

10-30-2023

Modeling and Analysis on Scattering Characteristics Automatic Driving Radar Bands in Rainy Environment

Mengfan Zou

School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China,
mfanzou@163.com

Xiaoyu He

School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China,
hexiaoyu@buaa.edu.cn

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Modeling and Analysis on Scattering Characteristics Automatic Driving Radar Bands in Rainy Environment

Abstract

Abstract: The operating frequency band of modern communication and radar systems has extended to millimeter wave and terahertz frequency band, and the analysis on propagation characteristics of electromagnetic signals in rainy environment is important. A calculation model through Mie scattering theory is built to simulate the attenuation and the scattering of electromagnetic signals in rainy environments. Different types of raindrop size distribution function are adopted to analyze the propagation attenuation under different rainfall of frequencies spanning from 1 GHz to 1 THz. Experimental results are compared with international telecommunication union (ITU) half-empirical model to verify the validation of the model. Subsequently, the spatial distribution characteristics of the scattered electromagnetic signals are calculated under different rainfalls of the autonomous driving radar bands. The scattering characteristics of rainy environment are analyzed from two aspects, the signal attenuation and the spatial distribution characteristics of the scattered signal. The results show that the attenuation of 77 GHz signal is higher than 10 dB/km under heavy rain and rainstorm condition, which significantly reduces the signal propagation distance.

Keywords

rainfall attenuation, Mie scattering, scattering phase function, raindrop size distribution, radar waves

Recommended Citation

Zou Mengfan, He Xiaoyu. Modeling and Analysis on Scattering Characteristics Automatic Driving Radar Bands in Rainy Environment[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(10): 2161-2169.

自动驾驶雷达频段降雨环境散射特性建模分析

邹梦凡, 何晓雨*

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要: 现代通信与雷达系统的工作频段已延伸至毫米波及太赫兹频段, 定量分析降雨环境对该频段电磁信号传输的影响对应用系统十分重要。根据 Mie 理论建立了降雨环境电磁信号衰减仿真计算模型, 采用不同雨滴尺寸分布模型计算了频率在 1 GHz~1 THz 的电磁信号在降雨环境中传输的衰减, 并与 ITU(international telecommunication union) 经验模型进行比对以验证计算模型的有效性。针对自动驾驶雷达芯片工作频段计算了不同降雨环境条件下电磁信号散射的空间分布特性, 从信号衰减与雨杂波散射的空间分布特性两方面分析降雨环境的散射特性。结果表明: 在大雨和暴雨天气下 77 GHz 信号的衰减高于 10 dB/km, 显著影响信号的传输距离。

关键词: 降雨衰减; Mie 散射; 散射相位函数; 雨滴尺寸分布; 雷达波

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)10-2161-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-FZ0807

引用格式: 邹梦凡, 何晓雨. 自动驾驶雷达频段降雨环境散射特性建模分析[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(10): 2161-2169.

Reference format: Zou Mengfan, He Xiaoyu. Modeling and Analysis on Scattering Characteristics Automatic Driving Radar Bands in Rainy Environment[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(10): 2161-2169.

Modeling and Analysis on Scattering Characteristics Automatic Driving Radar Bands in Rainy Environment

Zou Mengfan, He Xiaoyu*

(School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The operating frequency band of modern communication and radar systems has extended to millimeter wave and terahertz frequency band, and the analysis on propagation characteristics of electromagnetic signals in rainy environment is important. A calculation model through Mie scattering theory is built to simulate the attenuation and the scattering of electromagnetic signals in rainy environments. Different types of raindrop size distribution function are adopted to analyze the propagation attenuation under different rainfall of frequencies spanning from 1 GHz to 1 THz. Experimental results are compared with international telecommunication union (ITU) half-empirical model to verify the validation of the model. Subsequently, the spatial distribution characteristics of the scattered electromagnetic signals are calculated under different rainfalls of the autonomous driving radar bands. The scattering characteristics of rainy environment are analyzed from two aspects, the signal attenuation and the spatial distribution characteristics of the scattered signal. The results show that the attenuation of 77 GHz signal is higher than 10 dB/km under heavy rain and rainstorm condition, which significantly reduces the signal propagation distance.

Keywords: rainfall attenuation; Mie scattering; scattering phase function; raindrop size distribution; radar waves

收稿日期: 2023-07-02

修回日期: 2023-08-21

第一作者: 邹梦凡(2000-), 女, 硕士生, 研究方向为雷达信号降雨环境散射特性。E-mail: mfan zou@163.com

通讯作者: 何晓雨(1991-), 男, 讲师, 硕导, 博士, 研究方向为雷达系统及信号处理等。E-mail: hexiaoyu@buaa.edu.cn

0 引言

电磁信号频率较低时,在降雨环境中传输的衰减可以忽略不计,例如,S、C和X波段雷达仅在作用距离较远(几千公里)时才考虑降雨的影响^[1]。然而,随着通信与雷达系统工作频段的进一步升高,电磁信号在降雨环境中的传输衰减逐渐显著,变得不可忽略。现在已经有许多对于降雨衰减影响的研究,如应用于5G通信的26 GHz信号降雨衰减的测量^[2],以及对Ka波段卫星通信传播特性的实验和理论研究^[3-4]。这些研究展示了降雨对电磁信号产生的影响,为实现各种波段的通信应用提供了帮助。

