

沙尘媒质微波衰减特性研究

董群锋^{1,2}, 郭立新¹, 王立², 张辉², 王明军²

(1.西安电子科技大学 物理与光电学院, 西安 710071;

2.咸阳师范学院, 物理与电子工程学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 目的 研究沙尘媒质中微波衰减特性。方法 根据随机媒质电磁波传播理论, 给出了沙尘媒质中沿水平路径和沿地空路径的微波衰减和相移模型, 与 Sharief, Erdenekhuu 和尹文言衰减模型计算结果进行比较和分析。结果 衰减模型与 Goldhirsh 模型比较吻合, 验证了其正确性。模型预测结果与 Sharief 模型结果一致。结论 仿真结果验证了提出模型的有效性, 模型计算方便, 适用于不同频率。

关键词: 微波; 沙尘; 衰减

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.06.015

中图分类号: TJ01; TB114

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2016)06-0000-05

Research on Microwave Attenuation in Sand and Dust Medium

DONG Qun-feng^{1,2}, GUO Li-xin¹, WANG Li², ZHANG Hui², WANG Ming-jun²

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

2.Department of Physics and Electronic Engineering, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, China)

ABSTRACT: Objective To research characteristics of microwave attenuation in sand and dust medium. **Methods** A model on microwave attenuation and phase shift of sand and dust medium along horizontal and earth-space paths was given according to the electromagnetic wave propagation theory in random media. The model was compared with results according to attenuation models proposed by Sharief, Erdenekhuu and Wenyan. **Results** The attenuation model was consistent with the Goldhirsh model and the validity of proposed model was verified. The result predicted by the model agreed with that of the Sharif's model. **Conclusion** The simulation results verify accuracy and validity of the proposed model. The model is a quick and easy calculating way suitable for different frequencies.

KEY WORDS: microwave; sand and dust; attenuation

沙尘暴对气候、空气质量及通信系统的影响研究一直是倍受关注的课题^[1-4]。沙尘粒子对电磁波信号的吸收和散射效应,使信号产生衰减、去极化

效应,甚至引起微波、毫米波通信系统中断^[5]。为精确预测沙尘暴对微波/毫米波通信系统的影响,需要对沙尘媒质中的衰减进行计算。基于 Rayleigh

收稿日期: 2016-08-18; 修订日期: 2016-09-26

Received: 2016-08-18; Revised: 2016-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(61102018); 中国博士后基金项目(2014M562371); 陕西省自然科学基金项目(2014JM8312)。

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61102018), the National Science Foundation for Post-doctoral Scientists of China (2014M562371), and the Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (2014JM8312).

作者简介: 董群锋(1977—),男,陕西人,博士,副教授,主要研究方向为天线罩及电磁波传播。

Biography: DONG Qun-feng(1977—), Male, Tfrom Shaanxi, Ph.D., Associate professor, Research focus: radome, radio wave propagation and scattering in random media.

散射, Adel 研究了沙尘尺寸分布对微波传播的影响^[6]。Ahmed 和 Adel 等人通过地域沙尘的尺寸分布测量数据, 建立微波衰减和相移模型^[7]; 基于 Rayleigh 散射, Goldhirsh 建立了沙尘暴二维的衰减与后向散射模型^[8]; Elabdin 应用 Mie 理论, 给出沙尘衰减的表达式^[9], 但表达式较为复杂。对于地空路径上沙尘媒质的电波传播特性, Sharief^[10]研究了 x 波段地空路径的电磁波传播特性; Erdene-khuu^[11]假定地空路径上沙尘粒子均匀分布, 给出了地空路径沙尘总衰减模型。国内也开展沙尘媒质中的电波传播特性研究^[12-17]。尹文言^[16]、徐英霞^[17]等人在 Rayleigh 散射研究了沙尘粒子尺寸分布对微波传播的影响。文中基于 Rayleigh 散射, 应用沙尘粒子数密度与能见度、等效粒径的关系, 给出了沙尘媒质中沿水平路径和地空路径的衰减模型, 简化了沙尘粒子随机分布的复杂性对微波传播的影响。该模型适用于不同频率, 并与已有的文献结果进行了比较分析。

1 水平路径沙尘的微波衰减

由粒子散射产生的衰减率 α (dB/km) 和相移率 β (°/km) 为^[10]:

$$\alpha = 8.686 \times 10^3 \frac{2\pi}{k_0^2} \int_0^\infty \text{Re}[S(0)] N(a) da \quad (1)$$

$$\beta = 57.296 \times 10^3 \frac{2\pi}{k_0^2} \int_0^\infty \text{Im}[S(0)] N(a) da \quad (2)$$

