#### doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2017.01.015

**引用格式:**周先春,黄猛. 基于雨衰雪衰影响的空间信道统计模型[J]. 电讯技术,2017,57(1):90-94. [ZHOU Xianchun, HUANG Meng. A geometrical statistical channel model based on rain and snow fading effect[J]. Telecommunication Engineering,2017,57(1):90-94. ]

# 基于雨衰雪衰影响的空间信道统计模型\*

# 周先春<sup>1a,1b,2</sup>,黄 猛\*\*1a

(1. 南京信息工程大学 a. 电子与信息工程学院;b. 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心,南京 210044; 2. 儿童发展与学习科学教育部重点实验室,南京 210009)

摘 要:针对某些特殊的移动通信环境中信号的到达角度(TOA)、到达时间(AOA)等信道参数估计 的复杂性,提出一种基于散射体均匀分布室外统计信道模型。该模型将树木中的树冠层作为散射体 呈均匀分布在移动台与基站周围的椭圆形区域内,通过树冠层在雨雪环境中的相对介电常数来分析 降雨降雪量对信号传输带来的影响,可以方便地估计出此室外微小区的空时信道参数,如 AOA 概率 密度分布函数、TOA 概率密度分布函数以及到达角度/到达时间(AOA/TOA)联合概率密度分布函 数。仿真结果表明,信号的到达时间 TOA 以及到达角度 AOA 随着降雨降雪量的增大而增大,尤其 当降雪量增大使得树冠层相对介电常数达到 4.5 时,信号的传输将被阻塞。该模型的信道参数估计 结果符合理论与经验,扩展了移动无线通信信道模型的研究与应用。

关键词:移动通信;信道模型;到达时间;到达角度;相对介电常数

中图分类号:TN925.5 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2017)01-0090-05

# A Geometrical Statistical Channel Model Based on Rain and Snow Fading Effect

ZHOU Xianchun<sup>1a,1b,2</sup>, HUANG Meng<sup>1a</sup>

(a. School of Electronic and Information Engineering; b. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, 1. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Child Development and Learning Science(Southeast University), Ministry of Education, Nanjing 210009, China)

**Abstract**: For the complexity of channel parameters estimation for angle of arrival (AOA) and time of arrival (TOA) in some special mobile communication environment, an outdoor statistical channel model based on the uniform distribution of the scatterers is proposed. In this model, the canopy of tree is distributed evenly in the oval area around the mobile station and the base station. The influence of rainfall and snowfall on the signal transmission is analyzed by the relative permittivity of canopy layer in wet environment. Closed–form expressions for marginal and joint probability density function (PDF) of AOA, TOA in the outdoor macrocell wireless environment are derived. The TOA and the AOA of the signal increases with the increasing of the amount of rainfall and snowfall. In additional, the signal will be blocked when the the relative permittivity is equal to 4.5. Channel parameter estimation results of the model show that the analysis is correct and applicable to macrocell environment, which promotes the research on mobile communication channel model.

**Key words**: mobile communication; channel model; angle of arrival(AOA); time of arrival(TOA); relative permittivity

<sup>\*</sup> 收稿日期:2016-06-20;修回日期:2016-10-31 Received date:2016-06-20;Revised date:2016-10-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11202106);教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20123228120005);东南大学基本科研 业务费资助项目(CDLS-2016-03)

<sup>\*\*</sup> 通信作者:445208918@qq. com Corresponding author:445208918@qq. com

#### 1 引 言

多径效应是无线通信信道中的小尺度衰落,是 无线信道研究的主要内容之一。陆地移动通信信道 的主要特征是多径传播,在传播过程中会遇到各种 建筑物、树木以及起伏的地形等,引起电波的反射与 散射从而导致信号在传播过程中的衰减<sup>[1]</sup>。植被 同样也是造成信号衰减的一个重要因素。自从 Tamir 最早分析了森林均匀覆盖地面的电波传播特 性<sup>[2]</sup>以来,越来越多的研究者投入到此项研究 中<sup>[3-4]</sup>。在此基础上,信道模型中加入了对树叶、树 枝、树干的分布状况的考虑,然而对于降雨降雪导致 的信号衰减并没有被列入考虑范围之内。

文献[5]提出了降雨量对于树林中信号传输的 影响,但没有说明树木的分布区域、分布状态对其产 生的影响。文献[6-7]在此基础上加入了对信道脉 冲响应的研究。文献[8]把大厦、丘陵等列为散射 体,但是并没有考虑树木作为散射体时由于降雨以 及降雪产生的信号衰减现象。

