

降雨环境中多径信道的包络概率密度函数

弓树宏, 黄际英, 赵小龙

(西安电子科技大学理学院, 陕西西安 710071)

摘 要: 利用随机介质中波传播理论研究了随机雨介质中信号的起伏特性, 研究了降雨散射环境对多径信道中接收信号包络概率密度函数的影响, 导出了降雨环境下单波和双波模型的计算公式, 讨论了评估降雨环境中的莱斯衰落分布和瑞利衰落分布多径信道概率密度函数的研究方法. 文中的研究方法对于雪、沙尘等环境中多径信道的信号包络概率密度函数也适用.

关键词: 降雨; 多径信道; 概率密度函数

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 12-2833-05

The Envelope Probability Density Functions in Multi-Path Channels under Raining Condition

CONG Shu-hong, HUANG Ji-ying, ZHAO Xiao-long

(School of Science, Xi'an University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The fluctuant peculiarities of a signal passing through rain are studied by the theory of waves propagating through a random media. The detailed formulae are deduced for single-wave channel and two-wave channel. The methods evaluating the effects on Rayleigh fading distribution model and Rician fading distribution model induced by rain scattering are discussed. The methods used in this paper is effective for studying the impacts of meteorological scattering environment (snow, dust-storm, etc.) on the envelope probability density functions in multi-path channels.

Key words: rain; multi-path channels; probability density functions

1 引言

多径传输现象是发生在无线信道中严重限制通信系统性能的现象之一. 许多文献对典型的衰落环境中接收信号的包络概率密度进行了研究, 例如遮蔽效应、多普勒效应、多径效应等, 从理论和实验的角度得出了衰落环境中接收信号的包络概率密度函数^[1~3]. 关于气象环境对通信系统的影响, 国内外学者集中于研究衰减、去极化效应, 雨衰对天线噪声温度的贡献等^[4~6]. 事实上, 电波信号通过雨、雪、沙尘等恶劣气象环境后, 接收天线接收的信号不仅要受到随机分布粒子的衰减, 同时还接收到随机分布粒子的散射信号. 假设没有雨、雪、沙尘等天气现象发生时通信环境本身可能符合某种多径传播特点^[7, 8], 那么当这些现象发生时, 电波传播模式是原来的各路径仅仅受到衰减作用, 还是由于受到随机离散沉降粒子散射作用成为完全离散随机介质环境传播模式, 或者两种传播模式同时在起作用. 所以, 用研究离散随机介质中波传播问题的方法, 研究雨、雪、沙尘等天气现象发生时某种多径传播环境下的包络概率密度

特性, 对精细描述信道衰落特性有重要的意义.

2 降雨环境中接收信号的起伏特性

降雨环境中接收天线接收到的信号不仅要受到随机分布粒子的衰减, 同时还接收到随机分布粒子的散射信号, 不同尺寸的雨滴粒子随机分布导致散射场随机变化. 如图 1 所示, 平面简谐电波信号通过雨区, 则 r 处的场 $u(r)$ 由平均(相干)场 $u(r)$ 和起伏场(非相干场) $u_f(r)$ 构成, 接收电压 $V(r)$ 包括平均电压 $V(r)$ 和起伏电压 $V_f(r)$

$$u(r) = u(r) + u_f(r) \quad (1a)$$

$$V(r) = V(r) + V_f(r) \quad (1b)$$

为研究问题方便, 认为起伏场 $u_f(r)$ 是来自 $0 \sim z$ L 内所有粒子的散射场之和, 忽略了 $z > L$ 区域的后向散射贡献.

$$u(r) = E_i \exp(ikL - \gamma/2) \quad (2)$$

$$u_f(r) = E_i \frac{f(\hat{\theta}, \hat{\phi})}{R} \exp(ikz + ikR - \gamma/2 - \gamma/2) \quad (3)$$

收稿日期: 2007-10-09; 修回日期: 2009-07-13

基金项目: 西安电子科技大学研究生创新基金(No. 创 05022); 国家重点实验室资助项目(No. ISNZ1-01)