式中: k_0 为自由空间传播常数, m^{-1} ; $N(a)$ 为粒子尺寸分布密度, $N(a) = N_0 p(a)$; a 为粒子半径, mm。

由于沙尘粒子尺寸比较小, 频率较低时, 满足 $ka \ll 1$ 的条件 (k 为波数), 所以可以采用 Rayleigh 近似下沙尘粒子的前向散射振幅^[3]:

$$S(0) = k_0^2 \left(\frac{\epsilon_m^* - 1}{\epsilon_m^* + 2} \right) a^3 \quad (3)$$

式中: a 为粒子半径, mm; ϵ_m^* 为沙尘粒子的介电常数。

沙尘媒质中单位体积内的粒子数为^[5]:

$$N_0 = 2.2512 \times 10^{-9} \frac{1}{V_b^{1.07} a_e^3} \quad (4)$$

式中: a_e 沙尘粒子等效粒径,

$$a_e = \left[\int_0^\infty a^3 p(a) da \right]^{\frac{1}{3}}.$$

将式(3)和(4)代入分别代入式(1)和(2)中, 可得衰减率 α 和相移系数 β 表达式为:

$$\alpha = 7.7 \times 10^{-3} \cdot \frac{F}{V_b^{1.07}} \cdot \frac{\epsilon''}{(\epsilon' + 2)^2 + \epsilon''^2} \quad (5)$$

$$\beta = 1.7 \times 10^{-2} \cdot \frac{F}{V_b^{1.07}} \cdot \frac{(\epsilon' - 1)(\epsilon' + 2) + \epsilon''^2}{(\epsilon' + 2)^2 + \epsilon''^2} \quad (6)$$

式中: F 为电磁波频率, GHz; V_b 为能见度, km; ϵ' 和 ϵ'' 分别为 ϵ_m^* 的实部和虚部。

2 地空路径沙尘的微波衰减和相移

地空路径上能见度与高度的关系^[10]为:

$$V^\gamma = V_0^\gamma \left(\frac{h}{h_0} \right)^b \quad (7)$$

式中: V 和 V_0 分别是高度 h , h_0 对应的能见度, $b=0.28$ 。

文献[10]给出了能见度与高度的变化关系为:

$$V^\gamma = 3.24 V_0^\gamma h^{0.28} \quad (8)$$

将式(8)代入(5)和(6)式中, 则不同高度处沙尘的衰减率和相移系数为:

$$\alpha = 2.38 \times 10^{-3} \frac{F}{V_0^\gamma h^{0.28}} \frac{\epsilon''}{(\epsilon' + 2)^2 + \epsilon''^2} \quad (9)$$

$$\beta = 5.24 \times 10^{-3} \frac{F}{V_0^\gamma h^{0.28}} \frac{(\epsilon' - 1)(\epsilon' + 2) + \epsilon''^2}{(\epsilon' + 2)^2 + \epsilon''^2} \quad (10)$$

地空路径上沙尘的总衰减和总相移^[17]表示为:

$$A_m = \int_0^{h_1} \alpha \cdot \frac{dh}{\sin \theta} \quad (11)$$

$$\Phi_m = \int_0^{h_1} \beta \cdot \frac{dh}{\sin \theta} \quad (12)$$

式中: h_1 为沙尘的高度; θ 为仰角。如图 1 所示, L 为电波传播的路径长度。

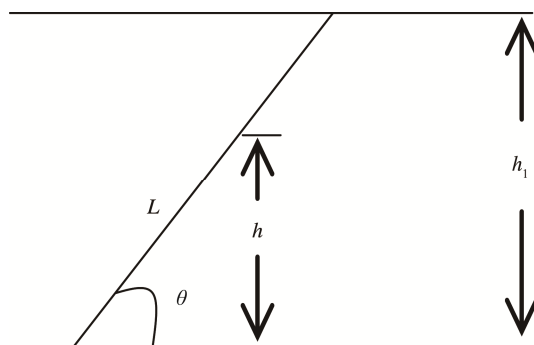


图1 地空路径传播

Fig.1 The electromagnetic wave propagation in earth-space links

利用式 (9) — (12)，地空路径上沙尘的总衰减和总相移分别为：

$$A_m = 3.31 \times 10^{-3} \frac{F}{V_0^\gamma} \frac{h_1^{0.72}}{\sin \theta} \frac{\varepsilon''}{(\varepsilon' + 2)^2 + \varepsilon''^2} \quad (13)$$

$$\Phi_m = 7.28 \times 10^{-3} \frac{F}{V_0^\gamma} \frac{h_1^{0.72}}{\sin \theta} \frac{(\varepsilon' - 1)(\varepsilon' + 2) + \varepsilon''^2}{(\varepsilon' + 2)^2 + \varepsilon''^2} \quad (14)$$