本文建立了一种适应于室外微小区的信道模型,假设树木作为散射体均匀分布在一个椭圆模型中,分析了雨雪附着在树冠层导致的相对介电常数的变化以及其对信号产生的衰减影响,并且估计出了此模型的信道参数如信号到达角度(Angle of Arrival, AOA)、到达时间(Time of Arrival, TOA)的联合概率密度函数以及边缘概率密度函数(Joint and Marginal Probability Density Function, PDF)。

文中主要做以下假设:基站发出的信号都在水 平面中传播;信号覆盖区域内的散射体都是全方位 反射;传播信道中的信号只与一个散射体有关,不考 虑多次的反射传播。

#### 2 系统信道模型

如图 1 所示的室外宏小区信道模型,散射体分 布在一个椭圆区域中,移动台与基站分别位于椭圆 的两个焦点处,其中移动台的高度远小于基站。文 献[9]中说明了多径信道中的信道冲激响应在时间 域内表示为

$$h(t,\tau) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i(t,\tau) \exp(j\varphi(t,\tau)) \delta(t,t_i(t))_{\circ}$$
(1)

式中: $a_i(t,\tau)$ 表示信号强度, $\varphi(t,\tau)$ 表示相位, $\varphi(t, t_i(t))$ 表示单位脉冲。公式描述了在时间为t、延迟

为 $\tau_i(t)$ 以及多径分量为N时的冲激响应值。冲激响应反映了信道的基本特征。



图 1 树叶作为散射体的统计信道模型 Fig. 1 Statistical channel model with leaf as scatterers

由于树木作为散射体存在,我们把树木分为4 层结构:空气树冠层、树冠层、树干层以及近地层。 这4层在降雨降雪时的潮湿环境中呈现了不同的散 射特性。假设 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$ 、 $\varepsilon_4$ 分别为近地层、树干层、 空气树冠层以及树冠层的相对介电常数。在实际的 信号传输中,大量的信号散射发生在树冠层<sup>[6]</sup>,所 以这里仅仅考虑树冠层带来的散射影响。介电常数 则表示了物体的导电能力。当电波经过潮湿的树冠 层反射时,传播时延 $\tau$ 表示为

$$\tau = \frac{D\sqrt{\varepsilon_{\rm r}}}{c}_{\circ} \tag{2}$$

## 3 联合 AOA/TOA 概率密度

如图 2 极坐标系所示,任意散射体的直角坐标 (*x*,*y*)换算成极坐标 *r*<sub>b</sub> 和 *θ*<sub>b</sub> 的数学关系式为

$$r_{\rm b} = \sqrt{x^2 + y^2} , \qquad (3)$$

$$\theta_{\rm b} = a \tan\left(\frac{y}{x}\right),$$
 (4)

$$x = r_{\rm b} \cos(\theta_{\rm b}), \qquad (5)$$

$$y = r_{\rm b} \sin(\theta_{\rm b})_{\rm o} \tag{6}$$

结合 Jacobian 变换, AOA/TOA 概率密度函数为

$$f_{r_{\rm b},\theta_{\rm b}} = \frac{f_{x,y}(x,y)}{|J(x,y)|} \bigg|_{\substack{x=r_{\rm b}\cos(\theta_{\rm b})\\y=r_{\rm b}\sin(\theta_{\rm b})}},$$
(7)

$$f_{r_{\rm b},\theta_{\rm b}} = r_{\rm b} f_{x,y}(r_{\rm b} \cos(\theta_{\rm b}), r_{\rm b} \sin(\theta_{\rm b}))_{\circ} \qquad (8)$$

· 91 ·



Fig. 2 Channel model polar diagram

图 2 中,移动台到散射体的距离为

$$r_{\rm s}^2 = D^2 + r_{\rm b}^2 + 2r_{\rm b}\cos(\theta_{\rm b}), \qquad (9)$$

所以,传播总路径延为

$$\tau = \frac{(r_{\rm b} + r_{\rm s})}{c} \sqrt{\varepsilon_{\rm r}} = \frac{1}{c} \left( r_{\rm b} + \sqrt{D^2 + r_{\rm b}^2 + 2r_{\rm b}\cos(\theta_{\rm b})} \right) \sqrt{\varepsilon_{\rm r}} \, .$$
(10)