自动驾驶汽车雷达主要工作在76~81 GHz频段,降雨对传输信号的衰减作用成为一个不得不考虑的问题。电磁信号的衰减包括散射和吸收两部分,散射是粒子改变入射波方向的过程,吸收是电磁波的能量部分被粒子吸收产生热能散失的过程。一般采用电磁信号在降雨环境中传输单位距离时产生的衰减来定量计算降雨的影响^[5],其单位为dB/km,而降雨环境对电磁信号散射的空间分布通常采用随散射方向变化的相位函数表示。ITU-R(international telecommunication union-radiocommunication sector)给出了计算电磁信号降雨环境传输衰减的半经验模型^[6],是现阶段广泛采用的信号降雨传输衰减估计方法。利用Mie散射理论进行衰减和相位函数的计算也受到了广泛应用,该理论由Gustav Mie于1908年提出^[7],Mie系数计算与水的复折射指数 m 与雨滴的电尺寸 x 有关,Mie理论解是根据雨滴的电尺寸展开的。Mie理论相位函数可以用来表示散射方向,Mie散射发生在电尺寸近似1时,当粒子半径逐渐减小,电尺寸远小于1时,前向和后向散射分布变得基本对称并接近瑞利散射解。而随着粒子半径相对于波长的增加,前向大于后向散射并接近几何光学。通常,对于任何尺寸的球体,单次散射特性都可以使用Mie理论计算。

降雨环境的散射特性随降雨的物理特性及入

射电磁信号特性而变化。其中,降雨的物理特性包括雨滴的形状、折射率、降雨率、雨滴大小分布等。雨滴的形状^[8]与它的尺寸有关系,雨滴的直径在100 μm ~10 mm之间,一般不大于8 mm。半径小于1 mm的雨滴基本为球形,继续增大雨滴半径,将会变为底部有一凹槽的扁椭球形,在研究降雨对电磁波的影响时,为方便理论计算,通常将其看作无方向的对称球形粒子。降雨率一般用每小时的降雨量来衡量,根据降雨率的不同,可以分为小雨、中雨等不同雨量等级。对于不同的地区雨滴尺寸分布函数^[9]也应当是不同的,雨滴尺寸分布函数作为研究降雨特性、雷达气象等领域的重要参数,迄今得到了广泛的测量和模式化研究。现有的雨滴尺寸分布模型有很多,本文仿真计算主要用到了对数正态分布函数^[10]、M-P负指数分布函数^[11]和Weibull分布函数^[12]3种雨滴分布函数。由于不同地域的降水特征不同,对每一个地区都进行雨滴谱测量的工作量较大,正确模拟一个地域的雨滴分布谱是一个困难而又复杂的工作。

电磁信号的特性主要指频段和极化。每公里衰减随频率升高而增大,只是在降雨率较低时,3 GHz左右的单位衰减量会有所减少,随着降雨率的升高这种现象消失。电磁信号的极化类型也影响传输衰减的大小,垂直极化信号的传输衰减水平普遍小于水平极化信号^[13-15]。此外,降雨环境对电磁信号的散射将导致杂波背景功率增强,对通信与探测造成干扰。

降雨率、频率、传输距离、电磁波的极化方式是影响信号降雨衰减的主要因素。本文用MATLAB进行电磁波信号传输的Mie理论衰减仿真计算,所计算的电磁信号频段在1 GHz~1 THz之间,包括了3种不同的雨滴分布函数,对5个雨量等级选取典型值进行计算,并与ITU半经验模型进行比较。随后计算了降雨环境对77 GHz电磁信号散射的相函数,结果表明随着降雨率增大,后向散射峰值逐渐降低,前向散射峰值逐渐升高。

1 降雨特性散射建模

1.1 衰减系数计算建模

确定电磁波的特定衰减基于 3 个假设。首先, 每个雨滴的贡献是相加的并且独立于其他雨滴。其次, 假设水滴是球形水滴, 它们会散射和吸收入射波的能量。最后, 波的强度在通过雨水传播时呈指数衰减。

若发射功率为 P_t 的电磁信号在均匀降雨环境中传输距离为 L 后, 其功率 P_r 可以根据 BeerLambert 定律计算^[16]:

$$P_r = P_t \exp(-\gamma_{\text{ext}} L) \tag{1}$$

式中: γ_{ext} 为单位距离消光系数。用对数坐标表示的信号功率衰减率为

$$\alpha_t = 10 \lg(P_t/P_r) \tag{2}$$

将式(1)代入式(2)可得

$$\alpha_t = 4.343 \gamma_{\text{ext}} L \tag{3}$$

若传输路径上粒子大小与形状均相同, 则消光系数可表示为

$$\gamma_{\text{ext}} = N Q_{\text{ext}} r^2 \pi \tag{4}$$

式中: N 为每单位体积的水滴数, 单位为个/ m^3 ; r 为粒子半径, 单位为 mm ; Q_{ext} 为消光效率系数^[17]。消光效率系数 Q_{ext} 、散射效率系数 Q_{sca} 和吸收效率系数 Q_{abs} 是将消光截面 σ_{ext} 、散射截面 σ_{sca} 和吸收截面 σ_{abs} 归一化得到的, 有定义式:

$$Q_{\text{ext}} = \frac{\sigma_{\text{ext}}}{\pi r^2} \tag{5}$$

式中: σ_{ext} 、 σ_{sca} 和 σ_{abs} 都具有面积量纲, 表示与粒子相互作用的区域。它是吸收或散射功率与入射功率密度的比值。消光截面是散射截面和吸收截面的总和。

