

## 基于 Inverted-Parabolic 分布的空间统计信道模型

周杰<sup>1,2</sup>, 徐冬冬<sup>1</sup>, 菊池久和<sup>1,2</sup>

(1.南京信息工程大学 气象探测与信息处理重点实验室, 江苏 南京 210044; 2.日本国立新潟大学 工学部, 新潟 950-2181)

**摘要:**针对在非均匀散射体分布下信号到达角度、到达时间以及多普勒效应等信道参数估计的复杂性,提出一种合理的空间信道模型,并引入几何分割法导出基于散射体 Inverted-Parabolic 分布的空间统计信道模型。模型能方便地估计室外宏小区和微小区移动通信环境下各种重要的空时信道参数,如 AOA、TOA 概率分布密度函数和多普勒功率谱以及信号的空一时相关性。数值结果与均匀散射体圆模型和高斯散射体圆模型对比表明本模型的信道参数估计结果符合理论和经验,且与实测结果吻合较好。在基站设计采用指向性天线时研究了移动台 MS 的多普勒效应,修正了 Clarke U-shaped 经典模型,阐明了天线主瓣宽度  $2\alpha$ 、空间模型参数  $D/R$  和 MS 移动参数影响信道参数的机理。

**关键词:**电波传播;空时信道模型;单反射圆模型/椭圆模型;到达角度;到达时间;多普勒效应

中图分类号: TN911.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)03-0038-09

## Geometrical statistical channel model with an Inverted-Parabolic spatial distribution

ZHOU Jie<sup>1,2</sup>, XU Dong-dong<sup>1</sup>, HISAKAZU Kikuchi<sup>1,2</sup>

(1. College of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;  
2. Department of Electronic and Electrical Engineering, Niigata University, Niigata 950-2181, Japan)

**Abstract:** Due to the complexity of calculation for the parameters of angle of arrival(AOA), time of arrival(TOA) and Doppler spectra(DS),etc., a proper geometrical statistical channel model was proposed with inverted-parabolic spatial distribution around mobile station(MS) by using geometric partitioning method. Closed-form expressions for probability density functions(PDF) of AOA ,TOA and DS in the outdoor macrocell and microcell wireless environments were derived. Compared with the uniform and Gaussian scatter density model, the observed results consist with previous theory and experience. In addition, the Doppler spectra at the MS was also presented and the Clarke U-shaped model was modified. Employing the channel model, the effect of directional antenna was analyzed with the main-lobe width  $2\alpha$  at the BS and  $D/R$  and  $\phi_v$ .

**Key words:** radio propagation; geometrical channel model; circular and elliptical scattering models; angle of arrival; time of arrival; Doppler spectra

### 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<sup>[1-3]</sup>。针对各种不同的无线传播环境建立能够准确描述多径效应的无线信道模型,也是分析多天线系统(MIMO, multiple

收稿日期: 2012-07-22; 修回日期: 2013-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61372128); 科技部公益性行业专项基金资助项目(GYHY200906053); 江苏省科技支撑计划(工业)基金资助项目(BE2011195); 江苏省高校自然科学基金科学研究计划基金资助项目(08KJB510009); 教育部留学基金委启动基金资助项目(20071108); 江苏省六大高峰人才基金资助项目(2008-118); 江苏省博士后基金资助项目(2011-11-010986678)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (61372128); Non-profit Industry Fund by Ministry of Science and Technology of P.R.C.(GYHY200906053); The Scientific & Technological Support Project(Industry) of Jiangsu Province (BE2011195); Project Sponsored by Jiangsu Provincial Research Scheme of Natural Science for Higher Education Institute(08KJB510009); The National Overseas Study Support Foundation Item(20071108); The Six Kinds of Top Talent Fund of Jiangsu Province(2008-118); Jiangsu Postdoctoral Foundation Fund (2011-11-010986678)