这里的 $\varepsilon_r$ 是湿度对树冠层的湿度影响因子,所以

$$r_{\rm b} = \frac{\varepsilon_{\rm r} D^2 - \tau^2 C^2}{2(\varepsilon_{\rm r} D \cos(\theta_{\rm b}) - \sqrt{\varepsilon_{\rm r}} \tau C)} \,^{\circ}$$
(11)

根据 Jacobian 变换得到下式:

$$J(r_{\rm b},\theta_{\rm b}) = \frac{2(\varepsilon_{\rm r}D\cos(\theta_{\rm b}) - \sqrt{\varepsilon_{\rm r}}\tau C)}{\varepsilon_{\rm r}\sqrt{\varepsilon_{\rm r}}D^2C + \sqrt{\varepsilon_{\rm r}}\tau^2C^3 - 2\tau\varepsilon_{\rm r}C^2D\cos(\theta_{\rm b})^{\circ}}$$
(12)

结合公式(11),得到 AOA/TOA 联合概率密度 函数

$$f_{\tau,\theta_{\rm b}}(\tau,\theta_{\rm b}) = \frac{f_{r_{\rm b},\theta_{\rm b}}(r_{\rm b},\theta_{\rm b})}{|J(r_{\rm b},\theta_{\rm b})|} \bigg|_{r_{\rm b} = \frac{\varepsilon_{\rm r} D^2 - \tau^2 C^2}{2(\varepsilon_{\rm r} D \cos(\theta_{\rm b}) - \sqrt{\varepsilon_{\rm r}} \tau C)}} = \frac{\varepsilon_{\rm r} \sqrt{\varepsilon_{\rm r}} D^2 C + \sqrt{\varepsilon_{\rm r}} \tau^2 C^3 - 2\tau \varepsilon_{\rm r} C^2 D \cos(\theta_{\rm b})}{2 (\varepsilon_{\rm r} \cos(\theta_{\rm b}) - \sqrt{\varepsilon_{\rm r}} \tau C)^2} \cdot \frac{f_{r_{\rm r},\theta_{\rm c}}(r_{\rm b},\theta_{\rm b})}{(13)}$$

再结合公式(13),得到 AOA/TOA 联合概率密度函数

$$f_{\tau,\theta_{\rm b}}(\tau,\theta_{\rm b}) = \frac{\varepsilon_{\rm r}\sqrt{\varepsilon_{\rm r}}D^2C + \sqrt{\varepsilon_{\rm r}}\tau^2C^3 - 2\tau\varepsilon_{\rm r}C^2D\cos(\theta_{\rm b})}{2\left(\varepsilon_{\rm r}\cos(\theta_{\rm b}) - \sqrt{\varepsilon_{\rm r}}\tau C\right)^2} \cdot$$

$$r_{\rm b}f_{x,y}(r_{\rm b}\cos(\theta_{\rm b}),r_{\rm b}\sin(\theta_{\rm b}))_{\circ} \qquad (14)$$

所以,基站处波达信号的 AOA/TOA 联合概率密度 函数为

$$f_{\tau,\theta_{\rm b}}(\tau,\theta_{\rm b}) = \frac{(\varepsilon_{\rm r}\sqrt{\varepsilon_{\rm r}}D^2C + \sqrt{\varepsilon_{\rm r}}\tau^2C^3 - 2\tau\varepsilon_{\rm r}C^2D\cos(\theta_{\rm b}))(\varepsilon_{\rm r}D^2 - \tau^2C^2)}{4(\varepsilon_{\rm r}\cos(\theta_{\rm b}) - \sqrt{\varepsilon_{\rm r}}\tau C)^3} \cdot f_{x,y}(r_{\rm b}\cos(\theta_{\rm b}), r_{\rm b}\sin(\theta_{\rm b}))_{\circ}$$
(15)

由于散射体均匀分布在一个面积为 A 的圆形 区域中,所以散射体密度函数为

$$f_{x,y}(x,y) = \begin{cases} 1/A, & x, y \subset A \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$
(16)