1.1.1 雨滴谱模型

实际情况中雨滴有不同的大小分布, 雨滴尺寸分布是指对应不同降雨率, 不同尺寸的雨滴在空间的分布状况, 也被称为雨滴谱, 用 $N(r)$ 表示, 单位为 $\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$ 。

雨滴谱可以采用对数正态分布函数、M-P 负指数分布函数或 Weibull 分布函数建模。

Feingold 等提出了对数正态分布函数^[10]:

$$N(r) = \frac{N_T}{\sqrt{2\pi} \ln(\sigma) r} \exp\left(\frac{-\ln^2(r/r_g)}{2 \ln^2(\sigma)}\right) \tag{6}$$

式中: N_T 为单位体积雨滴数量, 单位为 m^{-3} ; r_g 为雨滴粒子半径的均值, 单位为 mm ; σ 为 r 的标准差。三者均为降雨率 R (单位 mm/h) 的经验关系。

$$\begin{cases} \sigma = 1.43 - 3 \times 10^{-4} R \\ N_T = 172 R^{0.22} \\ r_g = 0.36 R^{0.23} \end{cases} \tag{7}$$

M-P 负指数分布函数由 Marshall 等提出^[11], 是一种广泛使用的分布, 由一个单参数指数形式表示:

$$N(r) = N_0 e^{-Ar} \tag{8}$$

式中: N_0 为截距, 可以近似为常数, 单位为 $\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$; A 为斜率参数, 取决于降雨率, 单位为 mm^{-1} 。根据文献[18], 式(8)有典型值 $N_0 = 16\ 000$, $A = 8.2 R^{-0.21}$ 。

Weibull 分布函数由 Sekine 等提出^[12]:

$$N(r) = N_0 \frac{c}{b} \left(\frac{2r}{b}\right)^{c-1} \exp\left(-\left(\frac{2r}{b}\right)^c\right) \tag{9}$$

式中: c 为“形状”参数或称“偏度”参数; b 为“尺度”参数; 根据文献[16], $N_0 = 2\ 000 \text{ m}^{-3} \text{mm}^{-1}$, $c = 0.95 R^{0.14}$, $b = 0.26 R^{0.44}$ 。

1.1.2 消光效率模型

对于给定的雨滴分布函数, $N(r)dr$ 为每单位体积中, 颗粒的半径在 r 和 $r+dr$ 之间的个数, 此时消光系数的计算必须通过对所有雨滴大小进行积分来确定:

$$\gamma_{\text{ext}} = \pi \int_0^\infty N(r) Q_{\text{ext}} r^2 dr \tag{10}$$

代入衰减计算公式, 然后通过对总路径 L 的总比衰减积分, 得到总衰减率 α_t (单位 dB):

$$\alpha_t = 4.343 \pi \int_0^L \left[\int_0^\infty N(r) Q_{\text{ext}} r^2 dr \right] dL \tag{11}$$

由式(11)可知, 总衰减率取决于路径长度 L 、雨滴分布函数 $N(r)$ 以及消光效率系数 Q_{ext} 。

本文采用 Mie 散射理论计算消光效率系数:

$$Q_{\text{ext}} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{n_{\text{max}}} (2n+1) \text{Re}[a_n + b_n] \quad (12)$$

式中: n_{max} 为最大项数; a_n 和 b_n 为 Mie 系数; x 为雨滴的电尺寸。

$$x = (2\pi r) / \lambda \quad (13)$$

为避免式(12)中求和项 n_{max} 趋近于无穷, Bohren C F^[17] 给出了其估算方法为 $n_{\text{max}} = x + 4x^{1/3} + 2$ 。

式(12)中的系数 a_n 和 b_n 可用式(14), (15)计算:

$$a_n = \frac{\Psi'_n(mx)\Psi_n(x) - m\Psi_n(mx)\Psi'_n(x)}{\Psi'_n(mx)\zeta_n(x) - m\Psi_n(mx)\zeta'_n(x)} \quad (14)$$

$$b_n = \frac{m\Psi'_n(mx)\Psi_n(x) - \Psi_n(mx)\Psi'_n(x)}{m\Psi'_n(mx)\zeta_n(x) - \Psi_n(mx)\zeta'_n(x)} \quad (15)$$

式中: ' 为函数对参数 (x 或 mx) 的导数; m 为复折射指数; 函数 ζ_n 与 Ψ_n 可由 Ricatti-Bessel 函数导出。

$$\begin{cases} \Psi_n(z) = \left(\frac{\pi z}{2}\right)^{1/2} J_{n+1/2}(z) = z j_n(z) \\ \zeta_n(z) = \left(\frac{\pi z}{2}\right)^{1/2} H_{n+1/2}^{(2)}(z) = z h_n^{(2)}(z) \end{cases} \quad (16)$$

式中: $J_{n+1/2}$ 、 $H_{n+1/2}^{(2)}$ 分别为第一、第三类 Bessel 函数; j_n 、 $h_n^{(2)}$ 为相应的球形 Bessel 函数; $H_{n+1/2}^{(2)}$ 也称为第二类半整数阶 Hankel 函数。

1.1.3 复折射指数模型

式(14)与式(15)的复折射指数可表示为

$$m = m' + jm'' \quad (17)$$

式中, j 为虚数符号, 有定义 $j = \sqrt{-1}$; m' 为复折射指数的实部; 虚部 m'' 为复折射指数的虚部, 其值越大表示介质的吸收作用越强烈。