input and multiple output)信道容量的基础。同时,无线通信领域中的信道编码、信道均衡、分集接收以及阵列信号处理等算法的设计以及算法的性能都极大程度地依赖于无线信道的特性。搭建一个准确而有效的信道模型是无线通信系统研究所不可或缺的重要内容。但建模过程中由于散射体的随机分布导致信道参数估计的复杂性,所以常用的建模方法包括基于 Maxwell 方程的各种严格或近似的数值算法以及基于散射体分布的各种空间统计信道模型<sup>[4-6]</sup>。后者因其原理简单和物理概念清晰而且计算量小的特点而备受研究人员的青睐。因此提出了多种基于散射体空间分布的统计信道模型,如散射体均匀分布圆模型(GBSBM, geometrically based single bounce model)和椭圆模型(EBSBM, ellipse based single bounce model)<sup>[7]</sup>。GBSBM 模型较能方便估计宏小区(macrocell)环境下各种重要的空间-时间信道参数, EBSBM 模型能估计微小区(microcell)情况,但是与实测数据的比较表明, GBSBM 和 EBSBM 模型的估计结果与实测数据不够吻合准确度较差。在实际电磁环境中,非均匀散射体分布的假设比较符合现实的物理事实,即通常来说远处的散射体密度分布比近处的散射体密度分布要小。为此 Jana<sup>[8]</sup>给出了一种基于高斯分布圆模型, Jiang L<sup>[9,10]</sup>给出基于瑞利和指数分布圆模型, Olenko<sup>[11]</sup>给出的基于反抛物线分布圆模型等。通常对非均匀散射体密度分布的信道模型的空时信道参数分析就变得异常困难,文献[11]仅采用 MATLAB 符号积分法给出 TOA 复杂的通式,且没有分析出 TOA 数值结果和阐明 TOA 变化规律。因此无法将信道参数直接或间接刻画出来。

本文提出一种合理的空间信道模型,并引入几何分割法导出基于 Inverted Parabolic 散射体分布的空间统计信道模型。模型能方便地估计移动通信宏小区和微小区环境下各种重要的 AOA 和 TOA 空时信道特征参数。分析结果与 Ertel R B<sup>[7]</sup>的均匀分布圆模型和 Jana<sup>[8]</sup>的高斯分布圆模型对比表明本模型的信道参数估计结果符合理论和经验,并与实测结果<sup>[12]</sup>相比吻合较好,其均方相对误差优于均匀圆模型和接近高斯分布圆模型。在基站(BS)设计为指向性天线时,利用信道空时特征参数解析了移动台(MS)的多普勒效应,修正了 Clarke U-shaped 多普勒经典模型,阐明了指向性天线主瓣宽度  $2\alpha$ 、空间模型参数  $D/R$  和移动台移动参数间的相关影响机理。

## 2 系统信道模型与 AOA/TOA 联合概率密度

### 2.1 信道模型与非均匀散射体分布函数

假设在信道模型中,作为信号发射机的 MS 和作为接收信号的 BS 之间距离为  $D$ ,且散射体分布在一个圆形散射区域  $R$  内。为利于模拟和分析移动通信室外宏小区和微小区或室内微微小区无线通信环境,假设 BS 和 MS 均落在散射体分布的圆区域内,且散射体与移动台和基站在同一平面上。在如图 1 所示的空间信道模型中假设坐标原点在 MS 处, BS 坐标即为  $(-D,0)$ 。假设以 MS 为中心原点,散射体以 Inverted-Parabolic 密度函数分布在圆形散射区域内,其在极坐标系中的分布概率密度为<sup>[13-17]</sup>

$$f_{x,y}(x,y) = \frac{2}{\pi R^2} \left[ 1 - \frac{x^2 + y^2}{R^2} \right],$$

$$0 \leq r_s = \sqrt{x^2 + y^2} \leq R \quad (1)$$

式(1)定义了散射体分布密度函数。常用的其他多种分析中常用散射体分布概率密度还有均匀分布<sup>[6,7]</sup>、高斯分布<sup>[8]</sup>、瑞利分布和指数分布<sup>[9]</sup>以及双曲线分布<sup>[18]</sup>等。在此为导出空间信道模型参数首先做以下假设。

1) 在圆形散射区域内,非直达路径的电波传播以在散射体上的单次反射为主,圆形散射区域内每个散射体都以恒等于 1 的相同概率产生一条反射路径。如图 1 中散射点(SP, scatterer point)表示圆形散射区域内任何一个散射体, MS 发射的电磁波信号经此反射点到达 BS。同样对下行信道,具有相同的假设和类似的结论。

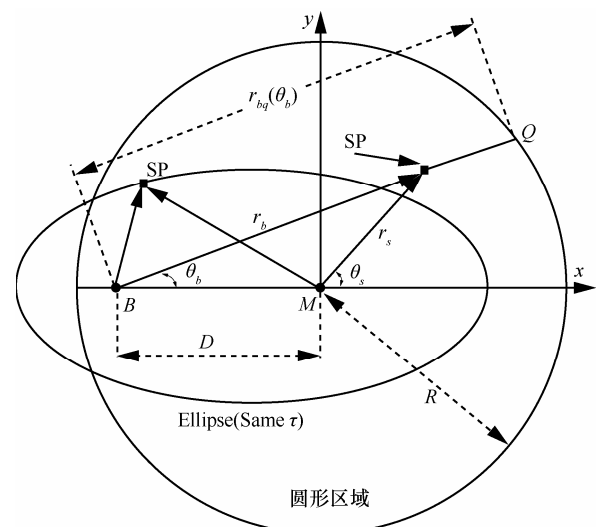


图1 空间统计信道计算模型

2) 在估计 BS 的来波信号空时信道参数时, BS 和 MS 设计为全向天线。在求解 MS 的多普勒功率谱时, BS 天线设计为主瓣宽度为  $2\alpha$  和增益为 1 的指向性天线。