式中：\$F\$ 为频率，GHz；\$V_0\$ 为能见度，km；\$h_1\$ 为沙尘高度，km；\$\theta\$ 为仰角，(°)；\$\gamma=1.07\$。

3 数值计算

在 Rayleigh 近似，Goldhirsh^[8]给出微波在沙尘媒质中的衰减模型，其表达式为：

$$\alpha = \frac{2.317 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon''}{[(\varepsilon' + 2) + \varepsilon''^2] \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{V_b^\gamma} \quad (15)$$

尹文言模型^[16]为：

$$\alpha = 1.886 \times 10^2 \frac{f}{V_b} a_e \operatorname{Im} \left(\frac{\varepsilon_m^* - 1}{\varepsilon_m^* + 2} \right) \quad (16)$$

$$\text{式中：} a_e = \frac{\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} a^3 p(a) da}{\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} a^2 p(a) da}。$$

Alhaider^[2]模型的衰减模型：

$$\alpha = \frac{0.189}{V_b} \frac{a}{\lambda} \frac{3\varepsilon''}{[(\varepsilon' + 2) + \varepsilon''^2]} \quad (17)$$

比较尹文言模型(16)、Alhaider 模型(17)与模型(5)，可以看出，模型(5)的表达式中消除了沙尘粒子尺寸分布的影响，克服了沙尘粒子尺寸分布的复杂性对微波传播的影响。为了验证衰减模型(5)的正确性，取 \$F=24\$ GHz，水的质量分数为 5.0% 时的介电常数分别^[2]为 3.6-j0.65，应用式(5)与 Goldhirsh 的模型(15)、Alhaider 模型(17)和尹文言模型(16)对沙尘引起的衰减进行了比较，结果如图 2 所示。从图 2 可以看出，尹文言模型的预测衰减结果最大，Alhaider 模型结果较大，模型(5)和 Goldhirsh 的模型结果最小且比较吻合，验证了模型(5)的正确性。

在电磁波频率为 14, 24, 37GHz 时，介电常数分别^[4]为 3.9-j0.63, 3.6-j0.65, 4.0-j1.3，应用式(5)计算了不同频率下沙尘衰减，如图 3 所示。可以看出，沙尘的衰减随能见度的增大而减小，这是由于随着能见度的增大，单位体积中沙尘粒子的粒子数减小。对于同一能见度，衰减随频率的增大而增大。

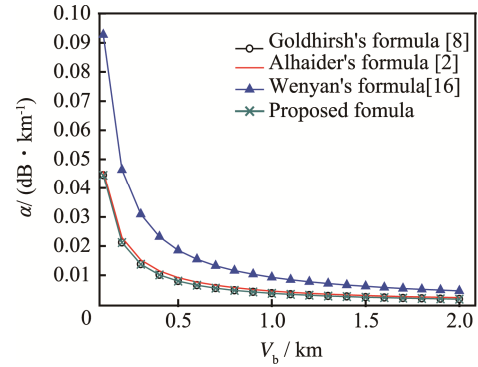


图 2 公式 (5) 与 Goldhirsh 模型、Alhaider 模型和尹文言模型计算衰减比较

Fig. 2 Comparison of attenuations obtained by Goldhirsh formula, Alhaider formula, Winyan formula and our proposed formula (5) at 24 GHz

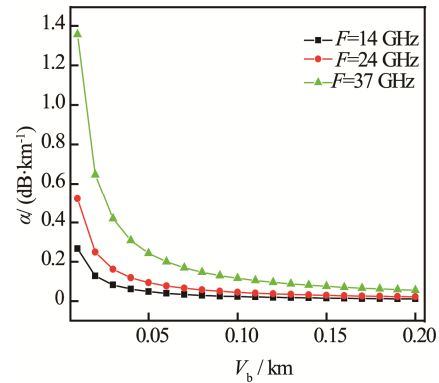


图 3 不同频率下衰减与能见度的关系

Fig. 3 Attenuation with visibility at different frequency.

