) - (335/T - 1)^2} / T + 1.16 \times 10^{-11} \cdot f^2.$$

对于湿雪的复介电常数可以用下面公式^[24]计算:

$$\varepsilon_{\text{wetsnow}} = (C_+ + 2C_-) \varepsilon_{\text{water}} / (C_+ - C_-) \quad (8)$$

其中 $C_+ = \varepsilon_{\text{ice}} + 2\varepsilon_{\text{water}}$, $C_- = (\varepsilon_{\text{ice}} - \varepsilon_{\text{water}})(1 - l)$, l 为液态水含量(体积比).

为控制变量,假设水、冰和冰水混合态的降水粒子形状仍满足 PB 模型,以此探究降水粒子相态对 Ku 和 Ka 波段星地链路降水信号衰落的影响. Ku 和 Ka 波段信号在降水粒子为水、冰和湿雪三种相态条件下的衰减比较如图 15 所示. 整体而言,冰相态的衰减要远小于另外两者,湿雪和水相态两者间的衰减差异较小,并且这种差别随着频率的增加而减小,总的来说湿雪条件下衰减最大,水相态次之,冰相态最小. 其中,在 Ku 波段的冰相态的信号衰减要低于水相态约 2 个数量级,低于湿雪约 3 个数量级;在 Ka 波段,湿雪和水相态的衰减值趋于一致,而冰相态的信号衰减小于另外两者约 2 个数量级. 因此,在 Ka 和 Ku 波段的星地链路上冰相态的降水对信号衰减作用较小可近似忽略.

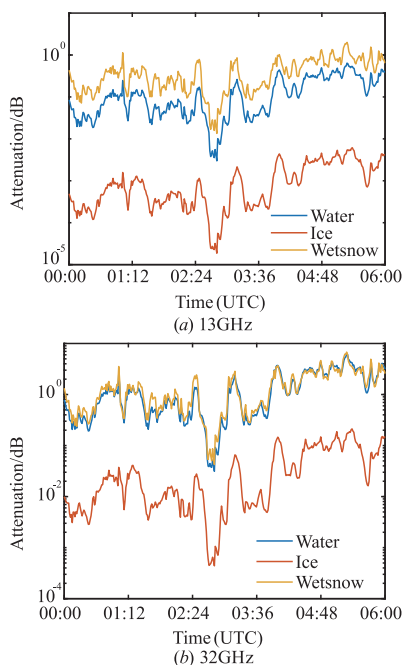


图15 Ku和Ka波段星地链路在降水粒子为水、冰和湿雪相态时的信号衰减

假设在 MRR 实测雨场中降水粒子均为液态水,若在计算降水衰减时误将雨滴相态判断为湿雪或冰态,则在 Ku 波段将产生 70.81% 和 99.13% 的平均相对偏差,而在 Ka 波段将产生 69.28% 和 97.05% 的平均相对偏差(表 4),由此可见雨滴相态会对降水衰减产生强烈的影响.

表 4 水相态的衰减与湿雪、冰相态衰减的平均相对偏差

	13GHz	32GHz
Wetsnow	70.81%	69.28%
Ice	99.13%	97.05%

综上所述,降水粒子的相态会对 Ku 和 Ka 波段星地链路的信号衰减产生较为明显的影响,特别是湿雪和液态降水引起的信号衰落要远高于冰相态. 因此,若不能根据实际粒子相态计算降水衰减,将会使得结果出现较大的偏差.

4 结论

针对现有星地链路传播模型基于经验关系和理想假设,考虑降水微物理特性影响不足的问题,本文从实测降水资料出发,系统讨论并定量地分析了降水垂直分布、粒子形状、粒子取向、粒子相态对 Ku 和 Ka 波段星地链路降水信号衰落的影响特征. 得出如下结论:

(1) 降水垂直分布会对 Ku 和 Ka 波段的星地链路衰落产生显著的影响,传统的 SAM 模型和 ITU 雨衰预报模型只能代表降水垂直分布均匀性较好条件下的衰减,而对降水垂直分布不均匀条件下的衰减预报会产生明显的偏差.