### 2.2 AOA/TOA 联合概率密度

基于信道空间模型(如图 1 所示), 任何散射体点的直角坐标系  $(x, y)$  换算成变量为极坐标  $r_b$  和  $\theta_b$  的数学关系式有<sup>[8-10]</sup>

$$\begin{aligned} x &= r_b \cos \theta_b - D \\ y &= r_b \sin \theta_b \end{aligned} \quad (2)$$

以极坐标  $(r_b, \theta_b)$  变换分布密度函数式(1)可得

$$\begin{aligned} f(r_b, \theta_b) &= r_b f_{x,y}(x, y) \\ &= r_b f_{x,y}(r_b \cos \theta_b - D, r_b \sin \theta_b) \end{aligned} \quad (3)$$

对任何散射体反射的电磁波信号, 从 MS 到 BS 间如存在的电波传播路径, 则到达时延 TOA  $\tau$  为

$$\tau = \frac{r_b + r_s}{c} = \frac{1}{c} \left( r_b + \sqrt{D^2 + r_b^2 - 2r_b D \cos \theta_b} \right) \quad (4)$$

解方程式(4)得  $r_b$  为

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

其坐标转换雅可比(Jacobian)式  $J(r_b, \theta_b)$  是入射信号路径的波离角度。图 1 显示经任意散射体点反射而产生的来波信号 AOA 角度等于  $\theta_b$ , 且  $|\theta_b| \leq \pi$ , 任意散射体点与 BS 的距离为  $r_b$ , 则以极坐标变量  $r_b$  和  $\theta_b$  表示的来波信号 AOA/TOA 联合概率密度函数为<sup>[4,5]</sup>

$$f(\tau, \theta_b) = \frac{f(r_b, \theta_b)}{|J(r_b, \theta_b)|} \quad (6)$$

## 3 来波信号 AOA 和 TOA 概率密度

### 3.1 BS 的来波信号 AOA 概率密度

在图 1 中如果 BS 与 SP 的连线延伸与  $r_s = R$  的边界圆相交于  $Q$  点。令  $r_{bq}(\theta_b) = \overline{BQ}$ , 来波信号的 AOA 概率密度函数可表示为<sup>[6,7]</sup>

$$f(\theta_b) = \int_0^{r_{bq}(\theta_b)} r_b f(r_b, \theta_b) dr_b \quad (7)$$

求解  $r_{bq}(\theta_b)$  可为

$$r_{bq}(\theta_b) = D \cos \theta_b + \sqrt{D^2 \cos^2 \theta_b - D^2 + R^2} \quad (8)$$

把式(8)和式(3)代入式(7)解积分可得 BS 的来波信号 AOA 概率密度函数式:

$$\begin{aligned} f(\theta_b) &= \frac{1}{\pi R^4} [(R^2 - D^2) r_{bq}^2(\theta_b) + \\ &\quad \frac{4}{3} D r_{bq}^3(\theta_b) \cos \theta_b - \frac{1}{2} r_{bq}^4(\theta_b)] \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中变量  $\theta_b \in [-\pi, \pi]$ , 来波信号 AOA 概率密度函数  $f_{\theta_b}(\theta_b)$  的角度扩展  $\sigma$  为<sup>[8]</sup>

$$\sigma = \sqrt{\int \theta_b^2 f(\theta_b) d\theta_b} \quad (10)$$

### 3.2 BS 的来波信号 TOA 概率密度

文献[1~8]研究揭示对 BS 和 MS 间具有相同路径时延  $\tau$  的有效散射体分布在同一个椭圆上, 其焦点落在 BS 和 MS 位置。为求解 BS 的来波信号 TOA 概率密度函数, 可以先求解信号 TOA 累积概率分布函数(CDF, cumulative density functions), 即求解任意有效散射体落在椭圆内的概率与圆形散射区域的概率比。