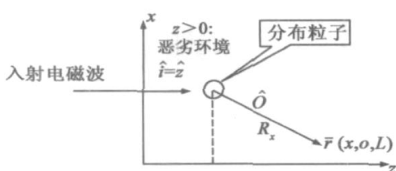


图1 电磁波入射于恶劣气象环境示意图

其中
$$I_c = \int_{D_{Min}}^{D_{Max}} \int_0^z N(D) I_c(D) dz dD \quad (4a)$$

$$I_i = \int_{D_{Min}}^{D_{Max}} \int_0^R N(D) I_i(D) dR dD \quad (4b)$$

同样,总强度 I_t 是相干强度 I_c 和非相干强度 I_i 之和,可以分别写为^[9]

$$I_t = |u|^2 = I_c + I_i \quad (5a)$$

$$I_c = |u_c|^2 = E_c^2 \exp(-\dots) \quad (5b)$$

$$I_i = |u_i|^2 = B_u(0) = E_i^2 \int_{D_{Min}}^{D_{Max}} \int_0^{L/2} \sin \frac{|f(\hat{\alpha}, D)|}{i(D)} d \alpha dD \quad (5c)$$

式(2)~(5)中 $k = n_e k_0$ 是雨区的波数, n_e 是雨区的等效折射指数^[10], k_0 是自由空间的波数. $f(\hat{\alpha}, \hat{z})$ 是散射函数, D 是雨滴的直径, $i(D)$ 是直径为 D 的雨滴粒子的消光截面, $f(\hat{\alpha}, D)$ 是直径为 D 的雨滴粒子的散射函数, $\hat{\alpha}$ 是 \hat{i} 与 \hat{o} 之间的夹角. $N(D)$ 是雨滴粒子分布谱, 和 $g(\hat{\alpha}, \hat{z})$ 分别为

$$g(\hat{\alpha}, \hat{z}) = \int_{D_{Min}}^{D_{Max}} \int_0^L N(D) i(D) dz dD \quad (6)$$

$$g(\hat{\alpha}, \hat{z}) = \frac{\exp(-\dots) - \exp(-\dots/\mu)}{1 - \mu} \quad (7)$$

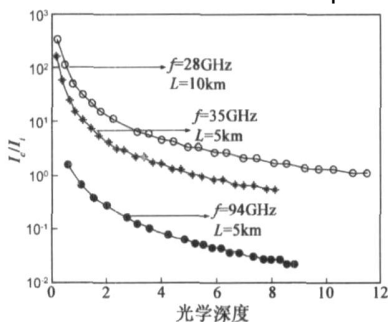


图2 I_c/I_t 随光学深度的变化关系

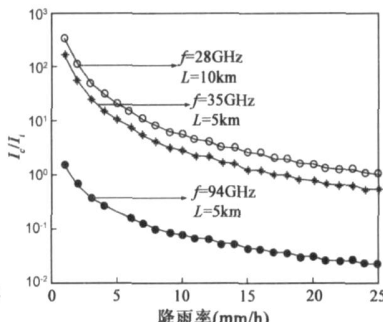


图3 I_c/I_t 随降雨率的变化关系

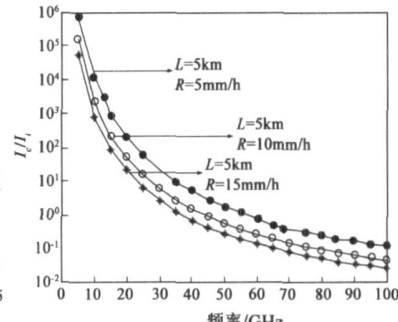


图4 I_c/I_t 随频率变化规律

从图5~图7可以看出雨区信号起伏场概率密度函数分布与降雨率、传播距离、电波频率有关,但是总体看起来概率密度函数分布情况主要由起伏方差决定.雨区起伏信号的概率密度函数分布情况还与入射信号与接收天线的有效截面有关.