复折射指数 m 与复介电常数 ε 之间存在关系:

$$m = \sqrt{\varepsilon} \quad (18)$$

式中: ε 为复介电常数, 有 $\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$ 。

在降雨散射特性计算中, 通常用 Ray 经验公式计算水的复介电常数:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \left[1 + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^{1-a} \sin\left(\frac{a\pi}{2}\right) \right]}{1 + 2\left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^{1-a} \sin\left(\frac{a\pi}{2}\right) + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^{2(1-a)}} \quad (19)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^{1-a} \cos\left(\frac{a\pi}{2}\right)}{1 + 2\left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^{1-a} \sin\left(\frac{a\pi}{2}\right) + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^{2(1-a)}} + \frac{12.5664 \times 10^8 \lambda}{18.8469 \times 10^{10}} \quad (20)$$

且有

$$\begin{cases} \lambda_s = 3.3836 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{2513.98}{T+273}\right) \\ \varepsilon_s = 78.54[1 - 4.579 \times 10^{-3}(T-25) + 1.19 \times 10^{-5}(T-25)^2 - 2.8 \times 10^{-8}(T-25)^3] \\ \varepsilon_\infty = 5.27134 + 2.16474 \times 10^{-2}T - 1.31198 \times 10^{-3}T^2 \\ a = -\frac{16.8129}{T+273} + 6.9265 \times 10^{-2} \end{cases} \quad (21)$$

式中: T 为温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.1.4 ITU-R 参考模型

ITU-R 给出了计算衰减时使用雨的幂律关系, 这可以近似为经验模型:

$$\alpha_R = kR^\alpha \quad (22)$$

式中: α_R 为每公里降雨衰减, 单位为 dB/km; R 为单位时间降雨率, 单位为 mm/h; 系数 k 和 α 的值是频率 f (GHz) 的函数, 范围从 1~1 000 GHz, 受若干因素影响, 如雨滴大小分布、温度、工作频率和无线电波极化。参数 k 和 α 的取值可由式 (23)、(24) 确定, 从散射计算得到的幂律系数的曲线拟合得出:

$$\lg k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp\left[-\left(\frac{\lg f - b_j}{c_j}\right)^2\right] + m_k \lg f + c_k \quad (23)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp\left[-\left(\frac{\lg f - b_j}{c_j}\right)^2\right] + m_\alpha \lg f + c_\alpha \quad (24)$$

式中: 系数 a_j 、 b_j 、 c_j 、 m_k 、 c_k 、 m_α 、 c_α 均为常数, 其取值与极化方式有关^[6]。

1.2 散射空间分布特性建模

散射光强在各个方向上是不对称的, 这与复折射指数 m 、粒子电尺寸 x 、散射角度 θ 相关。单个球体的散射角度分布可用相位函数来表示。本文用 Mie 理论计算非极化电磁波的相位函数:

$$P = \frac{2\pi}{(x/r)^2 \sigma_{sca}} [S_1 S_1^* + S_2 S_2^*] \quad (25)$$

式中: S_1 、 S_2 为 Mie 散射的 2 个散射辐射振幅解。

$$S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} [a_n \pi_n + b_n \tau_n] \quad (26)$$

$$S_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} [a_n \tau_n + b_n \pi_n] \quad (27)$$

式中: π_n 和 τ_n 是与散射角 θ 相关的函数, 可以用递推关系计算。

$$n\pi_{n+1} = (2n+1)\cos\theta\pi_n - (n+1)\pi_{n-1} \quad (28)$$

$$\tau_{n+1} = (n+1)\cos\theta\tau_n - (n+2)\tau_{n-1} \quad (29)$$

式中: π_n 第 1 与第 2 项为 $\pi_0(\theta)=0$ 、 $\pi_1(\theta)=1$ 。

当 $0 < \theta \leq \pi/2$ 时为前向散射, 当 $\pi/2 < \theta < \pi$ 时为后向散射。

若已知降雨尺寸分布函数, 则可以采用式(30)计算相位函数:

$$P(\theta) = \int_{r_1}^{r_2} P \cdot n(r) dr \quad (30)$$

式中: P 为式(25)计算的半径为 r 的单个粒子散射相位函数。

2 结果与分析

2.1 仿真场景设计

多数自动驾驶汽车毫米波远距离探测雷达采用 76~81 GHz 频段, 且实际场景中往往存在多部雷达同时探测的情境, 准确实时进行信息传输能够减少安全事故的发生, 如图 1 所示。多个车辆雷达对前方一目标进行探测, 由某一车辆雷达发送的探测信号在降雨环境中传输时, 将受雨滴吸收及散射特性的影响, 在其及附近车辆的接收机端产生杂波干扰, 影响雷达目标探测和识别的性能。

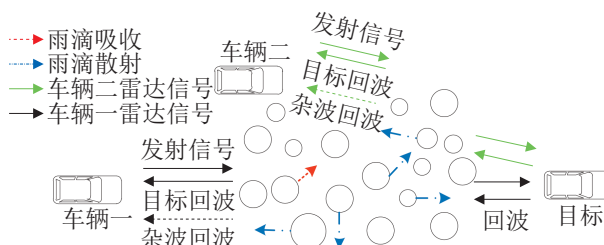


图 1 降雨环境下自动驾驶汽车雷达信号传输
Fig. 1 Autonomous driving radar signal transmission in rainfall environment