(2) 在 Ku 和 Ka 波段降水粒子形状和取向的改变会对衰减产生影响但其程度并不大,可以忽略. 同时,天线仰角改变引起传播路径长度的变化反而会对降水衰减产生强烈的影响,一般而言,仰角越低衰减越严重.

(3) 降水粒子的相态会对 Ku 和 Ka 波段星地链路的信号衰减产生较为明显的影响,特别是湿雪和液态降水引起的信号衰落要远高于冰相态约 2~3 个数量级. 同时,随着频段的升高三者之间的差距逐渐缩小.

上述结论为基于 Ku 和 Ka 波段星地链路的雨衰传播特性评估以及降雨场的反演提供技术基础和数据参考,具有重要的工程意义. 此外,在下一步工作中,将在户外搭建星地链路,测量实际降水情景下的链路衰落,联合微雨雷达和雨滴谱仪验证本文结论及数据的准确性和实用性.

参考文献

- [1] Sujun Shrestha, Iram Nadeem, et al. Rain specific attenuation and frequency scaling approach in slant-path for Ku and Ka-band experiments in South Korea[A]. International Conference on Electronics, Information, and Communication[C]. Phuket, Thailand: ICEIC, 2017. 625 - 628.
- [2] C Lu, Z Zhao, Z Wu, et al. A new rain attenuation prediction model for the earth-space links[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(1): 5432 - 5442.