首先以 MS 为原点定义极坐标系  $(r_s, \theta_s)$ , 注意参数  $\theta_s$  定义为顺时针方向增大, 可求得椭圆区域和圆形散射体区域在此极坐标系下的散射体分布密度函数加权相交面积。由图 2 所示知电磁信号路径时延范围为  $\tau \in [D/c, (D+2R)/c]$ , 其中最小时延  $D/c$  为信号由 MS 与 BS 的直达路径(LOS, line of sight)传输时延。路径时延  $\tau$  的分析可分为 Case1: 椭圆区域与圆散射区域部分相交  $\tau \in [(2R-D)/c, (D+2R)/c]$  和 Case2: 椭圆区域与圆散射区域完全相交  $\tau \in [D/c, (2R-D)/c]$ 。针对求解非均匀散射体分布密度下的加权相交面积问题, 本文引入几何分割法导出来波信号 TOA 的概率密度函数。

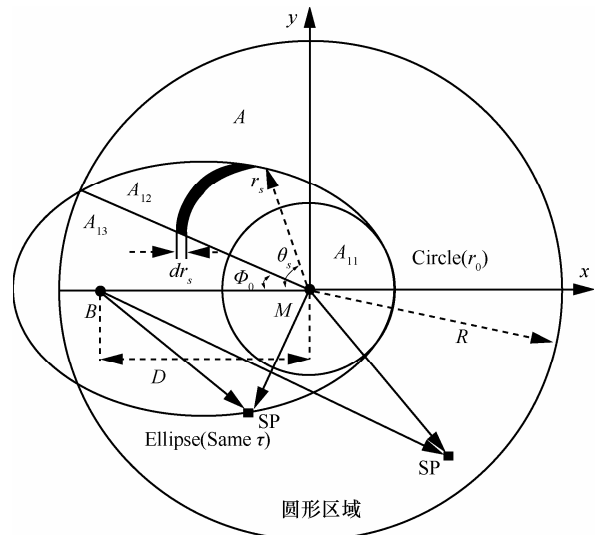


图 2 来波信号 TOA 累积概率 CDF 计算模型

**Case1** 椭圆区域与圆散射区域部分相交  $\tau \in [(2R-D)/c, (D+2R)/c]$ 。

因相交区域以直角坐标系  $x$  轴对称，可以仅计算上半相交面积。为估算椭圆与圆散射体区域的散射体分布加权相交面积，采用几何分割法把相交区域分为图 2 所示的 3 部分  $A_{11}$ 、 $A_{12}$  和  $A_{13}$ 。由图 2 计算模型有

$$\begin{cases} A_{11} = \int_0^{\phi_0} (\pi - \phi_0) r_s f(r_s, \theta_s) dr_s \\ A_{12} = \int_{\phi_0}^R (\theta_s - \phi_0) r_s f(r_s, \theta_s) dr_s \\ A_{13} = \frac{\phi_0}{2\pi} A = \frac{\phi_0}{2\pi} \end{cases} \quad (11)$$

**Case2** 椭圆区域与圆散射区域完全相交  $\tau \in [D/c, (2R-D)/c]$ 。

图 2 是 Case2 为 Case1 的特殊情况，即在  $\phi_0=0$  时椭圆全部缩进圆散射体区域内，几何分割法的 3 部分区域转换为  $A_{21}=A_{11}$ 、 $A_{22}=A_{12}$  和  $A_{23}=A_{13}$ 。数值计算中需要变换积分上下限完成其加权相交面积的求解，因此椭圆与圆散射区域的分割加权相交面积  $A_{21}$ 、 $A_{22}$  和  $A_{23}$  分别为

$$\begin{cases} A_{21} = \int_0^{\phi_0} \pi r_s f(r_s, \theta_s) dr_s \\ A_{22} = \int_0^{D+r_0} \theta_s r_s f(r_s, \theta_s) dr_s \\ A_{23} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

因此可求得任意有效散射体落在椭圆内的概率与圆形散射区域的概率比，即可求得路径时延 TOA  $\tau$  的累积概率分布函数  $F(\tau)$ 。如对自变量  $\tau$  求导微分可得 BS 的来波信号的 TOA 概率密度函数为<sup>[20-22]</sup>

$$f(\tau) = \begin{cases} \text{Case1: } \frac{1}{\pi} \frac{\partial \phi_0}{\partial \tau} + 2c \left( \frac{1}{R^2} - 1 \right) \left( r_0 - \frac{r_0^3}{R^2} \right) + \frac{2}{\pi R^2} \frac{\partial k_0}{\partial \tau} \\ \text{Case2: } \frac{2}{\pi R^2} \frac{\partial k_1}{\partial \tau} \end{cases} \quad (13)$$

