

# 移动通信宏小区信道模型的信道估计研究

朱伟娜<sup>1</sup> 周杰<sup>1,2</sup> 蔡世清<sup>1</sup> 沈晓燕<sup>1</sup>

(南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044)<sup>1</sup>

(日本国立新潟大学工学部电气电子工学科 新潟 950-2181)<sup>2</sup>

**摘要** 为了有效地削弱无线通信环境中的多径效应并提高信道参数估计的准确性,在散射体非均匀分布下,引入了到达路径物理概念,提出了一种合理的改进型信道模型。此模型能够准确地描述出宏小区环境下的重要空时参数,如波达信号在基站(Base Station,BS)处的到达角(Angle of Arrival, AOA)和到达路径(Range of Arrival,ROA)。同时,由于移动台的移动特性,基站接收信号产生多普勒频移,从而推导出基站处多普勒频移概率分布。将此模型的数值仿真结果与其他信道模型仿真结果进行比较,结果表明参数估计结果符合理论和经验,证明了提出的信道模型更适用于宏小区移动通信环境,延伸了统计信道模型的研究与应用,为仿真无线通信系统提供了有力的工具。

**关键词** 无线通信,多径效应,宏小区,基站,空时参数

中图分类号 TN911.6 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.10.016

## Research on Channel Estimation of Scattering Channel Models in Mobile Communication Macrocell Environments

ZHU Wei-na<sup>1</sup> ZHOU Jie<sup>1,2</sup> CAI Shi-qing<sup>1</sup> SHEN Xiao-yan<sup>1</sup>

(College of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)<sup>1</sup>

(Department of Electronic and Electrical Engineering, Niigata University, Niigata 950-2181, Japan)<sup>2</sup>

**Abstract** In order to effectively weaken the multipath effect and improve the accuracy of channel parameter estimation in wireless communication, a new channel model which is more adapted to different cell types was presented and a new concept of range of arrival was introduced, under the condition of the non-uniform distribution of the scatterer. This model can describe the important parameters in macrocell environments precisely, such as angle of arrival and range of arrival at the base station. In addition, the received signals of the base station has Doppler shift effect due to the mobility feature of mobile station, and the probability distribution of Doppler shift is derived. The numerical simulation results of the model compared with multipath fading channel models in other literatures show that channel parameter estimation results of the model accord with the theory and experience, which expands the research and application of statistical channel model and provides powerful tools for the simulation of wireless communication system.

**Keywords** Wireless communication, Multipath effect, Macro community, Base station, Space-time parameters

无线通信是当前通信领域中发展十分快速的研究方向。它作为现代化通信强有力的手段之一,若要成为高速通信媒介仍有很多挑战。信号由于散射体的存在,在信道传播时会出现路径损耗、阴影效应与多径衰落等。特别地,多径效应会影响无线系统的性能,是无线信道主要研究的内容之一。因此建立能够准确描述信道多径效应的信道模型对研究移动通信系统有重要意义。为获取更多无线信道的空时特征,研究人员陆续提出并研究各类空时信道模型。Ertel 和 Reed<sup>[1]</sup>提出了散射体空间分布圆模型(Geometrically Based Single Bounce Model, GBSBM), Petrus 和 Reed<sup>[2]</sup>提出了椭圆模型(Ellipse Based Single Bounce Model, EBSBM)。经研究表明,

GBSBM 和 EBSBM 模型分别能估计宏小区(macrocell)和微小区(microcell)环境下的重要空时信道参数,但以上两个模型的估计参数结果不够准确。由于散射体随机分布,信道的环境会变得更加复杂,因此除了考虑散射体分布的空间几何形状以外,散射体的分布类型也是信道建模要考虑的一个重要因素<sup>[3-5]</sup>。Mittal 和 Kong<sup>[6,7]</sup>提出了散射体高斯分布圆模型以及空心圆环模型,高斯散射分布类型<sup>[8]</sup>通过调整参数标准差可以适用于宏小区和微小区。Jiang<sup>[9]</sup>提出了基于瑞利分布和指数(exponential)分布的圆模型(ESDM)等。研究发现,以上信道建模的研究不能准确而有效地描述信号在信道中的传播特性以及减弱多径效应<sup>[10-12]</sup>。

到稿日期:2015-09-02 返修日期:2015-12-03 本文受国家自然科学基金面上项目(61372128),江苏省高校自然科学研究重大项目(14KJA510001)资助。

朱伟娜(1990-),女,硕士生,主要研究方向为移动通信理论和无线信道建模, E-mail:1103306317@qq.com;周杰(1964-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为移动通信理论、无线传感网和无线接入网等;蔡世清(1991-),男,硕士生,主要研究方向为无线传感网数据融合;沈晓燕(1991-),女,硕士生,主要研究方向为数据质量控制。