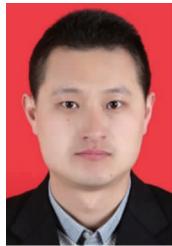
- [3] Maitra Animesh, Chakravarty Kaustav. Ku-band rain attenuation observations on an earth-space path in the Indian region [A]. URSI General Assembly [C]. New Delhi: URSI, 2005. 650 – 653.
- [4] Chakravarty K, Maitra A. Rain attenuation studies over an earth-space path at a tropical location [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2010, 72 (1): 135 – 138.
- [5] 李黄. 利用 Ku 波段卫星通信雨衰探测大气降水的初步研究 [J]. *遥感学报*, 2006, 10 (04): 568 – 572.
LI Huang. Preliminary study on detecting atmospheric rainfall by rain attenuation from Ku-band satellite telecommunication system [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10 (04): 568 – 572. (in Chinese)
- [6] W L Stutzman, W K Dishman. A simple model for the estimation of rain-induced attenuation along earth-space paths at millimeter wavelengths [J]. *Radio Science*, 1982, 17 (6): 1465 – 1476.
- [7] Recommendation ITU-R P. 838-3, Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods [S].
- [8] 杨瑞科, 赵振维, 李磊, 林乐科, 张一治, 李莉. 微波雨衰减序列的模拟统计研究 [J]. *电子学报*, 2013, 41 (12): 2513 – 2517.
YANG Rui-ke, ZHAO Zhen-wei, LI Lei, LIN Le-ke, ZHANG Yi-zhi, LI Li. Research on statistics and simulation of rain attenuation time series at microwave [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41 (12): 2513 – 2517. (in Chinese)
- [9] 张轶, 达新宇. 基于差分平稳时序的 Ka 波段雨衰预测 [J]. *物理学报*, 2014, 63 (06): 16 – 21.
ZHANG Yi, Da Xin-yu. Rain attenuation prediction at Ka band based on difference stationary timeseries [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63 (06): 16 – 21. (in Chinese)
- [10] 刘西川, 刘磊, 高太长, 任景鹏. 不同类型降水对毫米波传播特性的影响研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2013, 32 (04): 379 – 384.
LIU Xi-chuan, LIU Lei, GAO Tai-chang, REN Jing-peng. Effect of different precipitation on characteristics of millimeter wave propagation characteristics [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, 32 (04): 379 – 384. (in Chinese)
- [11] 刘西川, 高太长, 刘磊, 张伟, 杨树臣, 李涛. 降水现象对大气消光系数和能见度的影响 [J]. *应用气象学报*, 2010, 21 (04): 433 – 441.
LIU Xi-chuan, GAO Tai-chang, LIU Lei, ZHANG Wei, YANG Shu-chen, LI Tao. Influence of precipitation on atmosphere extinction coefficient and visibility [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2010, 21 (04): 433 – 441. (in Chinese)
- [12] 刘西川, 高太长, 秦健, 刘磊. 降雨对微波传输特性的影响分析 [J]. *物理学报*, 2010, 59 (03): 2156 – 2162.
LIU Xi-chuan, GAO Tai-chang, QIN Jian, LIU Lei. Effects analysis of rainfall on microwave transmission characteristics [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59 (03): 2156 – 2162. (in Chinese)
- [13] Barthès L, Mallet C. Rainfall measurement from the opportunistic use of an earth-space link in the Ku band [J]. *Atmos Meas Tech*, 2013, 6 (8): 2181 – 2193.
- [14] Bacci Giacomo, Binaglia Federico, Facheris Luca, et al. The nefocast project: a nowcasting weather platform based on dual-frequency interactive satellite terminals [A]. URSI GASS [C]. Montreal: IEEE, 2017. 1 – 4.
- [15] Michael I Mishchenko, Gordon Videen, et al. T-matrix theory of electromagnetic scattering by particles and its applications; a comprehensive reference database [J]. *Journal of Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2004, 88 (1): 357 – 406.
- [16] 宋堃, 高太长, 刘西川, 印敏, 薛杨. 基于非球形雨衰模型的微波链路雨强反演方法 [J]. *物理学报*, 2017, 66 (15): 158 – 166.
SONG Ku, GAO Tai-chang, LIU Xi-chuan, YIN Min, XUE Yue. Method and experiment of path rainfall intensity inversion using a microwave link based on nonspherical rain-induced model [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66 (15): 158 – 166. (in Chinese)
- [17] 郑娇恒, 陈宝君. 雨滴谱分布函数的选择: M-P 和 Gamma 分布的对比研究 [J]. *气象科学*, 2007, 27 (01): 17 – 25.
ZHENG Jiao-heng, CHEN Bao-jun. Comparative study of exponential and gamma functional fits to observed rain-drop size distribution [J]. *Scientia Meteorological Sinica*, 2007, 27 (01): 17 – 25. (in Chinese)
- [18] 温龙, 刘溯, 赵坤, 李杨, 李力. 两次降水过程的微降雨雷达探测精度分析 [J]. *气象*, 2015, 41 (05): 577 – 587.
WEN Long, LIU Su, ZHAO Kun, LI Yang, LI Li. Precision evaluation of micro rain radar observation in two precipitation events [J]. *Meteorological Monthly*, 2014, 41 (05): 577 – 587. (in Chinese)
- [19] 杨长业, 舒小健, 高太长, 刘西川. 基于雨强分级的夏季降水微物理特征分析 [J]. *气象科技*, 2016, 44 (2): 238 – 245.
YANG Chang-ye, SHU Xiao-jian, GAO Tai-chang, LIU Xi-chuan. Microphysical features for summer rain based on rain intensity classification [J]. *Meteorological Science And Technology*, 2016, 44 (2): 238 – 245. (in Chinese)
- [20] Szakáll Miklós, K Mitra Subir, et al. Shapes and oscillations of falling raindrops—a review [J]. *Atmospheric Research*, 2010, 97 (4): 416 – 425.
- [21] H R Pruppacher, K V Beard. A wind tunnel investigation

- of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1970, 97(411): 133 - 134
- [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 and Millimeter Waves, 1991, 12(7): 659 - 675.
- [23] Matzler C, Wegmuller U. Dielectric properties of freshwater ice at microwave frequencies [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1987, 20(12): 1623 - 1630.
- [24] Chopra K L, Reddy, G B. Optically selective coatings [J]. Phys, 1986 27(1 - 2): 193 - 217.

作者简介



咸明皓 男, 1995 年 11 月出生, 山东临沂人. 2018 年在国防科技大学获得工学学士学位. 现为国防科技大学气象海洋学院硕士研究生, 主要从事大气物理与大气探测方面的研究工作.
E-mail: xmh19951124@ gmail. com



刘西川(通信作者) 男, 1985 年 12 月出生, 河北清河人. 2007 年、2010 年和 2014 年分别在解放军理工大学获得工学学士、理学硕士和理学博士学位. 现为国防科技大学气象海洋学院讲师, 硕士生导师, 主要从事大气探测与大气遥感方面的研究工作.
E-mail: liuxc85@ gmail. com