其中，

$$k_0 = \int_0^{\pi} \left( r_s^2 - \frac{r_s^4}{2R^2} \right) d\theta_s, k_1 = \int_0^{\pi} \left( r_s^2 - \frac{r_s^4}{2R^2} \right) d\theta_s$$

## 4 多普勒频谱功率谱

### 4.1 MS 的来波信号 AOA 概率密度

针对 MS 的移动特征，空间信道的时延相关特

性的另一种描述是多普勒功率谱，多普勒功率谱是信号时间相关的傅里叶变换。本节就 MS 的运动方向和运动速度，导出 MS 的多普勒功率谱表达式，计算了在非均匀散射体分布条件下的多普勒效应，阐明 MS 的移动特性、BS 指向性天线参数与散射体分布概率三者之间的机理关系。图 3 中假设 BS 指向性天线具有主瓣宽度为  $2\alpha$  和归一化增益。如果在  $\alpha=\pi$  时，BS 天线设计为全向性天线，MS 的来波信号 AOA 概率密度分布恒为常数。在此各向同性的前提下，多普勒功率谱为 Clarke U-shaped 经典功率谱。在  $\alpha < \pi$  时，BS 指向性天线使 MS 的来波信号局限在方向图主瓣  $2\alpha$  内，有效散射体区域仅为指向性天线主瓣区域与圆形散射区域的相交并呈现扇形区域。

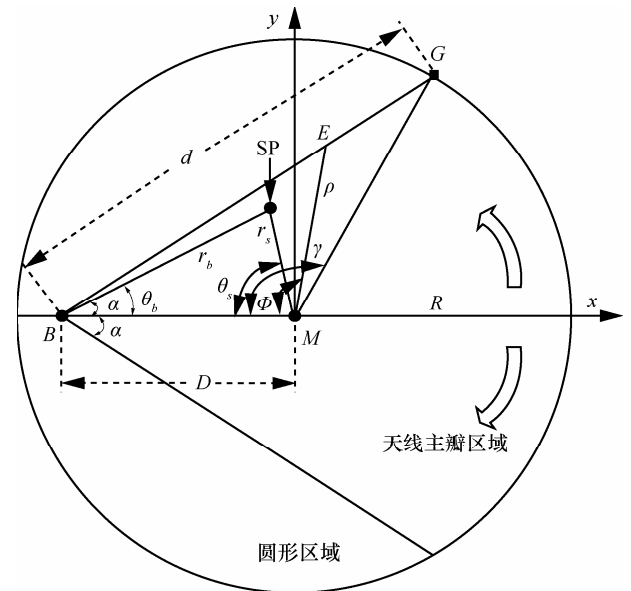


图 3 MS 来波信号 AOA 概率密度计算模型

针对求解 MS 的来波信号 AOA 概率密度，同样可以先求解信号 AOA 累积概率分布函数，即求解任意有效散射体落在指向性天线主瓣区域和与空间极坐标参数  $\phi$  相交散射区域  $\Delta BEM$  的概率比。图 3 显示扇形有效散射区域以直角坐标  $x$  轴对称，可以仅求解上半扇形有效区域部分。由图 3 计算模型可求得扇形有效散射区域加权总面积为常数  $A_{2\alpha}$ ：

$$A_{2\alpha} = \frac{4}{\pi R^2} \left[ \int_0^{\gamma} \int_0^{\rho} \left( 1 - \frac{r_s^2}{R^2} \right) r_s dr_s d\theta_s + \int_0^R \left( 1 - \frac{r_s^2}{R^2} \right) r_s dr_s d\theta_s \right] \quad (14)$$

在空间极坐标参数  $0 \leq \phi \leq \gamma$ ，有效散射区域

$\Delta BEM$  加权面积为

$$A_{\text{area}}(\phi) = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^\phi \left[ \rho^2(\theta_s) + \frac{1}{2R^2} \rho^4(\theta_s) \right] d\theta_s \quad (15)$$

MS 的来波信号 AOA 累积概率分布函数 CDFs  $F(\phi)$  为式(15)除式(14)，再对自变量  $\phi$  求导可微分得来波信号 AOA 概率密度函数为<sup>[21,22]</sup>

$$f_\phi(\phi) = \frac{1}{A_{2\alpha} \pi R^2} \left[ \rho^2(\phi) - \frac{1}{2R^2} \rho^4(\phi) \right] \quad (16)$$

在空间极坐标参数  $\gamma \leq \phi \leq \pi$ ，有效散射区域  $\Delta BEM$  加权面积分为两部分求解可得

$$A_{\text{area}}(\phi) = \frac{2}{\pi R^2} \left[ \int_0^\gamma \int_0^\rho \left( 1 - \frac{r_s^2}{R^2} \right) r_s dr_s d\theta_s + \int_\gamma^\phi \int_0^R \left( 1 - \frac{r_s^2}{R^2} \right) r_s dr_s d\theta_s \right] \quad (17)$$