2.2 降雨衰减计算结果

中国气象局雨量等级划分如表 1 所示。为了探究不同降雨天气对信号衰减的影响, 本文选取降雨率 2.5 mm/h, 15 mm/h, 30 mm/h, 75 mm/h, 150 mm/h, 分别对应表 1 给出的 5 种降雨等级下的每公里衰减进行计算。

表 1 雨量等级划分
Table 1 Classification of rainfall level

雨量等级	降雨率/(mm/h)
小雨	0.1~9.9
中雨	10~24.9
大雨	25.0~49.9
暴雨	50.0~99.9
大暴雨	100.0~249.9

图 2~3 为根据 ITU 给出的降雨衰减模型计算出的单位衰减与频率和降雨率的关系。

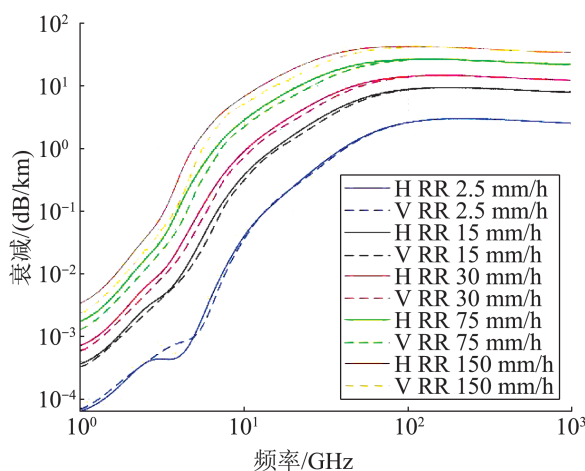


图 2 每公里降雨衰减与频率的关系
Fig. 2 Relationship between rainfall attenuation per kilometer and frequency

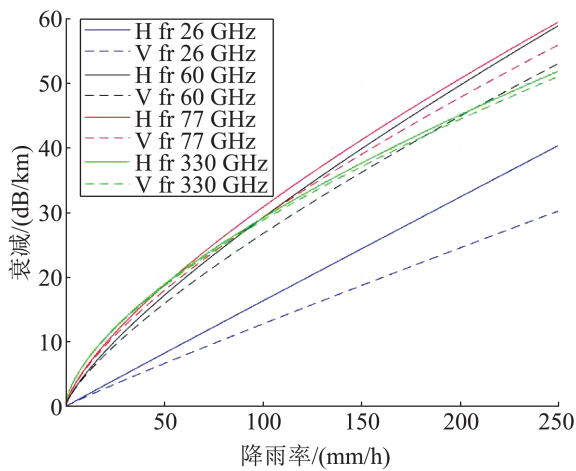


图3 每公里降雨衰减与降雨率的关系
Fig. 3 Relationship between rainfall attenuation per kilometer and rainfall rate

每公里降雨衰减受电磁信号频率和降雨率影响较大，电磁信号极化方式也会产生影响。根据图2可知每公里衰减随频率升高而增大，只是在降雨率较低时，3 GHz左右的单位衰减量会有所减少，使曲线出现凹陷，随着降雨率的升高这种现象消失。当频率高于100 GHz时基本保持不变，甚至有所减少。

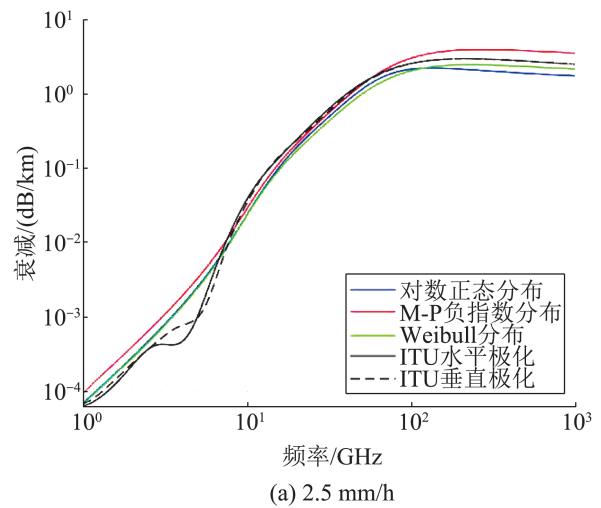
根据图3可知，随着降雨率的增加每公里衰减迅速增大，近似于指数关系。另外，在330 GHz时同降雨率下的衰减小于77 GHz，与图2的结果相符。相同降雨率和频率的条件下，水平极化的衰减略高于垂直极化。

根据Mie散射理论计算每公里衰减结果如图4所示。

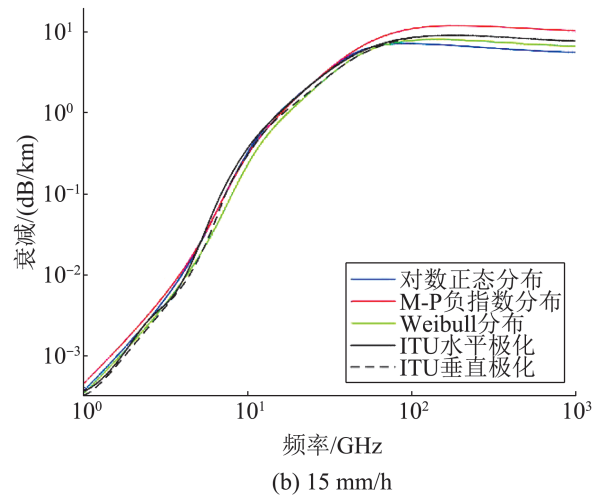
降雨率是限制雷达波传输的主要障碍之一，图4给出了不同降雨率下1 GHz~1 THz的电磁信号的单位衰减，随着降雨强度增加，电磁信号每公里的衰减也急剧增大。与此同时，每公里衰减还随频率增加而增大，最后趋于一个常量。这与ITU模型计算结果是相符合的。