在宏蜂窝环境中,基站天线要高于周围所有建筑物以减弱在基站附近的多径效应,然而,实际情况中有的散射体高于基站的天线高度,因此本文针对此情况提出一个改进型的几何散射信道模型,即空心圆模型和椭圆模型相交形成的几何散射模型。该模型能够准确描述空间信道的重要空时参数,如到达角度(Angle of Arrival, AOA)、到达时间(Time of Arrival, TOA)以及多普勒频移(Doppler Shift, DS)<sup>[13-17]</sup>。为方便表述,本文引用新的物理概念到达路径(Range of Arrival, ROA)来描述 TOA 的特性。最后将仿真分析结果与其他模型进行比较,证明了本模型的信道参数估计结果符合理论与经验。本文给出了拓展空间统计信道模型的研究与应用,为无线移动通信系统提供了精确与灵活多变的信道模型。

## 1 信道模型与 AOA/ROA 联合概率密度

### 1.1 信道模型

如图 1 所示的几何信道模型为空心圆与椭圆相交的模型,即空心圆-椭圆模型。图中基站(Base Station, BS)位于直角坐标系 $(x, y)$ 的原点,移动台(Mobile Station, MS)位于坐标 $(x, y) = (D, 0)$ , BS 与 MS 之间的距离为  $D$ 。散射体在图 1 的阴影区域中高斯分布。假设散射体为 S, 到 BS 和 MS 的距离为分别  $r_b$  和  $r_s$ , 到 BS 的到达角为  $\theta_b$ 。BS 和 MS 之间的传播路径为  $l = \tau c$ , 且  $l_m = \tau c m$ 。为简化推导参数, 本文假设接收信号为平坦波形, 每个散射体看作全向散射元, 基站与移动台都使用全向天线并且不考虑极化影响。

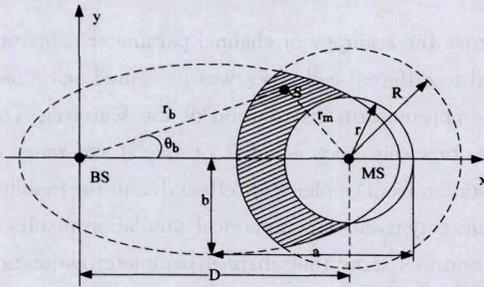


图 1 几何模型

由于散射体呈高斯分布, 图 1 中阴影区域的散射体概率密度为:

$$f_{x,y}(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right), & x, y \in R, \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

经计算阴影部分,  $R_s$  需要满足以下条件:  $R_s \in \{D \leq l \leq l_m \cap 2r \leq (D^2 + l^2 - 2lD\cos\theta_b) / (l - D\cos\theta_b) \leq 2R\}$ ,  $r, R$  分别是空心圆的内外半径。当  $r \rightarrow R$  时空心圆模型变为圆环模型; 当  $r = 0$  时, 空心圆模型变为圆盘模型。

用极坐标 $(r_b, \theta_b)$ 表示二维直角坐标系 $(x, y)$ , 如下所示:

$$(x, y) = (r_b \cos\theta_b, r_b \sin\theta_b) \quad (2)$$

$$r_b = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

$$\theta_b = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (4)$$

其中式(3)可以写成

$$r_b = \frac{l^2 - D^2}{2(l - D\cos\theta_b)} \quad (5)$$

### 1.2 AOA/ROA 联合概率密度

由文献[1]可知: 无论散射体如何分布, 其 AOA/ROA 空时联合概率密度可用式(6)表示:

$$f_{\tau, \theta_b}(\tau, \theta_b) = \frac{(D^2 c + \tau^2 c^3 - 2\tau c^2 D \cos\theta_b)(\tau^2 c^2 - D^2)}{4(\tau c - D \cos\theta_b)^3} f_{x,y}(x, y) \quad (6)$$

为方便计算, 设到达路径  $l (l = \tau c)$  来表示到达时间  $\tau$  的统计特性, 则式(6)可以表示为:

$$f_{L, \theta_b}(l, \theta_b) = \frac{(l^2 - D^2)(l^2 + D^2 - 2lD\cos\theta_b)}{4(l - D\cos\theta_b)^3} f_{x,y}(r_b \cos\theta_b, r_b \sin\theta_b) \quad (7)$$

把式(1)代入式(7)可得非视距(Non Line of Sight, NLOS)情况下联合概率密度函数为:

$$f_{L, \theta_b}(l, \theta_b) = \frac{(l^2 - D^2)(l^2 + D^2 - 2lD\cos\theta_b)}{4(l - D\cos\theta_b)^3} \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(l^2 - D^2)^2}{8(l - D\cos\theta_b)^2 \sigma^2}\right) \quad (8)$$

如果信号存在视距(Line of Sight, LOS)<sup>[12]</sup>, 即  $l = D$  以及  $\theta_b = 0$ , 则式(8)用洛必达法求  $\lim_{l \rightarrow D} f_{L, \theta_b}(l, \theta_b)$  得:

$$f_{L, \theta_b}(l, \theta_b) = \frac{D}{4\pi\sigma^2} \quad (9)$$

结合式(8)、式(9)可得该信道模型的 AOA/ROA 空时联合概率密度表达式为:

$$f_{L, \theta_b}(l, \theta_b) = \begin{cases} \frac{(l^2 - D^2)(l^2 + D^2 - 2lD\cos\theta_b)}{4(l - D\cos\theta_b)^3} \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(l^2 - D^2)^2}{8(l - D\cos\theta_b)^2 \sigma^2}\right), & l \in R, \theta_b \neq 0 \\ \frac{D}{4\pi\sigma^2}, & l = D, \theta_b = 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