因此在  $\gamma \leq \phi \leq \pi$ ，MS 的来波信号 AOA 概率密度函数为

$$f_\phi(\phi) = \frac{1}{2\pi A_{2\alpha}} \quad (18)$$

#### 4.2 多普勒频谱功率谱

在 BS 设计为主瓣  $2\alpha$  的指向性天线时，式(16)和式(18)导出了 MS 的来波信号 AOA 概率密度函数。由此可以估算因 MS 的移动特征所产生的信号多普勒频移和功率谱。

假设 MS 以速度  $v$  km/h 和  $\phi_v$  方向移动， $\phi_v$  矢量定义为 MS 移动方向与直达路径 LOS 之间的夹角，决定了 MS 的移动方位。由经典 Clarke 模型<sup>[6]</sup>，多普勒频移的概率密度函数为

$$f_v(f) = \frac{f_\phi(\phi_v + |\cos^{-1}(f/f_m)|)}{f_m \sqrt{1-(f/f_m)^2}} + \frac{f_\phi(\phi_v - |\cos^{-1}(f/f_m)|)}{f_m \sqrt{1-(f/f_m)^2}} \quad (19)$$

其中， $f_m = v/\lambda$  为 MS 的最大多普勒频移和  $\lambda$  为载波波长。 $f_\phi(\phi)$  为式(16)和式(18)MS 的来波信号 AOA 概率密度函数，其修正多普勒功率谱为

$$S_{DS}(f) = \frac{A_0^2}{f_m \sqrt{1-(f/f_m)^2}} \left[ f_\phi(\phi_v + |\cos^{-1}(f/f_m)|) + f_\phi(\phi_v - |\cos^{-1}(f/f_m)|) \right] \quad (20)$$

如果 MS 的来波信号 AOA 概率密度函数为常数，式(20)可演变为经典 Clarke U-shaped 多普勒功率谱模型。

## 5 数值结果

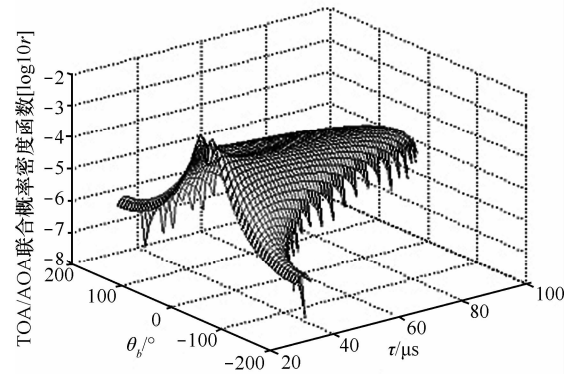
对本文提出的空间信道圆模型，模型中最大来波信号 AOA 到达角度和  $\theta_{b,\max}$  和最大信号传输时延  $\tau_{\max}$  的表达式为

$$\begin{aligned} |\theta_{b,\max}| &= \pi \\ \tau_{\max} &= \frac{D+2R}{c} \end{aligned} \quad (21)$$

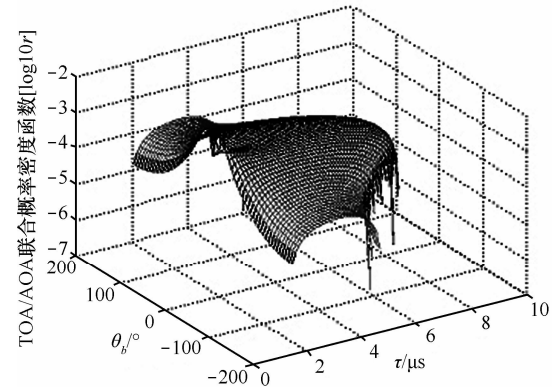
如图 1 所示假设的空间信道模型使得 BS 和 MS 均落在散射体分布区域中，使得模型能方便地调整空间模型参数  $D/R$ ，利于准确和灵活地估计宏小区和微小区环境下各种重要的空时信道参数。

### 5.1 AOA/TOA、AOA 和 TOA 概率密度

图 4 所示 BS 的来波信号 AOA/TOA 联合概率密度函数。以方便估计宏小区和微小区环境下各种重要的空时信道参数，定量给出小区几何模型参数选择为宏小区  $D=9$  km 和  $R=10$  km<sup>[20-22]</sup>以及小区微小区  $D=0.5$  km 和  $R=1$  km<sup>[9]</sup>的联合概率密度函数图。图中显示其联合概率函数值在  $(\tau_p, \pm\theta_p)$  点达到双峰值，