不同的尺寸分布之间也有一定的差距，本文所采用的3种雨滴尺寸分布都与ITU模型的计算结果较为符合，其中，Weibull分布函数准确性最

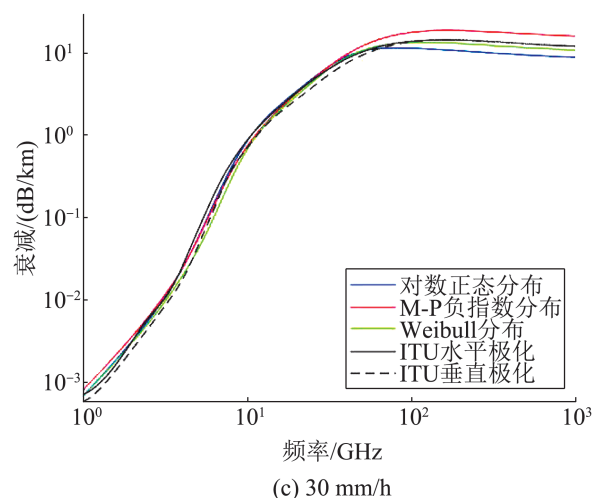
高，对数正态分布与M-P负指数分布次之，尤其在频率较高的波段误差较大。可见即使降雨率相同，不同大小的雨水粒子在空间中的分布对衰减的影响较大。



(a) 2.5 mm/h



(b) 15 mm/h



(c) 30 mm/h

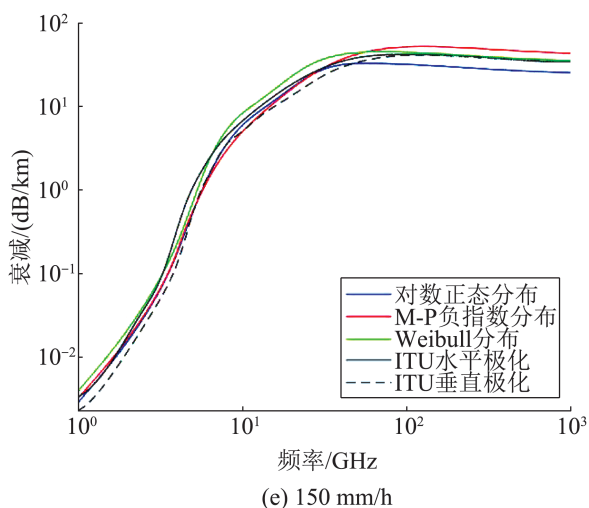
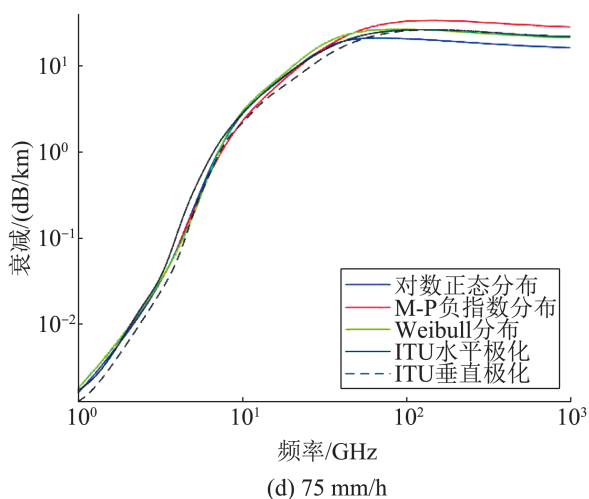


图 4 不同降雨率下电磁信号每公里的传输衰减
Fig. 4 Transmission attenuation per kilometer of electromagnetic signals under different rainfall rates

根据图 4 可知, 77 GHz 电磁信号在降雨率 2.5、15、30、75、150 mm/h 时对应的衰减为 2、8、13、25、41 dB/km, 在小雨天气下传输 10 km 产生的衰减与暴雨天气下传输 1 km 产生的衰减近似, 可见强降雨天气对信号衰减程度是很大的。

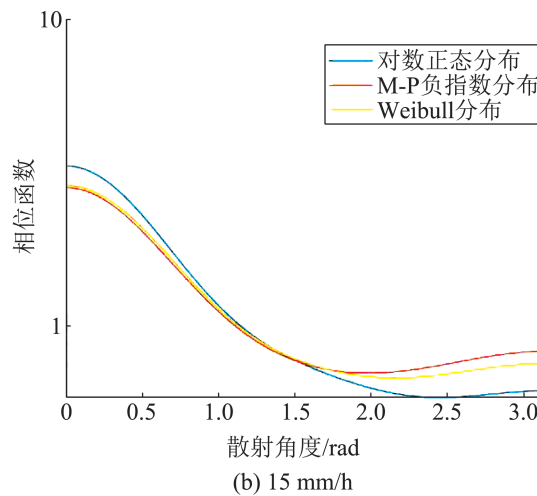
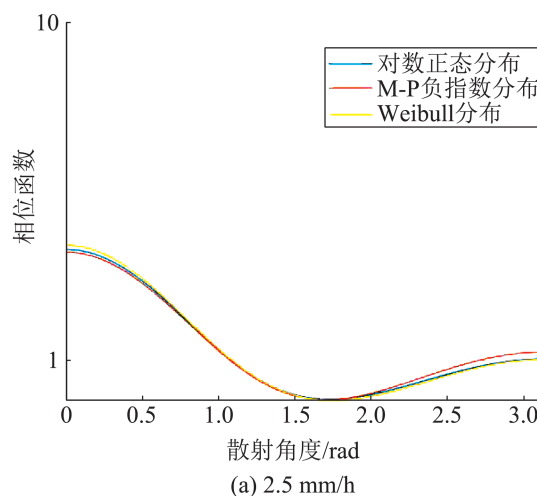
2.3 相位函数计算结果