## 2 信道模型 ROA 概率密度

散射体分布呈高斯分布, 先求波达信号 ROA 累积分布函数  $F_L(l)$ 。  $F_L(l)$  通过有效散射区域的加权面积  $A_i(l)$  除以所有散射体区域的加权面积  $A_t$  得到, 即

$$F_L(l) = \frac{A_i(l)}{A_t} \quad (11)$$

有效散射区域加权面积  $A_i(l)$  分为对称部分和非对称部分<sup>[7]</sup>, 如图 2 中,  $A_1(l)$  表示扇形  $MPB$ ,  $A_3(l)$  表示扇形  $MWB$ ,  $A_2(l)$  表示不规则扇形  $MEP$ ,  $A_4(l)$  表示扇形  $MEW$ ,  $A_i(l)$  即为:

$$A_i(l) = A_1(l) - A_3(l) + A_2(l) - A_4(l) \quad (12)$$

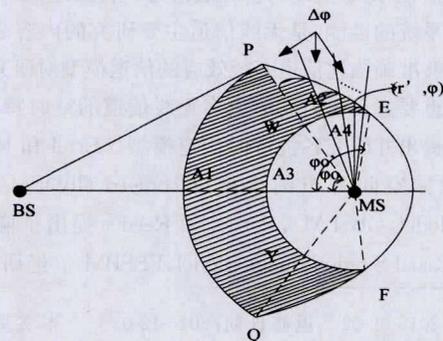


图 2 空心圆-椭圆模型的 ROA

当散射体在大、小圆内对称部分高斯分布时, 总加权概率分别如下:

$$V_o = \int_0^R 2\pi\rho \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right) d\rho = 1 - \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$V_o' = 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)$$

则可得  $A_{l1}(l), A_{l3}(l), A_{l4}(l)$  为:

$$A_{l1}(l) = \frac{\varphi_o(l)}{2\pi} V_o$$

$$A_{l3}(l) = \frac{\varphi_o'(l)}{2\pi} V_o'$$

$$A_{l4}(l) = \frac{\varphi_o'(l) - \varphi_o(l)}{2\pi} V_o'$$

其中,  $\varphi_o$  是图 2 中的角  $\angle BMP$ , 计算可得  $\varphi_o(l)$  为:

$$\varphi_o(l) = \arccos\left(\frac{D^2 - l^2 + 2lR}{2RD}\right) \quad (13)$$

由于第二部分加权面积是非对称的, 通过累积积分计算。

如图 2 所示, 把扇形  $M\widehat{EP}$  分为  $N$  份, 即  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \dots = \frac{\varphi_o' - \varphi_o}{N}$ ,  $\varphi_k = \arccos\left(\frac{D^2 - l_m^2 + 2rl_m}{2rD}\right)$ , 则可知

$$A_{l,2,k} = \frac{\Delta\varphi_k}{2\pi} V_k \quad (14)$$

其中  $V_k$  是以  $R_k$  为半径圆的总加权概率, 即

$$V_k = 1 - \exp\left(-\frac{R_k^2}{2\sigma^2}\right) \quad (15)$$

其中

$$R_k = \frac{l^2 - D^2}{2(l - D\cos\varphi_k)}$$

$$\varphi_k = \varphi_o(l) + k \frac{\varphi_o'(l) - \varphi_o(l)}{N}$$

则

$$\begin{aligned} A_{l2}(l) &= 2 \sum_{k=1}^N A_{l,2,k} \\ &= \frac{\varphi_o'(l) - \varphi_o(l)}{\pi N} \sum_{k=1}^N \left(1 - \exp\left(-\frac{R_k^2}{2\sigma^2}\right)\right) \end{aligned} \quad (16)$$

散射区域加权总面积  $A_l$  可以用  $l_m$  代替  $A_l(l)$  中的  $l$ , 即可得  $A_l = A_{l1}(l_m) - A_{l3}(l_m) + A_{l2}(l_m) - A_{l4}(l_m)$ 。

由图 2 可知, 随着延时  $\tau$  的增加, 椭圆不断变化, 椭圆与空心圆的相交面积  $A_l(l)$  也不断变化。当  $\tau \in (D/c, (2r+D)/c]$ , 即  $l \in (D, 2r+D]$  时, 有

$$A_r(\tau) = A_R(\tau) - A_r(\tau) \quad (17)$$

其中,  $A_R(\tau), A_r(\tau)$  分别是大小圆与椭圆相交的面积。对式 (17) 关于  $\tau$  求导, 得到 ROA 概率密度函数为:

$$f_L(l) = f_R(l) - f_r(l) \quad (18)$$

ROA 概率密度函数可以通过其累积分布函数对  $l$  求导<sup>[10]</sup> 得到:

$$f_L(l) = \frac{\partial F_L(l)}{\partial l} = \frac{1}{A_l} \frac{\partial A_l(l)}{\partial l} \quad (19)$$

将式 (11) 一式 (18) 代入式 (19) 可得:

$$f_L(l) = \frac{1}{A_l} \left( \frac{\partial A_{l1}(l)}{\partial l} - \frac{\partial A_{l3}(l)}{\partial l} + \frac{\partial A_{l2}(l)}{\partial l} - \frac{\partial A_{l4}(l)}{\partial l} \right) \quad (20)$$