由此得到基站处波达信号的 AOA/TOA 联合概率密 度函数<sup>[10]</sup>

$$f_{\tau,\theta_{\rm b}}(\tau,\theta_{\rm b}) = \frac{(\varepsilon_{\rm r}\sqrt{\varepsilon_{\rm r}}D^2C + \sqrt{\varepsilon_{\rm r}}\tau^2C^3 - 2\tau\varepsilon_{\rm r}C^2D\cos(\theta_{\rm b}))(\varepsilon_{\rm r}D^2 - \tau^2C^2)}{4A\left(\varepsilon_{\rm r}\cos(\theta_{\rm b}) - \sqrt{\varepsilon_{\rm r}}\tau C\right)^3} \cdot f_{x,y}(r_{\rm b}\cos(\theta_{\rm b}), r_{\rm b}\sin(\theta_{\rm b}))_{\circ}$$
(17)

上式给出了基站波达信号的联合 AOA/TOA 概 率密度函数。根据圆的对称性,移动端的波达信号 联合 AOA/TOA 概率密度函数与其有着形式相同但 是自变量范围不同的性质,得出移动端波达信号的 AOA/TOA 联合概率密度函数为

$$f_{\tau,\theta_{s}}(\tau,\theta_{s}) = \frac{(\varepsilon_{r}\sqrt{\varepsilon_{r}}D^{2}C + \sqrt{\varepsilon_{r}}\tau^{2}C^{3} - 2\tau\varepsilon_{r}C^{2}D\cos(\theta_{s}))(\varepsilon_{r}D^{2} - \tau^{2}C^{2})}{4A(\varepsilon_{r}\cos(\theta_{s}) - \sqrt{\varepsilon_{r}}\tau C)^{3}} \cdot f_{x,y}(r_{b}\cos(\theta_{b}), r_{b}\sin(\theta_{b}))_{\circ}$$
(18)

## 4 椭圆模型数值分析

假设本模型中散射体服从均匀分布, BS 端和 MS 端分布在椭圆的两个焦点处, 椭圆的长轴 a<sub>m</sub> 和 短轴 b<sub>m</sub> 分别为

$$a_{\rm m} = \frac{c\tau_{\rm m}}{\sqrt{\varepsilon_{\rm r}}},\tag{19}$$

$$b_{\rm m} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{c^2 \tau_{\rm m}^2}{\varepsilon_{\rm r}} - D^2\right)} \,. \tag{20}$$

式中:7<sub>m</sub>是信号椭圆中传输的最大时延。此模型适 用于户外微小区,因其天线高度较低,所以 MS 端可 以同时接收到来自 BS 端与 MS 端附近的信号。本 模型也考虑了多径分量的最大延时,与低延时路径 相比,高延时路径在传输过程中会产生大量的能量 衰减,使得估算结果有较大的偏差,所以在信号传输 过程中应忽略具有较大延时的路径<sup>[11]</sup>。

因为椭圆的面积为 A=4πab, 所以 MS 端 AOA/ TOA 概率密度函数为

$$f_{\tau,\theta_{s}}(\tau,\theta_{s}) = \frac{(\varepsilon_{r}\sqrt{\varepsilon_{r}}D^{2}C + \sqrt{\varepsilon_{r}}\tau^{2}C^{3} - 2\tau\varepsilon_{r}C^{2}D\cos(\theta_{s}))(\varepsilon_{r}D^{2} - \tau^{2}C^{2})}{4\pi ab(\varepsilon_{r}\cos(\theta_{s}) - \sqrt{\varepsilon_{r}}\tau C)^{3}} \cdot (21)$$

$$f_{x,y}(r_{\rm b}\cos(\theta_{\rm b}),r_{\rm b}\sin(\theta_{\rm b}))_{\circ}$$
(21)

假设在直视视距时路径传输延迟最小,即 $\tau = D_{\sqrt{\varepsilon_r}}/C$ ,这里把 $\varepsilon_r$ 作为平均相对介电常数。表1 中显示了树冠层在潮湿环境下的相对介电常数<sup>[5]</sup>,其 中降雨以及降雪的程度都是以24 h的降水量来划分。

表 1	不同的雨雪类型的介电常数值
-----	---------------

Tab. 1 The dielectric constant value of different types

	of rain and show	
雨雪类型	24 h 降雨或降雪量/mm	介电常数值
小雨	5.0~16.0	1.1
中到大雨	17.0 ~ 25.0	1.3
小雪	0.1~2.6	4.0
中到大雪	2.7~7.4	4.5