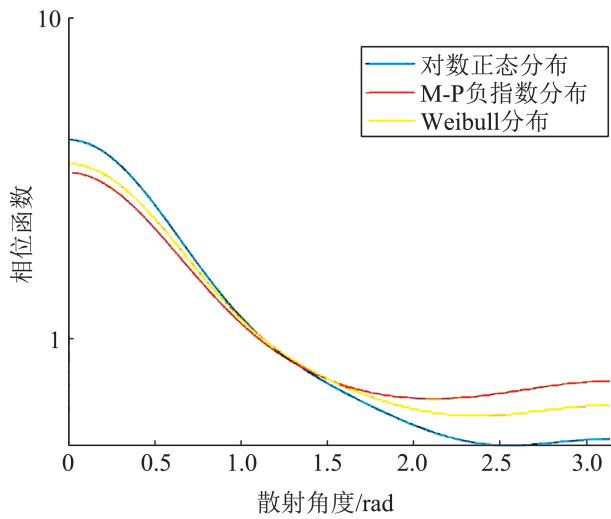
图 5 为自动驾驶汽车雷达常用的 77 GHz 频点随降雨率变化的散射相函数。图 6 为 Weibull 分布函数不同降雨率下的散射相位函数。

由图 5~6 可知, 当降雨率较小时, 前向散射与后向散射各有一个峰值, 随着降雨率增大, 后

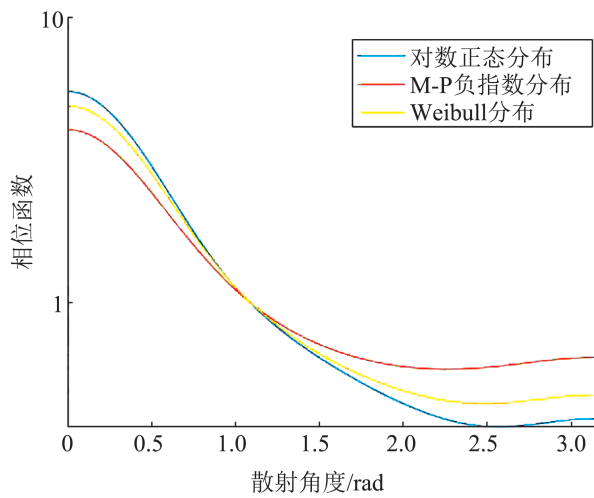
向散射量逐渐减少, 此时只有前向散射一个峰值, 散射相位函数值集中地分布在小散射角度的范围内、在其他散射角方向衰减较快。这是因为常温下 77 GHz 雷达波对应的水的折射率是确定的, 其波长与降雨粒子尺寸相当, 粒子电尺寸的变化会对散射方向产生较大的影响, 当粒子半径逐渐减小时, 前向和后向散射分布变得基本对称并接近瑞利散射解。而随着粒子半径相对于波长的增加, 正向大于反向并接近几何光学。当降雨率大时, 空间中半径较大的粒子分布更多, 因此, 粒子电尺寸更大, 前向散射更强。

散射角度越分散, 越容易对环境其他方向的车辆产生影响, 当散射角度越集中, 对发射方向的回波影响越大。

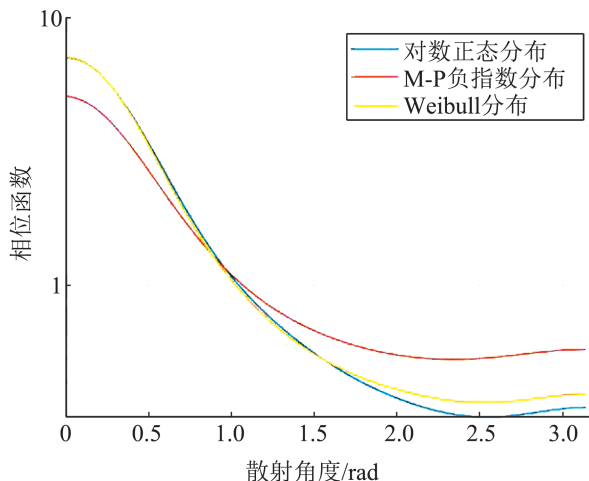




(c) 30 mm/h



(d) 75 mm/h



(e) 150 mm/h

图5 77 GHz 雷达信号相函数随降雨率的变化

Fig. 5 Change of phase function of 77 GHz radar signal with rainfall rate

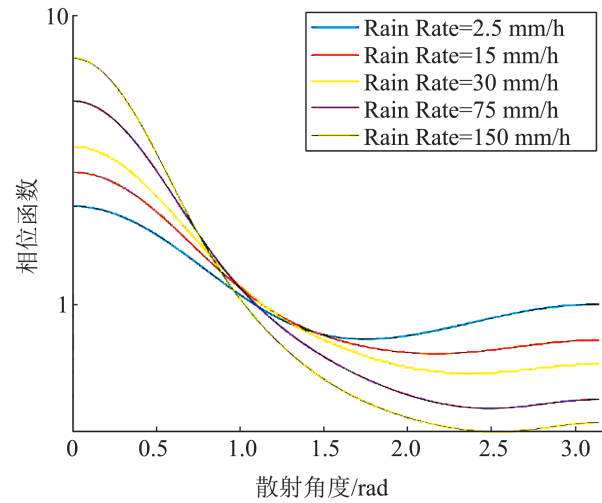
图6 77 GHz 雷达信号在 Weibull 分布函数
不同降雨率时的相函数

Fig. 6 Phase function of 77 GHz radar signal under different rainfall rates in Weibull distribution function

