

卢昌胜, 吴振森, 赵振维, 等. 云雾对 THz 波传播的衰减研究[J]. 电波科学学报, 2015, 30(4): 718-722. doi: 10.13443/j.cjors.2014092401
LU Changsheng, WU Zhensen, ZHAO Zhenwei, et al. Attenuation of Terahertz-wave due to cloud and fog[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015, 30(4): 718-722. (in Chinese). doi: 10.13443/j.cjors.2014092401

云雾对 THz 波传播的衰减研究

卢昌胜¹ 吴振森¹ 赵振维² 林乐科² 张鑫² 李海英¹

(1. 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术重点实验室, 山东 青岛 266107)

摘要 基于云雾的粒子尺寸分布, 利用 Rayleigh 近似和 Mie 理论计算了不同能见度和含水量的云雾对 THz 波的传播衰减. 结果表明: THz 波段的云雾衰减较微波、毫米波段的衰减严重得多; THz 波段的云雾衰减随能见度的减小和含水量的增加而增大, 对于相同能见度和含水量的云雾衰减并非随频率的提高而单调增加; 同时温度对 THz 波段的云雾衰减影响不大, 在整个 THz 波段并不存在明显的规律.

关键词 THz 波; 传播衰减; 云雾滴尺寸分布; Rayleigh 近似; Mie 理论

中图分类号 TN011 **文献标志码** A **文章编号** 1005-0388(2015)04-0718-05

Attenuation of Terahertz-wave due to cloud and fog

LU Changsheng¹ WU Zhensen¹ ZHAO Zhenwei² LIN Leke²

ZHANG Xin² LI Haiying¹

(1. Xidian University, School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xi'an Shaanxi 710071, China;

2. National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radio Wave Propagation, Qingdao Shandong 266107, China)

Abstract Based on the fog drop size distribution (DSD) model of radiation and advection fog, the propagation attenuation of the fog is obtained in THz band by using Rayleigh absorption approximation and Mie theory. The results show that the fog attenuation in THz band is larger than that in microwave and millimeter band. The attenuation is increases as the water content increases or as the visibility decreases. The attenuation of fog with same water content or visibility varies non-monotonically with frequency increases. Meanwhile, the effect of temperature is not significant during the range fog can presence and has no regular pattern in the THz band.

Key words THz; propagation attenuation; fog and clouds DSD; Rayleigh approximation; Mie theory

收稿日期: 2014-09-24

资助项目: 国家自然科学基金(No. 61179003, 61401410, 61471329)

联系人: 卢昌胜 E-mail: lcsqmx@163.com

引言

THz 波的电磁频率在 $0.1 \sim 10$ THz ($10^{11} \sim 10^{13}$ Hz) 之间, 介于微波和红外波段之间, 由于处于电子学向光子学的过渡领域, 它集成了微波通信与光通信的优点. 相比较这两种通信手段, THz 波通信表现出一些特有的优良性质. 较微波通信: 其通信容量大, 波束更窄, 方向性好, 可以探测更小的目标以及更精确地定位; 具有更好的保密性及抗干扰能力. 较光通信: THz 光子能量低, 能量效率更高; THz 波具有很好的穿透沙尘的能力, 可以在大风沙尘以及浓烟等恶劣环境下进行正常通信工作. 然而 THz 通信也具有明显的局限性. 例如在 THz 波通过大气时, 水蒸气等导致的强吸收使得其效率降低. 由于 THz 无线电系统的工作波长与云滴、雾滴的尺度相当, 因此云滴、雾滴对 THz 信息系统的影响较对毫米波系统的影响严重得多, 这将严重制约未来 THz 频段信息系统的设计和应用保障. 因此需要对云雾的 THz 波传播特性进行深入研究.