#### 4.1 AOA 概率密度函数

求导关于 AOA 概率密度函数时,一般采用的方 式是对联合概率密度函数中的 τ 求导,但是我们这 里使用一种更加简单的方式,直接对散射体概率密 度函数求导即可得到结果<sup>[12]</sup>。所以 BS 端波达信号 的概率密度函数为

$$f_{\theta_{\rm s}} = \int_{r_{\rm s1}(\theta_{\rm s})}^{r_{\rm s2}(\theta_{\rm s})} \frac{1}{A} r_{\rm s} \mathrm{d}r_{\rm s} = \frac{1}{2A} (r_{\rm s2}^2(\theta_{\rm s}) - r_{\rm s1}^2(\theta_{\rm s})) , \qquad (22)$$

$$f_{\theta_{s}} = \frac{1}{2A} (r_{s2}^{2}(\theta_{s}))_{\circ}$$
 (23)

把  $A = 4\pi ab$  代入式(23), AOA 概率密度函数为  $\int_{C} \frac{1}{1} \left( \frac{\varepsilon_r D^2 - \tau_m^2 C^2}{\varepsilon_r D^2 - \tau_m^2 C^2} \right)^2$  (24)

$$f_{\theta_{s}} = \frac{1}{8\pi a_{m}b_{m}} \left( \frac{1}{(\varepsilon_{r}D\cos(\theta_{s}) - \sqrt{\varepsilon_{r}}\tau_{m}C)} \right) \circ (24)$$

#### 4.2 TOA 概率密度函数

理论上对于均匀分布的散射体,直接对其联合 概率密度函数求导得到的边缘概率密度函数并不能 产生理想的结果,因此,我们引入了累积分布函 数(Cumulative Distribution Function,CDF)

$$A_{\tau}(\tau) = \pi a_{\tau} b_{\tau} = \frac{\pi c \tau_{\rm m}}{4 \sqrt{\varepsilon_{\rm r}}} \sqrt{\left(\frac{c^2 \tau_{\rm m}^2}{\varepsilon_{\rm r}} - D^2\right)}, \quad (25)$$

则 TOA 概率密度函数表达式为

$$f_{\tau}(\tau) = \frac{1}{A} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\tau} (A_{\tau}(\tau))_{\circ} \qquad (26)$$

代入 $A=4\pi ab$ ,再对 CDF 中的 $\tau$ 求导,得到 TOA 概 率密度函数,其中规定 $\tau$ 的范围在直视视距延时与 最大延时之间:



5 数值结果与分析

本节根据文献[9]中所整理的室外宏小区统计 信道参数值,尽可能使模拟数值更加贴近真实环境。 设基站与移动台之间的距离为1 000 m,波达信号的 到达角度 $\theta_s$ 分布在-180°~+180°,而到达时间 $\tau$ 则 介于直视视距(Line of Sight,LOS)下计算出的最小 延时3.3  $\mu$ s与最大延时之间,根据平均相对介电常 数 $\varepsilon_r$ 计算得到最大延时为5  $\mu$ s<sup>[8]</sup>。依据表1 给出 了树冠层在不同的雨雪环境中的介电常数值,通过 Matlab 仿真我们发现介电常数对 AOA 和 TOA 产生了极大的影响。

图 3 显示了此模型下雨雪环境对到达角度的影响。通过仿真我们看出所有波达信号的到达角度主要集中在 0°附近,随着介电常数值的不断升高,到达角度聚集在 0°的趋势越来越明显。然而,我们注意到在每个波形的顶部都有一段"平台"区域,这是因为与理论的散射体相比树叶的形状、大小、高度都具有高度的随机性,所以当 AOA 处于一定角度之内,其概率密度分布函数不再增长。



图 3 不同介电常数下的 AOA 概率密度函数 Fig. 3 AOA PDF in different dielectric constant

图 4 显示了不同的环境中对于到达时间的影响。随着介电常数的增加,移动端的波达信号到达时间以及时延分量中的最大时延扩展也会随之增大。我们注意到传输时延小于 *D/c(c*为电磁波传输速度)时,TOA 分布函数的减量较大,而在大于 *D/c*时,TOA 分布函数的减量趋于平缓,这是由于不同环境中信号到达接收端的滞后引起的,结果符合预期推论。