当  $\tau \in ((2r+D)/c, (2R+D)/c]$ , 即  $l \in (2r+D, 2R+D]$  时, 有

$$f_L(l) = f_R(l) = \frac{1}{A_l} \left( \frac{\partial A_{l1}(l)}{\partial l} + \frac{\partial A_{l2}(l)}{\partial l} \right) \quad (21)$$

在 LOS 情况下有:

$$f_L(l) = \lim_{l \rightarrow D} f_{L,\theta_b}(l, \theta_b) = \frac{D}{4\pi\sigma^2} \quad (22)$$

综上可得该模型的 ROA 边缘概率密度函数为:

$$f_L^l(l) = \begin{cases} f_R(l) - f_r(l), & l \in (D, 2r+D] \\ f_R(l), & l \in (2r+D, 2R+D] \\ \frac{D}{4\pi\sigma^2}, & l = D \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (23)$$

### 3 信道模型 AOA 概率密度

图 3 中,  $\theta_{\text{cross}}$  为空心圆与椭圆的交点和 BS 端点相连形成的角,  $\theta_{\text{cross}}$  最大角在交点和 BS 的连线与圆相切时, 此时到达路径为  $l_{\text{tan}}$ 。

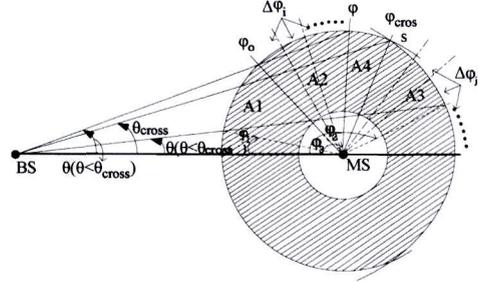


图 3 空心圆-椭圆模型的 AOA

与求 ROA 概率密度函数的方法一样, 先求 AOA 累积分布函数  $F_\theta(\theta)$ , 即

$$F_\theta(\theta) = \frac{A_\theta(\theta)}{A_\theta} \quad (24)$$

然后对  $\theta$  求导即得 AOA 概率密度函数  $f_\theta(\theta)$ 。其中  $A_\theta$  即第二部分的  $A_l, A_\theta(\theta)$  与求  $A_l(l)$  的方法一样。如图 3 所示,  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  通过计算可得:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \arccos\left(\frac{D\sin^2\theta + \cos\theta \sqrt{R^2 - D^2\sin^2\theta}}{R}\right) \\ \varphi_2 &= \arctan\left(\frac{\sin\theta(l_m^2 - D^2)}{2D(l_m - D\cos\theta) - \cos\theta(D^2 - l_m^2)}\right) \\ \varphi_3 &= \arccos\left(\frac{D\sin^2\theta - \cos\theta \sqrt{R^2 - D^2\sin^2\theta}}{R}\right) \end{aligned} \quad (25)$$

阴影部分如图 3 所示, 当  $\theta < \theta_{\text{cross}}, \varphi = \varphi_2$ ; 当  $\theta \geq \theta_{\text{cross}}, \varphi = \varphi_3$ 。由式 (15) 一式 (20) 可得  $A_1, A_4$ , 即  $A_1 = A_{\theta,1}(\theta) - A'_{\theta,1}(\theta), A_4 = A_{\theta,4}(\theta) - A'_{\theta,4}(\theta)$ 。

其中

$$\begin{aligned} A_{\theta,1}(\theta) &= \frac{\varphi_1(\theta)}{2\pi} V_o \\ A'_{\theta,1}(\theta) &= \frac{\varphi_1'(\theta)}{2\pi} V_o' \\ A_{\theta,4}(\theta) &= \frac{\varphi_{\text{cross}}(\theta) - \varphi_3(\theta)}{2\pi} V_o \\ A'_{\theta,4}(\theta) &= \frac{\varphi_{\text{cross}}(\theta) - \varphi_3'(\theta)}{2\pi} V_o' \end{aligned}$$

为求得  $A_2, A_3$ , 即  $A_2 = A_{\theta,2}(\theta) - A'_{\theta,2}(\theta), A_3 = A_{\theta,3}(\theta) - A'_{\theta,3}(\theta)$ , 将其分割为若干份, 每份包括对称区域和非对称区域, 非对称部分很小可以忽略, 即可得:

$$A_{\theta,2}(\theta) = \sum_{i=1}^{N_1} A_{\theta,2,i} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2\pi N_1} \sum_{i=1}^{N_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{R_i^2}{2\sigma^2}\right)\right) \quad (26)$$

$$A'_{\theta,2}(\theta) = \frac{\varphi_1' - \varphi_2'}{2\pi} V_o' \quad (27)$$

$$A_{\theta,3}(\theta) = \sum_{j=1}^{N_2} A_{\theta,3,j} = \frac{\pi - \varphi_3}{2\pi N_2} \sum_{j=1}^{N_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{R_j^2}{2\sigma^2}\right)\right) \quad (28)$$