(a) 宏小区  $D=9$  km 和  $R=10$  km

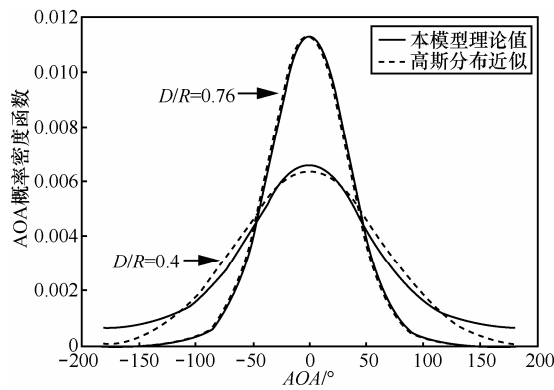


(b) 微小区  $D=0.5$  km 和  $R=1$  km

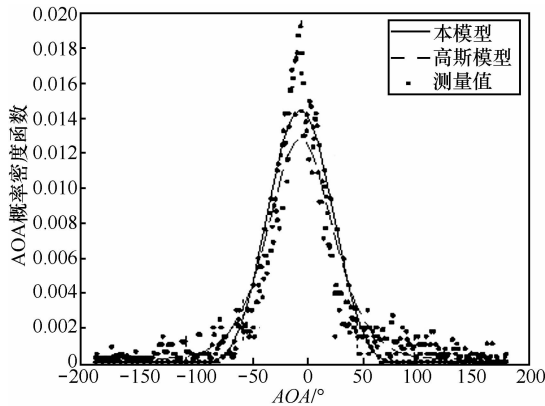
图 4 AOA/TOA 联合分布概率密度

其中,  $\tau_p = \tau_{Los}^+$  ( $\tau_{Los} = D/c$ ) 和  $\theta_p = 0^+$ , 而且宏小区联合概率密度函数比微小区概率下降速度快。在微小区中因 BS 和 MS 落在散射体密度较大区域中, 因此其 AOA/TOA 概率密度较大和下降平缓, 这与信道模型定性分析的结论一致。

对 BS 的来波信号 AOA 概率分布, 经大量研究结果<sup>[1-7]</sup>证明不论散射体分布模型如何, 来波信号分布具有趋于高斯分布规律。为验证本文提出模型及推导出的表达式的正确性, 将 AOA 概率密度函数式(9)结果与 Jana<sup>[8]</sup>的高斯分布圆模型的结果做比较。图 5 给出本文提出的空间信道模型的 AOA 概率分布具有高斯分布特征, 且在空间参量  $D/R = 0.76$  时数值结果与文献[8]结果一致, AOA 概率分布具有零均值和扩展角  $35.7^\circ$ 。同时可知在  $D/R$  增大时, 结果越趋近高斯分布规律。另外在  $D/R \rightarrow 1$  和扩展角为  $38^\circ$  时, 结果与高斯模型理论值和实测数据的对比。相比于高斯模型, 本模型的结果与实际测量数据吻合得更好, 尤其是在到达角较小的情况。因此空间信道模型与高斯分布圆模型一样, 与定性分析结论吻合并适用于描述移动通信宏小区和微小区环境的空间信道参数。



(a) 理论值与高斯分布值比较



(b) 理论值与高斯分布值及测量值比较

图 5 BS 的来波信号 AOA 概率分布

图 6 给出本文提出几何分割法导出的 BS 的来波信号 TOA 概率密度函数的数值结果及其变化规律。为验证几何分割法及推导出的表达式的正确性, 将导出式(13)的数值结果与文献[7]中的理论结果以及文献[12]实测值做比较。文献[12]对瑞典的 Aarhus 市市区的 AOA 和 TOA 分布特性做了测量。测量使用载频为 1.8 GHz, 时域最小采样时间间隔为 122 ns。Aarhus 城市内大多数建筑物为 4~6 层, 平均高度约为 20 m, 所有的测量都分别在基站天线安装离地高度为 20 m 和 32 m 2 种情况下各进行一次。前者属于微小区传播环境, 后一种情况属于高基站宏小区传播环境, 这 2 种移动通信信道环境适合用椭圆模型或非均匀散射体分布圆模型对其进行描述。