图5~图7作为算例,为了计算天线有效接收截面简单、方便,只计算了单位振幅入射波和理想无方向性天线在完全匹配情况下接收信号起伏场的概率密度分布情况.如果实际应用中为高增益、窄波束天线,则需要考虑集中在窄波束内的有效散射粒子,文献[12]讨论

式(7)中 $\mu = \cos \dots$ 起伏场 $u_f(r)$ 可以写为

$$u_f(r) = A_e \exp(i \dots) = A \exp(i \dots) \quad (8)$$

根据中心极限定理可知起伏场的相位为 $0 \sim 2\pi$ 的均匀分布,而幅度服从瑞利分布^[9]

$$P(A) = \frac{1}{2} \exp(-A^2/2) \quad (9a)$$

$$P(A) = \frac{A}{2} \exp(-A^2/2) = \frac{2A}{p_{diff}} \exp(-A^2/p_{diff}) \quad (9b)$$

式(9)中 σ^2 是幅度随机变量的方差, $p_{diff} = 2\sigma^2$ 代表散射场的平均功率, $p_{diff} = I A_e$, A_e 表示接收天线有效截面.由式(1)~式(8)可知 $P(A)$ 是频率的函数,对于窄带信号可以由载频 f_0 计算的幅度概率密度函数代替整个脉冲的包络概率密度函数,对于宽带脉冲需要进行傅立叶积分,文中没有详细讨论.由式(5)和式(9)可以计算分析信号通过雨区时信号的起伏特性.图2~图7是部分算例.

从图2~图4可以看出接收点相干场和非相干场的比值是降雨率、传播距离、电波频率的函数,但总体规律是光学深度较小时接收场主要是相干场,随着光学深度增大相干场迅速减小、非相干场迅速增大.而且,一定传播路径条件下,随着频率升高相干场与非相干场的比值迅速下降,散射起伏特点几乎在所有降雨情况下都需要考虑.文献[11]指出,雨滴非相干散射导致的信号快衰落与晴空大气闪烁导致的衰减在同一数量级,所以不能忽略,文中计算结果与文献[11]中的分析结果相一致.

了少数散射粒子的散射问题,根据文献[12],粒子数为5个及6个时,散射场强度分布逐渐趋于瑞利分布,可知在窄波束条件下雨滴的随机散射场即起伏场也符合瑞利分布.因为文中考虑离散随机介质中的非相干场对接收信号的包络概率密度影响时,基于非相干场符合瑞利分布.同时文献[11]指出,雨滴非相干散射导致的接收信号包络的起伏变化与晴空湍流所致的接收信号闪烁效应是同一个数量级,因为毫米波段卫星通信(这些波段天线通常采用窄波束、高增益天线)中晴空大气所致的闪烁不能忽略,所以在窄波束条件下,雨

滴、雪等粒子的散射场影响也不能忽略,文中处理问题的方法也可以适用,计算高增益、窄波束定向天线的天

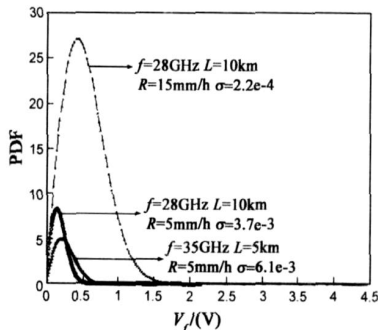


图5 Vr/V 的概率密度分布(入射波为单位振幅;无方向性接收天线)

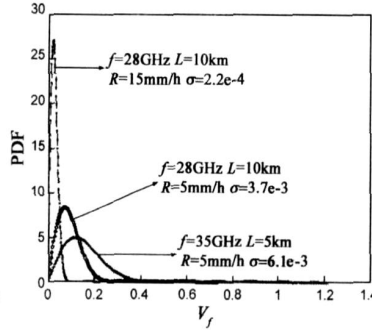


图6 Vr 的概率密度分布(入射波为单位振幅;无方向性接收天线)