1 云雾的物理特性

雾是由悬浮在近地面空气中缓慢沉降的水滴或冰晶质点组成的一种集合体, 雾也可以看作是与地面接触受地面阻止其垂直运动的云. 根据雾的能见度和含水量的不同又将雾分成不同的类型, 能见度低于 50 m 的为重雾, 能见度低于 200 m 的为浓雾, 能见度低于 500 m 的为大雾, 能见度大于 1 000 m 的雾称为轻雾或霭^[1]. 观测表明, 雾滴半径通常在 $1 \sim 60 \mu\text{m}$ 之间. 根据形成雾的地域和形成雾的机理, 可把雾分成平流雾和辐射雾. 一般认为海雾为平流雾, 内陆雾为辐射雾. 辐射雾的雾滴直径通常小于 $20 \mu\text{m}$, 而平流雾的平均直径具有 $20 \mu\text{m}$ 量级. 云具有与雾相类似的特征.

根据实测滴谱分布的不同, 人们采用不同的模型来描述云雾滴谱, 使用最多的云雾滴谱分布为广义 gamma 分布^[2]

$$n(r) = ar^\alpha \exp(-br^\beta). \quad (1)$$

式中: r 为雾滴半径; n 为单位体积、单位半径间隔内的雾滴数, 若雾滴的半径单位用 m, 其单位为 m^{-4} , 若雾滴的半径单位用 μm , 其单位为 $\text{m}^{-3} \mu\text{m}^{-1}$; 其他参数为确定雾滴尺寸分布的参数. 被广泛采用的另一种较为简单的云雾滴谱模型为 $\alpha = 2, \beta = 1$ 时的 Khragian-Mazin 雾滴谱模型^[3]:

$$n(r) = ar^2 \exp(-br), \quad (2)$$

其单位为 m^{-4} .

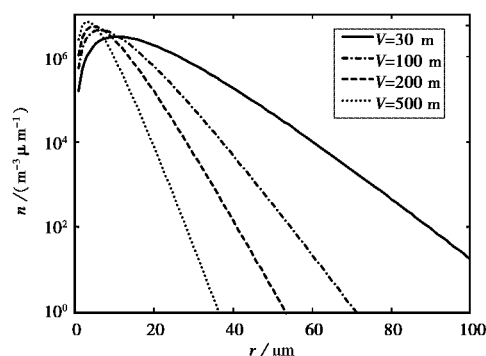
在这种模型下云雾尺寸分布参数与宏观物理量之间的关系更为简洁. 赵振维在此基础上导出了平流雾和辐射雾滴谱分布与能见度 V 和含水量 W 之间的关系^[4]:

$$\begin{aligned} n(r) &= 1.059 \cdot 10^7 V^{1.15} r^2 \exp(-0.8359 V^{0.43} r) \\ &= 3.73 \cdot 10^5 W^{-0.804} r^2 \exp(-0.2392 W^{-0.301} r); \end{aligned} \quad (3)$$

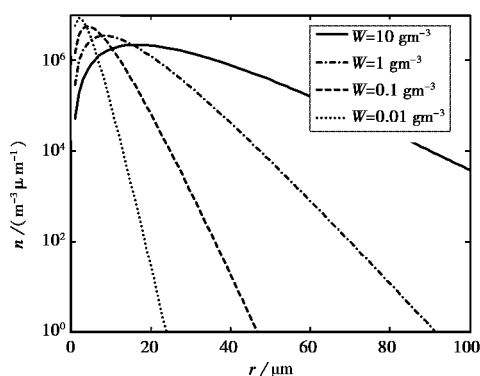
$$\begin{aligned} n(r) &= 3.104 \cdot 10^{10} V^{1.7} r^2 \exp(-4.122 V^{0.54} r) \\ &= 5.400 \cdot 10^7 W^{-1.104} r^2 \exp(-0.5477 W^{-0.351} r). \end{aligned} \quad (4)$$

式(3)和(4)中 n 的单位为 $\text{m}^{-3} \mu\text{m}^{-1}$

图 1 分别给出了不同能见度和含水量的平流雾粒子尺寸分布.