$$A'_{\theta,3}(\theta) = \frac{\pi - \varphi_3'}{2\pi} V_o' \quad (29)$$

其中,

$$R_i = \frac{D \tan \theta}{\sin \varphi_i + \tan \theta \cos \varphi_i}$$

$$\varphi_i = \varphi_1 + i \frac{\varphi - \varphi_1}{N_1}$$

$$R_j = \frac{l_m^2 - D^2}{2(l_m - \cos \varphi_j)}$$

$$\varphi_j = \varphi + j \frac{\pi - \varphi}{N_2}$$

从图 3 和式 (24) 可知, AOA 累积分布函数为:

$$F_\theta(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{A_\theta} (A_1(\theta) + A_2(\theta) |_{\varphi=\varphi_2} + A_3(\theta) |_{\varphi=\varphi_2}), & 0 \leq \theta \leq \theta_{\text{cross}} \\ \frac{1}{A_\theta} (A_1(\theta) + A_4(\theta) + A_2(\theta) |_{\varphi=\varphi_3} + A_3(\theta) |_{\varphi=\varphi_{\text{cross}}}), & \theta_{\text{cross}} < \theta \leq \arcsin(\frac{R}{D}), l_m > l_{\text{tan}} \\ 0, & \theta_{\text{cross}} < \theta \leq \arcsin(\frac{R}{D}), l_m \leq l_{\text{tan}} \end{cases} \quad (30)$$

对式 (30) 求导, 分别得到:

$$f_{\theta,1}(\theta) = \frac{\partial(A_{\theta,1}(\theta) - A_{\theta,1}(\theta)')}{\partial \theta} \quad (31)$$

$$f_{\theta,4}(\theta) = \frac{\partial(A_{\theta,4}(\theta) - A_{\theta,4}(\theta)')}{\partial \theta} \quad (32)$$

$$f_{\theta,2}(\theta) = \frac{\partial(A_{\theta,2}(\theta) |_{\varphi=\varphi_2})}{\partial \theta} \quad (33)$$

$$f_{\theta,2b}(\theta) = \frac{\partial(A_{\theta,2b}(\theta) |_{\varphi=\varphi_3})}{\partial \theta} \quad (34)$$

$$f_{\theta,3}(\theta) = \frac{\partial(A_{\theta,3}(\theta) |_{\varphi=\varphi_2})}{\partial \theta} \quad (35)$$

综上所述, 本模型 AOA 概率密度函数为:

$$f_\theta(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{A_\theta} (f_{\theta,1}(\theta) + f_{\theta,2}(\theta) + f_{\theta,3}(\theta)), & 0 \leq \theta \leq \theta_{\text{cross}} \\ \frac{1}{A_\theta} (f_{\theta,1}(\theta) + f_{\theta,4}(\theta) + f_{\theta,2b}(\theta)), & \theta_{\text{cross}} < \theta \leq \arcsin(\frac{R}{D}), l_m > l_{\text{tan}} \\ 0, & \theta_{\text{cross}} < \theta \leq \arcsin(\frac{R}{D}), l_m \leq l_{\text{tan}} \end{cases} \quad (36)$$

#### 4 多普勒频移

由于 MS 移动, BS 也会有多普勒效应产生, BS 端接收信号的多普勒频移取决于 MS 的移动方向  $\phi_v$ ,  $\phi_v$  是 MS 相对 LOS 路径的运动角度。接收信号为  $r(t) = E_0 \sum_{i=0}^{L-1} \epsilon_i \epsilon^{j2\pi v_i t}$ ,  $v_i$  为第  $i$  个多径分量的多普勒频移。多普勒频谱<sup>[13]</sup>  $S_r(f)$  为  $A_0^2 F_v(f)$ , 其中  $A_0^2 = E_0^2/4 \sum_{i=1}^{L-1} |\epsilon_i|^2$ ,  $F_v(f)$  为多普勒频率分布概率密度函数。假设 BS 处全向天线,  $F_v(f)$  表达式如下:

$$F_v(f) = \frac{p(\phi_v + |\cos^{-1}(f/f_m)|)}{f_m \sqrt{1-(f/f_m)^2}} + \frac{p(\phi_v - |\cos^{-1}(f/f_m)|)}{f_m \sqrt{1-(f/f_m)^2}} \quad (37)$$

其中,  $f_m$  为多普勒频移最大值,  $f_m = v/\lambda$ ,  $v$  是 MS 运动速度,  $p(\phi_v)$  是 BS 到达角概率密度函数。

多普勒功率谱密度<sup>[14]</sup>  $S_r(f)$  表达式如下:

$$S_r(f) = \frac{A_0^2}{f_m \sqrt{1-(f/f_m)^2}} \times [p(\phi_v + |\cos^{-1}(f/f_m)|) + p(\phi_v - |\cos^{-1}(f/f_m)|)], |f| < f_m \quad (38)$$