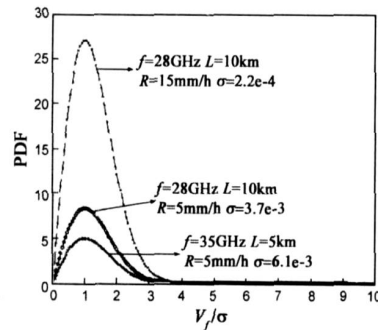


图7 Vr/sigma 的概率密度分布(入射波为单位振幅;无方向性接收天线)

3 降雨散射环境中多径信道的包络概率密度函数

为了了解信道的统计特性,准确预测和计算接收信号包络的概率密度函数很有必要,文献[7,8]中对 I-SLAC(独立开阔地区随机信道)模型的概率密度函数进行了详细的推导,导出了五种类型的闭式解,并且研究了具有漫射功率的双波模型概率密度函数(TWPD),各种多径环境中包络概率密度见文献[7]和[8].文献[7]和[8]中列出的结果,理论上已经指明了所有关于多径问题的概率密度,也从理论上包含了降雨环境模型,瑞利分布模型就是降雨非相干场的分布模型,因为降雨本身就是一种典型的随机信道模型.文中研究的问题是,针对晴空条件下特定多径传播环境下的接收信号包络概率密度,当雨、雪、沙尘等天气现象发生时,应该如何结合文献[7]和[8]中的研究结果,利用研究离散随机介质中波传播问题的方法,给出一个合理、准确的接收信号包络概率密度.本文利用研究降雨环境中相干场与非相干场的特点,研究降雨散射环境对各种类型信道模型中的概率密度函数影响的规律.

对于单波模型,如不考虑雨滴散射功率即通信系统中满足自由空间视距传播条件情况,则为无衰落信道,如果降雨发生可能呈现瑞利衰落分布或者莱斯衰落分布,降雨环境下该信道信号包络概率密度函数为

$$f_{RO, w}(V_r) = \begin{cases} \frac{2}{P_{diff}} \exp\left(-\frac{V_r^2}{P_{diff}}\right), & I_i \ll I_c \\ \frac{2}{P_{diff}} \exp\left(-\frac{V_r^2}{P_{diff}}\right) I_0\left(\frac{2V_{1r}}{P_{diff}}\right), & I_i \ll I_c \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中 P_{diff} 和 V_{1r} 表示为

$$P_{diff} = \begin{cases} (I_i + I_c) A_e, & I_i \ll I_c \\ I_i A_e, & I_i > I_c \end{cases} \quad (11 a)$$

$$V_{1r} = V_1 \exp(-\gamma/2) \quad (11 b)$$

其中 A_e 代表接收天线有效截面, γ 代表光学深度.

线有效截面即可.

对于双波模型,如果不考虑雨滴散射功率即通信系统链路受到反射影响情况,则为干涉型衰落,但是一旦降雨发生则可能呈现瑞利、莱斯、TWPD 分布特点.当两路径因受到雨滴散射作用使非相干强度与相干强度可比或者非相干强度大于相干强度,则接收信号严格讲应该是两个方差不同的瑞利分布随机信号的叠加,考虑到各路径的方差差别不大,所以瑞利分布近似表示;当两路径中仅有一路径的相干强度明显大于非相干强度,则接收信号成为莱斯分布;当两路径虽然都受到雨滴散射作用,但是相干强度都明显大于非相干强度,则呈现出 TWPD 分布,它们的概率密度函数写为

$$f_{RT}(V_r) = \begin{cases} \frac{2}{P_{diff}} \exp\left(-\frac{V_r^2}{P_{diff}}\right), & \text{Rayleigh} \\ \frac{2}{P_{diff}} \exp\left(-\frac{V_r^2}{P_{diff}}\right) I_0\left(\frac{2V_r}{P_{diff}}\right), & \text{Rician} \\ \frac{2}{P_{diff}} \exp\left(-\frac{V_r^2}{P_{diff}} - K_r\right) \left(1 + \frac{2V_r}{P_{diff}} K_r\right), & \text{TWPD} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中的参量为