(a) 不同能见度



(b) 不同含水量

图 1 平流雾粒子分布

影响雾的含水量和能见度主要是雾滴尺度的不同. 从图 1 可以看出: 大尺寸的粒子含量越多, 能见度越小; 反之, 大粒子的含量越少, 能见度越大. 对于含水量来说, 显而易见, 含水量越大, 大尺寸的粒子含量越多; 反之, 大粒子的含量越少, 含水量越少.

为了计算云雾在 THz 波段的辐射衰减, 需要知道水的复折射指数. W. J. Ellison 在广泛收集实验

数据的基础上建立了纯水的复折射指数的计算方法^[5],该方法适用的频率范围为 $[0, 25]$ THz,温度范围为 $[0, 100]$ °C. 因此,采用该方法计算云雾在整个 THz 波段的复折射指数. 图 2 给出在温度为 0 °C 时 THz 波段的复折射指数分布.

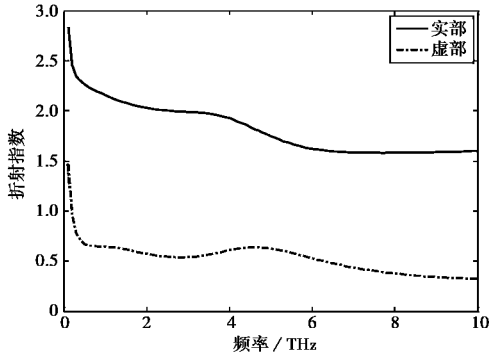


图 2 THz 波段纯水的复折射指数分布

2 云雾对 THz 波的衰减特性

粒子散射的计算通常引入尺度数 α , $\alpha = 2\pi r/\lambda$, 并按 α 的大小将散射分为三类: Rayleigh 散射、Mie 散射和几何光学散射. 当 $\alpha \ll 1$, 一般采用 Rayleigh 散射理论进行计算; 当 $0.1 < \alpha < 50$ 时, 用 Mie 散射理论进行计算; 当 $\alpha > 50$ 时, 用几何光学理论进行计算. 由于云雾滴半径 (1~50 μm) 与 THz 波长 (30~3 000 μm) 比较, 在 THz 波波长低端与云、雾滴尺寸相当, 在 THz 波段波长高端较云、雾滴尺寸大. 因此需要根据尺度数的大小灵活选择. 不同频点和粒子半径处计算方法的选择如图 3 所示. 图中左上角蓝色区域采用 Rayleigh 近似方法计算, 红色区域采用 Mie 理论计算.

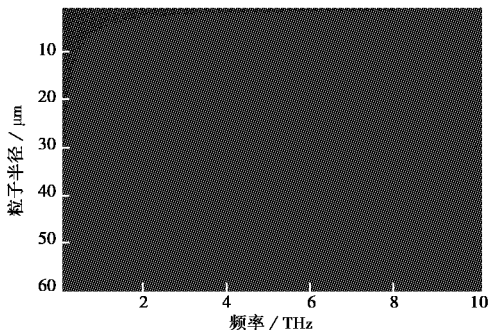


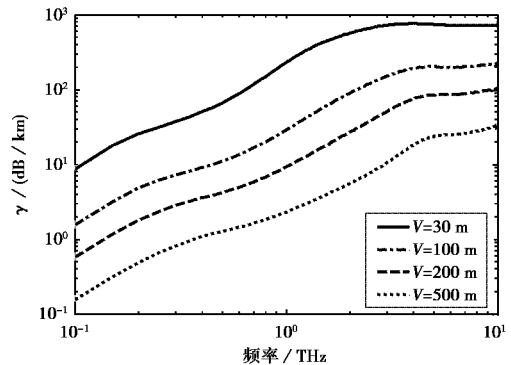
图 3 云雾在 THz 波段计算方法选择

Rayleigh 近似时云雾滴的吸收截面远大于散射截面, 体消光系数近似等于体吸收系数, 其值为单位体积所有云雾粒子吸收截面值之和, 因此云雾特征衰减可表示为^[4]