3 结论

本文基于 Mie 散射理论建立了适用于 1 GHz ~ 1 THz 频段的降雨环境散射特性模型。采用了对数正态分布函数、M-P 负指数分布函数和 Weibull 分布函数 3 种分布函数建模随降雨量变化的雨滴尺度分布函数，并根据水的复折射指数计算得到了电磁信号单位传输距离衰减系数及散射相函数。衰减系数计算结果与 ITU 经验模型比较表明，Weibull 分布函数计算结果最为准确，对数正态分布函数、M-P 负指数分布函数在低频段较准确，100 GHz 以上的高频段会出现偏差。对于 77 GHz 频段而言，小雨条件下衰减较弱，约为 2 dB/km；而在大雨与暴雨条件下的衰减较为显著，为 10 dB/km 以上。因而大雨与暴雨环境将影响通信与雷达系统的作用距离。此外，降雨率将影响电磁散射信号的空间分布，对系统产生干扰。

参考文献:

- [1] 赵振维. 水凝物的电波传播特性与遥感研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2001.
Zhao Zhenwei. Study on Radiowave Propagation Characteristics and Remote Sensing of Hydrometeors [D]. Xi'an: Xidian University, 2001.

- [2] Shayea I, Abd Rahman T, Hadri Azmi M, et al. Real Measurement Study for Rain Rate and Rain Attenuation Conducted Over 26 GHz Microwave 5G Link System in Malaysia[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 19044-19064.
- [3] 辛进, 蒙康, 王越, 等. 三亚Ka波段卫星遥感信号降雨衰减的研究[J]. *无线电通信技术*, 2022, 48(5): 879-884.
Xin Jin, Meng Kang, Wang Yue, et al. Research on Rain Attenuation of Ka Bands Satellite Remote Sensing in Sanya[J]. *Radio Communications Technology*, 2022, 48(5): 879-884.
- [4] Wang Jing, Wang Linhao, Xu Mingzhong. Rain Attenuation Analysis of Ka Band Ship-borne Satellite Communication Station in Indian Ocean and Pacific Ocean[C]//2020 IEEE 3rd International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 385-388.
- [5] Mandeep J S, Ng Y Y, Abdullah H, et al. The Study of Rain Specific Attenuation for the Prediction of Satellite Propagation in Malaysia[J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2010, 31(6): 681-689.
- [6] International Telecommunication Union. Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods: P.838-3[S]. Geneva, Switzerland: International Telecommunication Union, 2005.
- [7] Weerasekera R A A D O, Samarakoon D M L Y, Dayalal D L H P P, et al. Mie-theory-based Investigation of the Effect of Size Distribution on the Surface Plasmon Absorption of Silver Nanoparticles[C]//2022 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCOn). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022: 1-6.
- [8] Domingo Pimienta-del-Valle, José Manuel Riera, Santiago Pérez-Peña, et al. Characterization of Rain Attenuation in 80-200 GHz Radio Links Considering Non-spherical Raindrops[C]//2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022: 1-5.
- [9] Lai Ruize, Liu Xiantong, Hu Sheng, et al. Raindrop Size Distribution Characteristic Differences During the Dry and Wet Seasons in South China[J]. *Atmospheric Research*, 2022, 266: 105947.
- [10] Feingold G, Levin Z. The Lognormal Fit to Raindrop Spectra From Frontal Convective Clouds in Israel[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1986, 25(10): 1346-1363.
- [11] Marshall J S, Palmer W Mc K. The Distribution of Raindrops With Size[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1948, 5(4): 165-166.
- [12] Sekine M, Lind G. Rain Attenuation of Centimeter, Millimeter and Submillimeter Radio Waves[C]//1982 12th European Microwave Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1982: 584-589.
- [13] Shrestha S, Choi D Y. Rain Attenuation Study Over an 18 GHz Terrestrial Microwave Link in South Korea[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2019, 2019: 1712791.
- [14] Thorvaldsen P, Henne I. Outdoor Transmission Measurement at 26 GHz: Results of a 4 Year Trial in Prague[J]. *Radio Science*, 2016, 51(5): 402-410.
- [15] Regonesi E, Luini L, Riva C. Limitations of the ITU-R P. 838-3 Model for Rain Specific Attenuation[C]//2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 1-4.
- [16] Hasirlioglu S, Riener A. Introduction to Rain and Fog Attenuation on Automotive Surround Sensors[C]//2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-7.
- [17] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles[M]. New York: Wiley, 1998.
- [18] 董群锋. 毫米波段脉冲波在雨雾媒质中传输效应研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
Dong Qunfeng. Study of Transmission Effects of Pulses at Millimeter Wavelengths Through Rain and Fog Medium[D]. Xi'an: Xidian University, 2006.