$$P_{diff} = \begin{cases} (I_{i1} + I_{1c} + I_{21} + I_{2c}) A_e, & \text{Rayleigh} \\ (I_{i1} + I_{1c} + I_{21}) A_e \text{ or } (I_{i1} + I_{2c} + I_{21}) A_e, & \text{Rician} \\ (I_{i1} + I_{21}) A_e, & \text{TWPD} \end{cases} \quad (13 a)$$

$$V_r = \begin{cases} V_1 \exp(-\gamma_1/2), & I_{21} \ll I_{2c} \text{ and } I_{i1} \ll I_{1c} \\ V_2 \exp(-\gamma_2/2), & I_{i1} \ll I_{1c} \text{ and } I_{21} \ll I_{2c} \end{cases} \quad (13 b)$$

$$K_r = \frac{V_1^2 \exp(-\gamma_1) + V_2^2 \exp(-\gamma_2)}{P_{diff}} \quad (13 c)$$

$$\gamma = \frac{2V_1 \exp(-\gamma_1/2) V_2 \exp(-\gamma_2/2)}{V_1^2 \exp(-\gamma_1) + V_2^2 \exp(-\gamma_2)} \quad (13 d)$$

对于莱斯衰落分布模型,如果主波信号经过雨区相干强度远大于非相干强度,则概率密度仍服从莱斯分布,但漫射起伏功率应该为受到衰减以后的漫射起伏功率与主波信号传播产生的散射功率之和,原来漫

射起伏功率的衰减问题考虑比较复杂,可以近似地只考虑雨滴的吸收衰减来简化计算模型,但是原有的漫射起伏功率需要根据具体链路和具体环境统计得出,所以得出的式(14)是一个待定参数公式.

$$f_R(\rho) = \begin{cases} \frac{2}{P_{\text{diff}} + P_{\text{diff}r}} \exp\left(-\frac{\rho^2 - V_1^2 \exp(-\rho)}{P_{\text{diff}} + P_{\text{diff}r}}\right) \\ I_0\left(\frac{2V_1 \exp(-\rho/2)}{P_{\text{diff}} + P_{\text{diff}r}}\right), I_c \gg I_i \\ \frac{2}{P_{\text{diff}} + P_{\text{diff}r}} \exp\left(-\frac{\rho^2}{P_{\text{diff}} + P_{\text{diff}r}}\right), I_i > I_c \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中 P_{diff} 表示受到降雨衰减以后的漫射功率, $P_{\text{diff}r}$ 表示主波信号在雨区传播后产生的散射功率贡献,可以表示为式(15)

$$P_{\text{diff}r} = \begin{cases} I_i A_e, I_c \gg I_i \\ (I_c + I_i) A_e, I_i > I_c \end{cases} \quad (15)$$

对于瑞利多径衰落分布模型在降雨散射环境下只

需要考虑原有漫射功率的衰减,式(16)也是一个待定参数公式.

$$f_R(\rho) = \frac{2}{P_{\text{diff}}} \exp\left(-\frac{\rho^2}{P_{\text{diff}}}\right) \quad (16)$$

式(16)中 P_{diff} 表示受到降雨衰减以后的漫射功率. 图 8 ~ 图 10 是降雨环境下单波模型和双波模型包络概率密度特点. 图 11 ~ 图 13 是讨论降雨环境下多径信道中的概率累积分布函数(CDF)算例.

由图 8 ~ 图 10 可以看出,在降雨环境的影响下单波模型和双波模型的概率密度函数变化很大,这说明在降雨情况下信号衰落特性与无降雨时几乎完全不同,降雨环境对多径信道中信号包络概率密度函数的影响不可忽略. 图 10 可以看出,接收信号包络概率分布随着降雨率增大从双波分布模式过渡成莱斯分布和瑞利分布模式,且频率越高过渡越快.