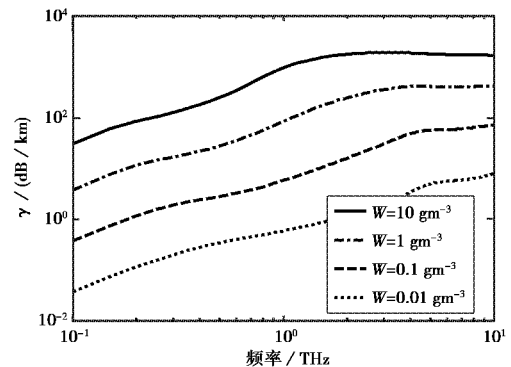
$$\gamma = 4.343 \cdot 10^3 \int_0^\infty Q_a(r) n(r) dr. \quad (5)$$

式中: $Q_a(r)$ 为半径为 r 粒子的吸收截面; γ 的单位为 dB/km. 随着 α 的增大 Rayleigh 近似不再适用, 需要使用 Mie 理论计算云雾滴的消光截面 $Q_e(r)$, 此时用 $Q_e(r)$ 代替式 (5) 中的 $Q_a(r)$.

下面分别从能见度、含水量和温度三方面研究云雾对 THz 波的传播衰减. 首先研究雾的能见度和含水量对 THz 波的传播影响. 图 4 给出了能见度 V 为 30、100、200、500 m 及含水量 W 为 10、1、0.1、0.01 gm^{-3} 时平流雾在环境温度为 0 °C 时的特征衰减.



(a) 不同能见度



(b) 不同含水量

图 4 平流雾的特征衰减

从图 4 可以看出, THz 波段云雾衰减较微波、毫米波段的衰减要严重得多. 能见度为 30 m 的平流雾(重雾)在 THz 波段的高端特征衰减甚至达到了 700 dB/km. 能见度为 500 m 的平流雾(大雾)的特征衰减也达到了 30 dB/km.

从图 4 还可以看出, 雾的 THz 波传播衰减不是频率的单调函数. 在薄雾时, 衰减随频率的增加而单调增加; 重雾时, 在 THz 波段低端雾衰减随频率的增加而增大, 但在 THz 波段的高端雾衰减随频率的

增加略有下降. 这是因为在 THz 波段低端, 波长较雾滴尺度大得多, 对其计算采用 Rayleigh 近似, 其衰减与频率成正比, 与波长成反比, 因此特征衰减随频率的增加而增大; 在 THz 波段高端, 雾滴的尺度与波长相当, 其散射处于 Mie 散射的振荡区域, 其平均消光截面大于光学极限值 ($2\pi r^2$), 随着频率增加, 波长变短, 其衰减趋于光学极限, 造成衰减随波长的变短而略有减小. 能见度较大和含水量较少的雾含有更多的小尺寸粒子, 在整个 THz 波段其衰减主要由 Rayleigh 近似计算结果决定, 因此这些雾的衰减随频率的提高而单调增大.

从图 5 可以看出, 具有相同能见度的平流雾衰减大于辐射雾衰减. 这是由于在相同能见度条件下, 辐射雾的雾滴小而多, 而平流雾的雾滴大而少.

由于水的复折射指数是温度的函数, 因此云雾的特征衰减也应是温度 t 的函数. 图 6 给出了相同含水量 ($W=0.1 \text{ gm}^{-3}$) 的辐射雾在不同环境温度下的变化曲线.