Clarke's 模型的多普勒频谱为:

$$S_c(f) = \frac{A_0^2}{\pi f_m \sqrt{1-(f/f_m)^2}}, |f| < f_m \quad (39)$$

#### 5 仿真结果与分析

图 4 针对本文中模型示出 AOA/ROA 联合概率密度谱。从图 4 可以看出, 当空心率  $r/R$  很小时, 接收信号在室外宏小区移动通信环境下的概率密度在小角度处较高, 仿真结果与文献[4, 7]相同。但随着空心率的增加, 基站处接收信号 AOA 和 ROA 受移动台周围远处散射体的影响也不断增大, 特别地, 当  $r/R$  逐渐变大, 能够直接观察到空心圆模型趋于圆环模型, 联合概率密度谱呈“U”形分布。从图 4 中可以看出, 在靠近 LOS 范围时, 联合概率密度快速增加, 如图 4 中  $r/R=0$  时的情况。这是由于空时联合概率密度函数在 NLOS 时有两个峰值点为  $(l^p, \pm \theta_b^p)$ , 其中  $l^p = l_{\text{LOS}}$ ,  $\theta_b^p = 0$ 。当接收信号的多径分量趋近于 LOS 路径时, 联合概率密度快速下降, 表明在 LOS 路径上的概率密度较低。当  $R \geq D$ ,  $r/R=0$  时, 设  $R=D/2+l_m/2$ , 该联合概率密度谱与文献[4]中椭圆散射模型联合概率密度相同; 当  $R < D$ ,  $r/R=0$  时, 设  $l_m = D+2R$ , 该联合概率密度谱与文献[7]给出模型的联合概率密度相似。

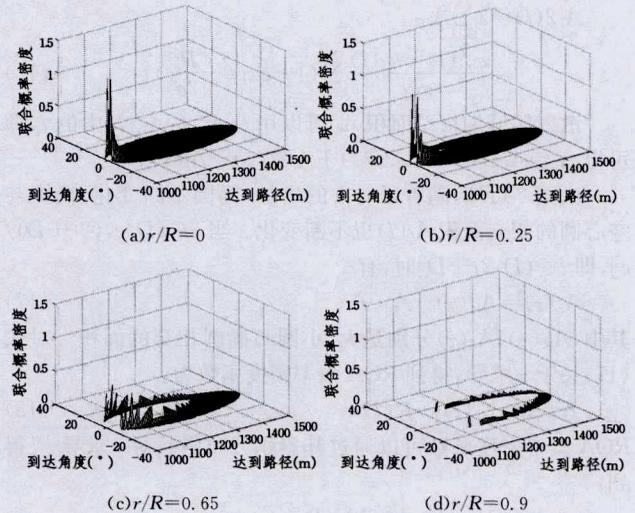
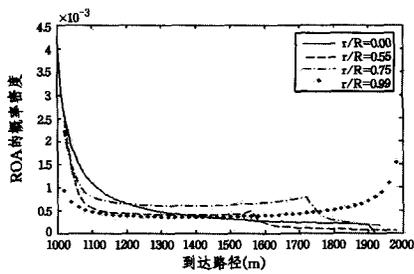
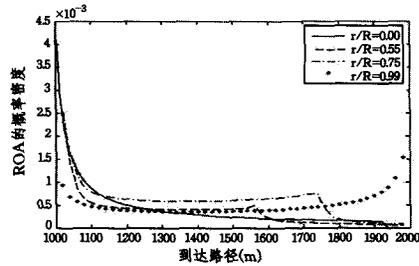


图 4 室外空心圆-椭圆模型 AOA/ROA 联合概率密度谱

图 5 针对空心圆-椭圆几何模型示出 ROA 边缘概率密度谱。从图 5 可以观察到, 在短到达路径内接收信号出现概率相对比较高, 并且当空心圆变为圆盘模型或者圆环模型时, 不会出现极大值<sup>[4]</sup>情况。图 5 中随着空心率的增大, 极大值会向长到达路径靠近。ROA 概率密度函数同样受到  $r/R$  和  $D/R$  变化的影响。  $r/R$  决定图 5 中极大值点;  $D/R$  决定图 5 中最大到达路径。图 5 中该模型的 ROA 分布仿真结果与文献[7]中散射体在圆内高斯分布的 TOA 分布相符合、与文献[3]中 TOA 分布相似, 给出了该模型在室外宏小区移动通信环境下 ROA 的统计特征。



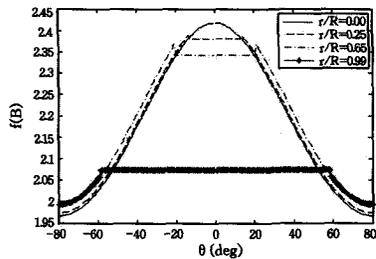
(a)  $R/D=0.2$



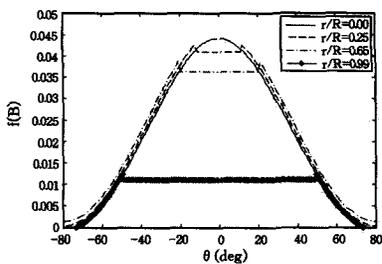
(b)  $R/D=0.15$

图5 散射体高斯分布下 ROA 概率密度谱

图6给出了该模型在宏小区移动通信环境下的 AOA 分布情况。由图6可知,在空心率相对很小时,接收信号多径分量约束在较小角度处到达,对于该模型而言,AOA 分布不仅与  $D/R$  有关,还与  $r/R$  有关。 $r/R$  的变化决定到达角极大值的变化,并且随着  $r/R$  增加,到达角分布偏向于大的角度。从图6中可以观察到  $D/R$  决定信号 AOA 的范围。图6中该模型 AOA 分布仿真结果与文献[7]中散射体呈高斯分布的圆模型 AOA 的分布相似,并且比文献[7]中的模型的适用性更广,能更好地描述 AOA 分布特征。