由图 11 ~ 图 13 可以看出,在降雨环境的影响下单

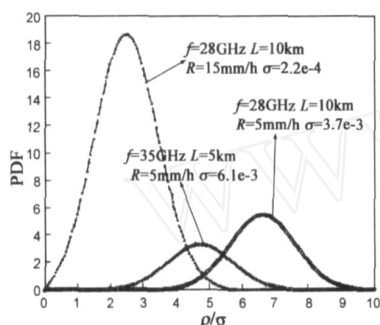


图8 单波模型在降雨环境中的PDF分布(入射波为单位振幅;无方向性接收天线)

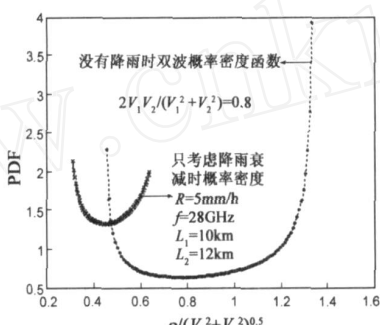


图9 只考虑降雨衰减时双波模型的PDF算例

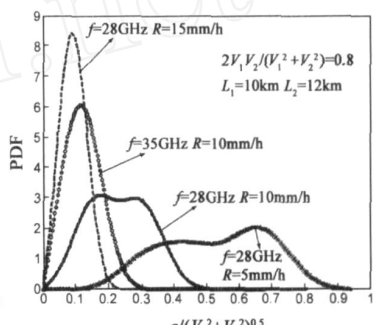


图10 考虑降雨散射时双波模型PDF算例

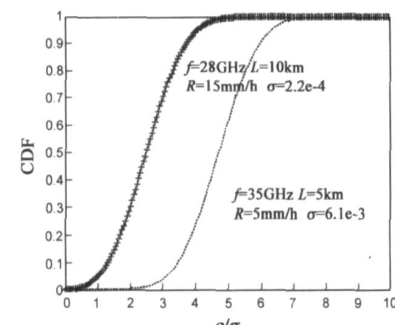


图11 考虑降雨散射时单波模型CDF算例

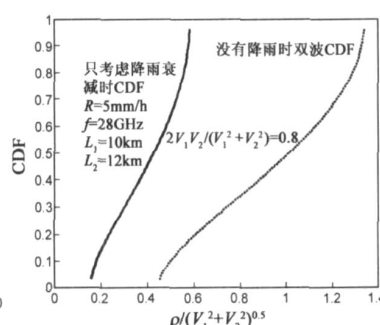


图12 只考虑雨衰是双波模型CDF算例

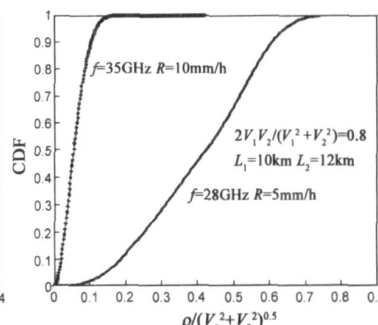


图13 考虑雨散射是双波模型CDF算例

波模型和双波模型的 CDF 分布与无降雨时差别很大,说明降雨环境对多径信道中信号包络概率密度函数的影响不可忽略.

4 结论

接收点相干场和非相干场的比值是降雨率、传播距离、电波频率的函数,但总体规律是光学深度较小时接收场主要是相干场,随着光学深度越大相干场迅速减小、非相干场迅速增大,随着频率升高相干场与非相

干场的比值迅速下降,散射场影响几乎在所有降雨情况下都需要考虑.

雨区信号起伏场概率密度函数分布与降雨率、传播距离、电波频率有关,概率密度函数分布情况主要由起伏方差决定. 雨区起伏信号的概率密度函数分布情况还与入射信号与接收天线的有效截面有关.