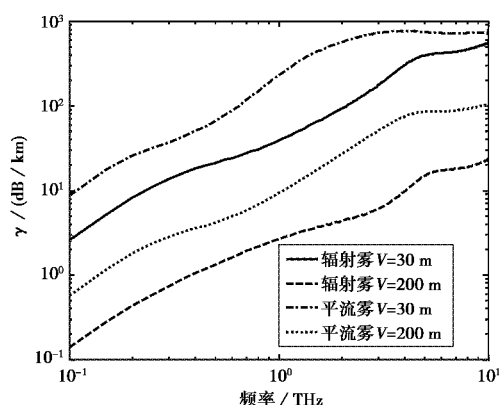


图 5 辐射雾和平流雾的衰减比较

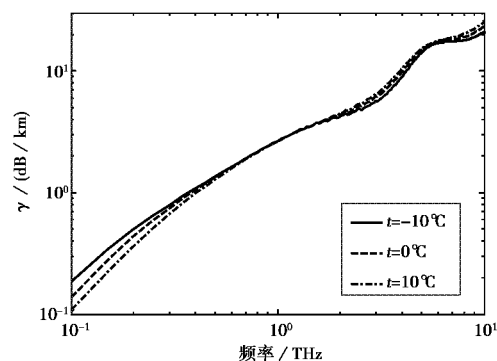


图 6 温度对雾衰减的影响

从图 6 可以看出, 在 THz 波段低频区域, 特征衰减随温度的增加而减小, 而区域边界又与雾的含

水量和能见度有关. 同时, 温度变化对特征衰减的影响在不同的含水量和能见度条件下也是不同的. 因此, 在 THz 波段中云雾的特征衰减随温度的变化没有明显的规律.

在 THz 波段云雾的传播衰减随频率的提高而增大, 而大粒子含量较多的重雾在 THz 高频段的衰减随频率提高略有降低. 另外云雾衰减随能见度的减小和含水量的增加而增大. 在云雾存在的温度范围内, 温度对云雾衰减的影响较小且在整个 THz 波段不存在明显的变化规律.

3 结 论

通过本文的研究表明 THz 波段云雾衰减较微波、毫米波段的衰减严重得多. 云雾衰减随能见度的减小和含水量的增加而增大. 对于相同能见度和含水量的云雾衰减并非随频率的提高而单调增加. 同时, 环境温度对 THz 波段的云雾衰减影响不大. 本文通过对云雾在 THz 波段传播特性的研究可以为 THz 信息系统的设计提供基本信息. 下一步则需要通过收集不同气象条件下的传播数据建立传播模型为系统的余量设计、运行和维护提供技术支持.

参考文献

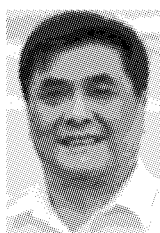
- [1] 王彬华. 普通气象学[M]. 济南: 山东人民出版社, 1961.
- [2] 邹进上, 刘长盛, 刘文保. 大气物理基础[M]. 北京: 气象出版社, 1982.
- [3] ULABY F T, MOORE R K, FUNG A K. Microwave Remote Sensing [M]. London: Addison-Wesley Publishing Company, 1981.
- [4] 赵振维. 水凝物的电波传播特性与遥感研究[D]. 西安电子科技大学, 2001.
ZHAO Zhenwei. Study on Radiowave Propagation Characteristics and Remote Sensing of Hydrometeors [D]. Xi'an: Xidian University, 2001.
- [5] 沈广德, 赵振维, 林乐科, 等. 海雾对 8 mm 的衰减和闪烁研究[J]. 电波科学学报, 1999, 14(1): 66-70.
SHEN Guangde, ZHAO Zhenwei, LIN Leke, et al. Sea fog attenuation and scintillation at 33.5 GHz[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1999, 14(1): 66-70. (in Chinese)
- [6] ELLISON W J. Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure, over the frequency range 0 ~ 25 THz and the temperature range 0 ~ 100°C [J]. J Phys Chem Ref Data, 2007, 36(1): 1-18.

- [7] DEBYE P. Polar Molecules [M]. New York: Dover Publications, 1929.

作者简介



卢昌胜 (1983—), 男, 甘肃人, 西安电子科技大学博士研究生, 主要从事毫米波、太赫兹波大气传播特性方面的研究.



吴振森 (1946—), 男, 湖北人, 西安电子科技大学教授, 主要从事无线电物理、光学以及等离子体方面的研究.



赵振维 (1965—), 男, 河北人, 研究员, 博士, 中国电子科技集团公司首席专家, 中国电波传播研究所副总工程师, 电波环境特性及其模化技术重点实验室常务副主任, 长期从事电波环境及其传播特性的研究和国际标准的制定.