Sharief^[10]给出了 10 GHz 干涉地空路径的总衰减模型(16)；Erdenekhuu^[11]假定地空路径上沙尘粒子均匀分布，给出了地空路径沙尘总衰减模型(17)，分别为：

$$A_m = (4.75)(10^{-4}) \frac{1}{\lambda V_0^\gamma} \frac{h_1^{0.72}}{\sin \theta} \quad (16)$$

$$A_m = \frac{2.317 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon''}{[(\varepsilon' + 2) + \varepsilon''^2] \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{V_0^\gamma} \cdot \frac{h_1}{\sin \theta} \quad (17)$$

尹文言给出的模型^[16]为：

$$A_m = \int_{h_0}^{h_1} \alpha \cdot \frac{dh}{\sin \theta} \quad (18)$$

$$\alpha = \frac{1.886 \times 10^2 F \cdot a_e}{V_b \exp[1.25(h - h_0)]} \left(\frac{h}{h_0} \right)^\eta \frac{\varepsilon''}{[(\varepsilon' + 2) + \varepsilon''^2]} \quad (19)$$

为了验证地空路径模式(13)的正确性，在频率为 10 GHz 时，计算结果分别与 Sharief、Erdenekhuu 模型和尹文言模型结果进行了比较，结果如图 4 所示。文中模型与 Sharief 模型结果相吻合；Erdenekhuu 模型的结果较大，这是由于该模型没有考虑地空路

径沙尘能见度随高度的变化;尹文言模型的预测衰减结果最小。同时,与 Sharief 和 Erdenekhuu 模型的比较,文中提出的式(13)满足实际且适用于不同频率。

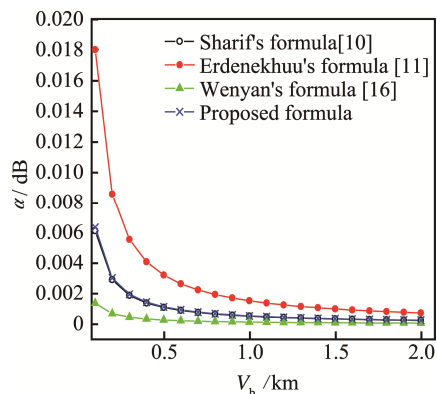


图4 式(13)与 Sharif, Erdenekhuu 和尹文言模型计算总衰减比较(10 GHz)

Fig.4 Comparison of attenuations obtained by Sharif formula, Erdenekhuu formula, Wenyan formula and our proposed formula (13) at 10 GHz

图5表示 $F=24$ GHz, 沙尘高度 2 km, $\theta=20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ 仰角对地空路径总衰减的影响。可以看出,仰角越小,总衰减越大,这是因为对于相同的沙尘高度,仰角越小,电磁波的传播路径越大。

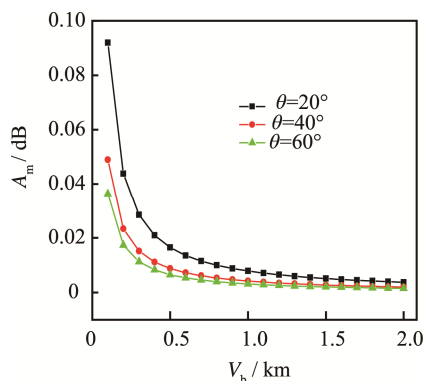


图5 总衰减与仰角的关系(24 GHz)

Fig.5 Attenuation with different elevation angle at 24 GHz.

5 结语

文中研究了沙尘媒质对微波沿水平及地空路径的传播特性的影响,推导给出了水平路径上的衰减和相移模型,与 Goldhirsh 的模型、Alhaider 模型和尹文言模型的衰减结果比较分析。计算结果表明,衰减模型与 Goldhirsh 的模型比较吻合,验证了其正确性;频率越大,衰减越大。给出了地空路径微波衰减和相移的模型,该模型简洁,适用于不

同频率。与 Sharief, Erdenekhuu 及尹文言模型计算结果比较表明,提出的衰减模型与 Sharief 模型结果相一致;Erdenekhuu 模型的结果较大,这是由于该模型没有考虑地空路径沙尘能见度随高度的变化;仰角越小,总衰减越大,这是因为对于相同的沙尘高度,仰角越小,电磁波的传播路径越大。