Fig. 4 TOA PDF in different dielectric constant

图 3 和图 4 中, *ε* = 1.1 和 *ε* = 1.3 代表着雨量的 大小从小雨到中雨, 仿真结果接近于文献[5]中所述, 到达角度主要分布于小角度-50°~+50°之间,到达时 间则与降雨量为7.1 mm/24 h、18.6 mm/24 h<sup>[9]</sup>时的 模拟结果保持一致,而 $\varepsilon$ =4.0、 $\varepsilon$ =4.5<sup>[13]</sup>则代表了降 雪量不同导致的介电常数不同。仿真结果与下雨时 的情况有着高度的一致性,唯一不同的是当 $\varepsilon$ =4.5 时,TOA 概率密度分布函数为0。由此我们可以看 出,当降雪量达到一定的程度之后,信号的传输将完 全中断,这为以后的研究提供了新的思路。

#### 6 结束语

本文研究了一种室外环境下移动通信信道模型的时空特征,假设树叶作为一种特殊的散射体均匀 分布于椭圆模型中,探讨了雨雪附着在树冠层产生 的潮湿环境对信号传输的影响。由于雨雪量的不同 导致其相对介电常数发生变化,与波达信号的 TOA、AOA 概率密度函数公式相结合导出了雨雪环 境下的参数公式,通过仿真得出此模型下基站端和 移动端在水平方向上各信道参数变化特征,说明雨 雪量越大信号的传输衰减越明显。结果显示本模型 参数估计值符合理论和经验,弥补了现有研究的不 足同时拓展了空间统计信道模型的研究和应用。本 模型数值结果可以作为对4G 网络功率时延谱进一 步研究的依据,以期提高信道的传输能力、抗干扰能 力以及服务质量。

#### 参考文献:

- [1] ALSEHAILI M, NOGHANIAN S, SEBAK A R, et al. Angle and time of arrival statistics of a three dimensional geometrical scattering channel model for indoor and outdoor propagation environments [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2010, 9(109):191-209.
- [2] TAMIR T. On radio wave propagation in forest environments[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 1967,15(6):806-817.
- [3] MENG Y S, LEE Y H, NG B C. Investigation of rainfall effect on forested radio wave progation [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2008(7):159–162.
- [4] 周杰,江浩,菊池久和,等.基于改进的统计信道模型
   与多天线系统性能分析[J].物理学报,2014,63(14):
   108-117.

ZHOU Jie, JIANG Hao, JUECHI Jiuhe, et al. Geometrical statistical channel model and performance investigation for multi-antenna systems in wireless communications [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63 (14) : 108–117. (in Chinese)

- [5] MENG Y S, LEE Y H, NG B C. Further study of rainfall effect on VHF forested radio-wave propagation with fourlayered model [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2009,99(4):149-161.
- [6] CAVALCANTE G P S, ROGERS D A, GIARDOLA A J. Radio loss in forests using a model with four layered media[J]. Radio Science, 1983, 18(5):691-695.
- [7] BORHANI A, PATZOLD M. On the spatial configuration of scatterers for given delay-angle distributions[J]. Engineering Letters, 2014, 22(1):34-38.
- [8] SCHUBERT M, FLEURY B H, PRIETO-CERDEIRA R. Propagation model for wave scattering effects caused by trees[J]. Internationa Journal of Emerging Trends in Engineering and Development, 2014, 4(5):57-62.
- [9] TRANTER W H, SHANMUGAN K S, RAPPAPORT T S, et al. Principles of communication systems simulation with wireless applications [M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall,2004;472–476.
- [10] 邱琳,周杰,李春梅,等.移动通信室内外空间几何信 道模型的分析与比较[J].电讯技术,2012,52(12): 1952-1959.
   QIU Lin, ZHOU Jie, LI Chunmei, et al. Analysis and comparisons of geometrical-based spatial channel mod-

els for indoor and outdoor wireless propagation environments [ J ]. Telecommunication Engineering, 2012, 52 (12):1952–1959. (in Chinese)

- [11] BORHANI A, PATZOLD M. Modelling of non-stationary mobile radio channels incorporating the brownian mobility model with drift[C]//Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science. San Francisco, CA: IEEE, 2013:23-25. (in Chinese)
- [12] PAPOULIS A, PILLAI S U. Probability, random variables and stochastic processes [M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2002:957-958.
- [13] GOLDSTEIN H. Classical mechanics [M]. New Jersey: Addison-Wesley, 2001:328-339.

## 作者简介:



**周先春**(1974—),男,安徽庐江人,博士, 副教授,主要研究方向为信号与信息处理;

**黄** 猛(1992—),男,江苏南京人,硕士研究生,主要研 究方向为气象通信理论和信号处理。 Empil-445208918@ gg\_com

Email:445208918@ qq. com