降雨散射环境的影响下单波模型和双波模型的概率密度函数变化很大,说明在降雨情况下信号衰落特性与无降雨时几乎完全不同,降雨环境对多径信道中

信号包络概率密度函数的影响不可忽略。接收信号包络概率分布随着降雨率增大从双波分布模式过渡成莱斯分布和瑞利分布模式,而且频率越高过渡越快。通过本文以 Weibull 谱为例研究得知恶劣气象环境对多径信道包络概率密度的影响不容忽视,需要根据具体气候特点和通信链路采取适当的抗衰落措施。

参考文献:

- [1] Reudink D O. Properties of mobile radio propagation above 400 MHz[J]. IEEE Trans on VT, 1974, 23(4):143 - 159.
- [2] Loo C. Statistical models for land mobile and fixed satellite communications at Ka band[A]. IEEE 46th VT Conf [C]. Atlanta:IEEE, 1996. 1023 - 1027.
- [3] 黄和,王东进,刘发林. Ka 波段移动卫星信道的综合模型及误码率分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2005, 35(3): 347 - 353.
Huang He, Wang Dongjin, Liu Falin. Modeling of Ka-band mobile satellite channel and ber performance analysis[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2005, 35(3):347 - 353. (in Chinese)
- [4] Alouini M S, Borgsmiller S A, Steffes P G. Channel characterization and modeling for Ka-band very small aperture terminals [J]. Proc of the IEEE, 1997, 85(6):981 - 997.
- [5] Kassianides C N, Otung I E. Dynamic model of tropospheric scintillation on earth space paths[J]. IEE Proc Microw Antennas Propg, 2003, 150(2):97 - 104.
- [6] 李应乐,黄际英. 雨滴衰减截面的系统模型与参数辨识[J]. 电子学报, 2004, 32(3):505 - 507.
Li Yingle, Huang Jiying. The model of attenuation cross-section for raindrops and estimation of the parameters[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(3):505 - 507. (in Chinese)
- [7] 格雷戈里 D 德金. 空-时无线信道[M]. 朱世华,等译. 西安:西安交通大学出版社, 2004. 75 - 102.
- [8] Durgin G D, Rappaport T S, de Wolf D A. New analytical models and probability density functions for fading in wireless communications[J]. IEEE Trans on Communications, 2002, 50(6):1005 - 1015.
- [9] Ishimaru A. Wave Propagation and Scattering in Random Medium (Part-I) [M]. New York:Academic Press, 1978. 132 - 160.
- [10] 李应乐,黄际英. 雨介质的等效介电常数模型[J]. 光子学报, 2002, 32(3):378 - 381.
Li Yingle, Huang Jiying. Models of rain equivalent dielectric constant[J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 32(3):378 - 381. (in Chinese)
- [11] Otung I E, Evans B G. Tropospheric scintillation and the influence of wave polarisation [J]. Electronics Letters, 1996, 32(4):307 - 308.
- [12] Daba J S, Bell M R. Statistics of the scattering cross-section of a small number of random scatterers[J]. IEEE Trans on AP, 1995, 43(8):773 - 783.

作者简介:

弓树宏 男, 1978 年生于山西武乡, 2004 年 4 月于西安电子科技大学获得无线电物理专业硕士学位, 2008 年 12 月于西安电子科技大学获得无线电物理专业博士学位, 现为西安电子科技大学副教授, 主要研究兴趣为随机介质中波传播与散射及其对通信系统的影响。
E-mail: LJBPR2003@yahoo.com.cn

黄际英 女, 1939 年生于江西南昌, 1962 年毕业于武汉大学物理物理系, 现为西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为毫米波传播、散射及其应用。
E-mail: jyhuang@xidian.edu.cn

赵小龙 男, 1976 年生于甘肃天水, 2005 年 4 月于西安电子科技大学获得无线电物理专业硕士学位, 2008 年 12 月于西安电子科技大学获得无线电物理专业博士学位, 现为天水师范学院副教授, 主要研究兴趣为电磁波大气反常传播及其对通信系统的影响。
E-mail: xlzhao76@163.com