参考文献:

- [1] CHARISON R J, SCHWARTZ S E, HALES J M. Climate Forcing by Anthropogenic Aerosols[J]. Science, 1992, 255(5043): 423—430.
- [2] ALHAIDER M A. Radio Wave Propagation into Sandstorms System Design Based on Ten-years Visibility Data in RIYADH, Saudi Arabia in J Inf Millim[J]. Waves, 1986, 7: 1339—1359.
- [3] ANSARI A J, EVANS B G. Microwave Propagation in Sand and Dust Storms[J]. IEE Proc F, Commun, Radar & Signal Process, 1982, 129: 315—322.
- [4] DONG X Y, CHEN H Y. Microwave and Millimeter Wave Attenuation in Sand and Dust Storms[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011(10): 469—471.
- [5] CHEN H Y, KU C C. Calculation of Wave Attenuation in Sand and Dust Storms by the FDTD and Turning Bands Methods at 10~100 GHz[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2012, 60(6): 2951—2960.
- [6] ADEL A A. Effect of Particle Size Distribution on Millimeter Wave Propagation into Sandstorms[J]. In J Inf Millim Waves, 1986, 7(6): 857—868.
- [7] AHMED A S, ADEL A A, ALHAIDER M A. Airborne Dust Size Analysis for Tropospheric Propagation of Millimetric Waves into Dust Storms[J]. IEEE Trans on Geosci and Remote Sensing, 1987, 25(5): 599—693.
- [8] GOLDBHIRSH J. Attenuation and Backscatter from a Derived Two-Dimensional Duststorm Model[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2001, 49(12): 1703—1711.
- [9] ELABDIN Z, ISLAM M R. Mathematical Model for the Prediction of Microwave Signal Attenuation Due to Duststorm[J]. Progress In Electromagnetics Research M, 2009(6): 139—153.
- [10] SHARIF S M. Performance of Earth-satellite Links during Dust Storms at the X-band[J]. SES Journal, 1993, 40(33): 14—19.

- [11] ERDENEKHUU N. Microwave Attenuation Due to Dust and Sand Storm in Earth-satellite Link[C]// IEEE International Forum on Strategic Technology. 2007: 599—601.
- [12] 董庆生, 赵振维, 丛洪军. 沙尘引起的毫米波衰减[J]. 电波科学学报, 1996, 11(2): 29—32.
DONG Qing-sheng, ZHAO Zhen-wei, CONG Hong-jun. The mm-wave Attenuation due to Sand and Dust[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1996, 11(2): 29—32.
- [13] 吴成明, 郑守城, 吴振森. 微波及毫米波段沙尘暴引起的衰减及相移[J]. 电工数学进展, 2001, 8(3): 284—290.
WU Cheng-ming, ZHENG Shou-cheng, WU Zhen-sen. Attenuation and Phase Shift of Sand and Dust Storms on Microwave and Millimeter Wave[J]. Advances in Electric Mathematics, 2001, 8(3): 284—290.
- [14] 周旺. 微波传输中沙尘衰减的计算与仿真[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(8): 1259—1262.
ZHOU Wang. Calculation and Simulation of Sand and Dust Attenuation in Microwave Propagation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(8): 1259—1262.
- [15] 杨瑞科, 鉴佃军, 姚荣辉. 沙尘暴中毫米波传播衰减及双频互相关函数研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2007, 34(6): 953—957.
YANG Rui-ke, JIAN Dian-jun, YAO Rong-hui. Research on Attenuation and The Two-frequency Mutual Coherence Function for Millimeter Wave Propagation in the Sand and Dust Storm[J]. Journal of Xidian University, 2007, 34(6): 953—957.
- [16] 尹文言, 王伟. 尘暴对地-空微波、毫米波传播的影响[J]. 西北工业大学学报, 1991, 9(4): 484—492.
YIN Wen-yan, XIAO Jing-ming. Effects of Dust Storms on the Earth-space Microwave and Millimeter Wave Propagation[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1991, 9(4): 484—492.
- [17] 徐英霞, 黄际英. 沙尘暴对地空路径上 Ka 频段电波传播的影响[J]. 电波科学学报, 2003, 18(3): 328—331.
XU Ying-xia, HUANG Ji-ying. Effect of Sand and Dust Storms on Ka-band Electromagnetic Wave Propagation along Earth-space Paths[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(3): 328—331.