(a)  $R/D=0.9$



(b)  $R/D=0.8$

图6 散射体高斯分布下 AOA 概率密度谱

图7给出了在散射体高斯分布下,基站 BS 的多普勒功率分布。从图中可以看出,多普勒功率谱呈“U”形状分布,随着参数  $r/R$  的值增大,空间多普勒功率谱分布趋向于 Clarke 模型经典谱<sup>[15]</sup>, $|\gamma|$  接近于 1 时,多普勒功率值达到无穷大。上述仿真结果符合文献[16]的研究,表明本模型关于 BS 的多普勒分析结果符合理论和经验,扩展了二维空间统计信道模型的研究和应用,尤其是在多普勒方面的研究。

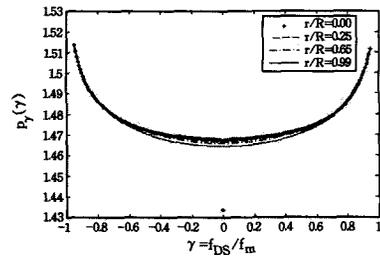


图7 参数  $r/R$  对多普勒频移的影响

**结束语** 对于二维空间移动通信环境,本文在散射体高斯分布情况下引入了到达路径的物理概念,提出一种更符合实际情况的二维几何信道模型,即空心圆-椭圆模型。在室外宏小区移动通信环境下,该模型弥补了现有关于室外二维信道的不足,分析了靠近 BS 的建筑物高于基站天线高度的情况,估计了多径衰落信道的重要空时信道参数,如波达信号到达角和到达路径以及多普勒功率谱密度,分析了空心率  $r/R$ ,  $D/R$  对信道的影响和无线信道上行链路的统计特性。数值仿真结果与文献[3,7]的对比实验验证了本模型的信道参数估计符合理论和经验,可以应用于无线通信的许多部署预案,拓展了空间信道模型的应用研究。

### 参考文献

- [1] Ertel R B, Reed J H. Angle and time of arrival statistics for circular and elliptical scattering models[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(11): 1829-1840
- [2] Petrus P, Reed J H, Rappaport T S. Geometrical-based statistical macrocell channel model for mobile environments[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(3): 495-502
- [3] Jaafar I, Boujemaa H, Siala M. Angle and time of arrival statistics for hollow-disc and elliptical scattering models[C]//2nd International Conference on Signals, Circuits and Systems, 2008 (SCS 2008). IEEE, 2008: 1-4
- [4] Janaswamy R. Angle and time of arrival statistics for Gaussian scatter density model[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(3): 488-497
- [5] Pedersen K I, Mogensen P E, Fleury B H. A stochastic model of the temporal and azimuthal dispersion seen at the base station in outdoor propagation environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2000, 49(2): 437-447
- [6] Mittal A, Bhattacharjee R, Paul B S. Angle and time of arrival statistics for a far circular scattering mode[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Communications, Guwahati, India, IoT, 2009: 141-145
- [7] Kong S H. TOA and AOD statistics for down link Gaussian scatterer distribution model[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(5): 2609-2617
- [8] Olenko A Y, Wong K T, et al. Analytically derived TOA-DOA statistics of uplink/downlink wireless multipaths arisen from scatterers on a hollow-disc around the mobile[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(7): 516-519
- [9] Jiang L, Tan S Y. Geometrically Based Statistical Channel Models for Outdoor and Indoor Propagation Environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(6): 3587-3593
- [10] Zhou J, Qiu L, Li C, et al. Analyses and comparisons of geomet-

rical-based channel model arisen from scatterers on a hollow-disc for outdoor and indoor wireless environments[J]. *Iet Communications*, 2012, 6(17): 2775-2786

- [11] Le K N. On Angle-of-Arrival and Time-of-Arrival Statistics of Geometric Scattering Channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(8): 4257-4264
- [12] Pedersen K I, Mogensen P E, Fleury B H. Power azimuth spectrum in outdoor environments[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(18): 1583-1584
- [13] Borhani A, Patzold M. Time-of-arrival, angle-of-arrival, and angle-of-departure statistics of a novel simplistic disk channel model[C]// 2011 5th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS). IEEE, 2011: 1-7

- [14] Liberti J C, Rappaport T S. A geometrically based model for line-of-sight multipath radio channels[C]// *Vehicular Technology Conference*. 1996: 844-848
- [15] Hernandez A, Badorrey R, Choliz J, et al. Accurate indoor wireless location with IR UWB systems a performance evaluation of joint receiver structures and TOA based mechanism[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2008, 54(2): 381-389
- [16] Petrus P, Reed J H, Rappaport T S. Geometrically based statistical channel model for macrocellular mobile environments[C]// *Global Telecommunications Conference*. 1996: 1197-1201
- [17] Qu S. Doppler Shift Distribution with a Semi-Spheroid Model for Mobile Radio Environments[C]// *Vehicular Technology Conference*. 2008: 1-4

(上接第 73 页)

法依旧可以使用,但是半马尔科夫方法或者更新方法不可以使用;对于动态失效行为相关的部件,例如 3 个服务器 SVRA, SVRB 和 SVRC,依旧可以在指数失效分布中找到,以上基于 MDD 的方法也可以和传统的非马尔科夫模型一起使用。

**结束语** 本文详细介绍了基于多值决策图的故障树分析方法,从结果中看出,这种对大型动态子树的可靠性进行计算的方法是有效而且快速的,一定程度上解决了状态空间的爆炸问题。这种方法对与动态失效行为相关的子树部件运用状态空间方法来分析。多值变量对动态门进行编码,生成的整个系统的 MDD 是简单且小型的,综合运用组合方法和状态空间方法,这使得状态空间的爆炸问题大大缓解。对现实生活中各种多功能动态软件和嵌入式系统的可靠性进行分析,该方法可以得到广泛应用。

与传统 BDD 相似的是,系统 MDD 的大小很大程度上取决于输入变量的顺序。因此,变量排序的优化仍是未来工作的一个重要方向。考虑到动态故障树分析更加高效,可以考虑构建动态故障树自动分析平台,借助软件平台进行建模,分析计算系统的可靠性。还有其它方面可以扩展研究,如 DFT 图形编辑打印、DFT 分析计算、优化改进方案的提出、系统数据库再到风险分析。

传统的马尔科夫方法是建立在假设事件的失效率保持不变的前提下,但是在现实情况中有些机械电子元件的失效率是随着时间变化的。因此,失效率的变化问题也是未来的研究方向。同一个部件或系统可能有多种状态,而不仅仅只有正常和故障两个状态,这也是未来需要考虑的。本文只讨论了动态模块独立的动态故障树,而动态门嵌套的情况较为复杂,尚未做出很好的分析。

## 参 考 文 献

- [1] Vemuri K K, et al. Automatic synthesis of fault trees for computer-based systems[J]. *IEEE Trans. Rel.*, 1999, 48(4): 394-402
- [2] Sullivan J K, et al. The Galileo fault tree analysis tool[C]// Proc 29th Annu. Int. Symp. Fault-Tolerant Comput., Madison, WI, USA, 1999: 232-237
- [3] Meshkat L, et al. Dependability analysis of systems with on-demand and active failure modes, using dynamic fault trees[J]. *IEEE Trans. Rel.*, 2002, 51(2): 240-251
- [4] Huang C Y, Chang Y R. An improved decomposition scheme for assessing the reliability of embedded systems by using dynamic

fault trees[J]. *Rel. Eng. Syst. Safety*, 2007, 92(10): 1403-1412

- [5] Amari S, et al. A new approach to solve dynamic fault trees [C]// Proc. IEEE Annu. Rel. Maintainability Symp. Tampa, FL, USA, 2003: 374-379
- [6] Dugan J B, et al. Developing a low-cost high quality software tool for dynamic fault tree analysis[J]. *IEEE Trans. Rel.*, 2000, 49(1): 49-59
- [7] Miller D M. Multiple-valued logic design tools[C]// Proc. 23rd Multiple-Valued Logic (ISMVL). 1993: 2-11
- [8] Xing L, Dugan J B. Dependability analysis using multiple-valued decision diagrams[C]// Proc. 6th Probabilistic Safety Assessment Manag., 2002
- [9] Xing L, Dai Y. A new decision diagram based method for efficient analysis on multi-state systems[J]. *IEEE Trans. Dependable Secure Comput.*, 2009, 6(3): 161-174
- [10] Ou Y, Dugan J B. Sensitivity analysis of modular dynamic fault trees [C]// Proc. Compute. Perform. Dependability Symp., 2000: 35-43
- [11] Tarjan R. Depth first search and linear graph algorithms [J]. *Sensors*, 2006, 14(4): 114-121
- [12] Gao Shun-chuan. Methods and Implementation of Dynamic Fault Tree Analysis[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005 (in Chinese)
- 高顺川. 动态故障树分析方法及其实现[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005
- [13] Gu Ying-kui, Li Jing. Importance Analysis of Multi-state System Based on Multiple-valued Decision Diagram[J]. *China Safety Science Journal*, 2014, 24(6): 44-50 (in Chinese)
- 古莹奎, 李晶. 基于多值决策图的多状态系统重要度分析[J]. *中国安全科学学报*, 2014, 24(6): 44-50
- [14] Zhang Hong-lin, Zhang Chun-yuan, Liu Dong. An Identification Method of Independent Module Applying to Dynamic Fault Tree with Interdependent Basic Events and Repeated Events [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 35(2): 229-243 (in Chinese)
- 张红林, 张春元, 刘东. 一种适用于具有相互依赖基本事件和重复事件的动态故障树独立模块识别方法[J]. *计算机学报*, 2012, 35(2): 229-243
- [15] Cheng Ming-hua, Yao Yi-ping. Application of Dynamic Fault Tree Analysis to Software and Hardware Fault-tolerant Control Computer Systems[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2000, 21(1): 34-37 (in Chinese)
- 程明华, 姚一平. 动态故障树分析方法在软、硬件容错计算机系统中的应用[J]. *航空学报*, 2000, 21(1): 34-37