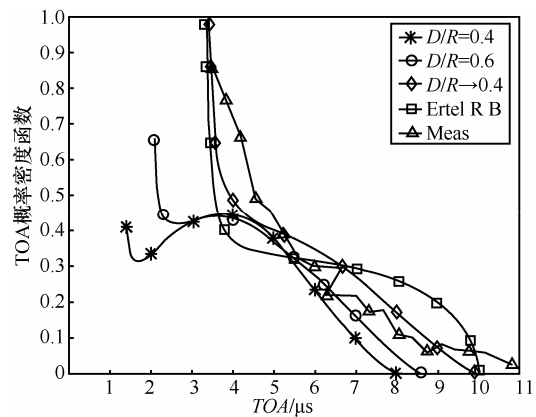


图 6 BS 的来波信号 TOA 概率分布

本文信道模型的 TOA 分布曲线与文献[12]的实测值的比较如图 6 所示, 作为对比图中同时给出了文献[7]均匀分布圆模型估计的结果。由图 6 可以看出本模型的估计结果比文献[7]模型的结果与实测值吻合得更好。原因是本模型的 Inverted Parabolic 散射体分布假设比均匀分布更被广泛接受的多径信道传输物理事实, 即通常来说远处的散射体比近处的散射体分布少, 且对信道中电波传播的影响要小。另一方面本模型采用的是一种特殊结构圆模型, BS 和 MS 均落在散射体分布区域, 符合空间信道环境, 利于空间参数  $D/R$  和散射体分布的共同作用。因此本模型更能准确灵活地描述各种环境下的传播特性。

图 6 给出了来波信号的 TOA 概率密度函数随着空间模型参数  $D/R$  比值的变化情况。与 Ertel R B<sup>[7]</sup>均匀分布圆模型理论结果比较, 本模型选择信道空间参数:  $R=1 \text{ km}, D \rightarrow 1 \text{ km}$ ; 而文献[1~3]:  $R=1 \text{ km}$ ,

$D=1\text{ km}$ 。在本模型与圆模型空间参数选择趋于一致时, TOA 概率密度分布结果也逐渐趋于一致。图中在 TOA:  $1\ \mu\text{s} \leq \tau \leq 3.3\ \mu\text{s}$  本模型数值结果偏左, 因为本模型 BS 和 MS 间距参数  $D$  小于并逐渐趋于均匀圆模型参数。其后 TOA 结果部分大于和小于文献[7]结果, 原因为本模型采用非均匀散射体分布。由于 MS 近处散射体密度大和远处散射体密度小, 因此近处 TOA 概率增大, 远处 TOA 概率减小。数值结果符合物理信道定性分析。

可使用式(22)定义的均方相对误差来定量分析空间信道模型的估计结果与实测值之间的误差[9]。

$$\delta_{\text{error}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i' - x_i)^2} \quad (22)$$

表 1 列出了分别由本文提出的空间信道模型和 Ertel R B<sup>[7]</sup>均匀圆模型以及 Jana<sup>[8]</sup>高斯圆模型的信号 TOA 分布结果与文献[13]给出的实测值之间的均方相对误差。从表 1 可以看出本模型 TOA 分布估计值的均方相对误差与实测结果相比吻合较好并接近高斯圆模型, 其均方相对误差处于均匀圆模型和高斯分布圆模型之间, 且本文的几何分割方法简单, 理论结果和定性结论一致。

表 1 来波信号 TOA 理论估值与测量值相对误差

模型	TOA 相对误差
均匀分布圆模型	0.146
本文几何模型	0.070
高斯圆模型	0.058

### 5.2 MS 的多普勒功率谱

MS 的来波信号的空间信道参数估计如何? 如果 BS 收发天线设计为全向性天线, 本模型 MS 的 AOA 和 TOA 均为恒定的概率分布。MS 因其移动性而产生的多普勒效应符合 Clarke 经典模型。但是如果 BS 设计为主瓣宽度为  $2\alpha$  的指向性天线, 使得部分散射体区域成为有效区域, 改变了原有 MS 的来波信号 AOA 的概率分布规律。

图 7 给出 BS 指向性天线主瓣宽度  $2\alpha=\pi/3$  时, MS 的来波信号的 AOA 概率密度函数随着空间模型参数  $D/R$  的变化规律。结果显示  $D/R$  参数仅影响概率分布最大值, 但不改变概率密度分布规律。来波信号 AOA 概率分布主要依赖空间模型参数  $\gamma$  (如图 3 所示)。图 8 表示在空间模型参数  $D/R$  确定时,

MS 的来波信号概率分布受指向天线主瓣  $2\alpha$  的影响规律。结果显示主瓣  $2\alpha$  不仅改变 AOA 概率分布最大值, 且影响空间参数  $\gamma$ , 但基本图形未有大的变化。

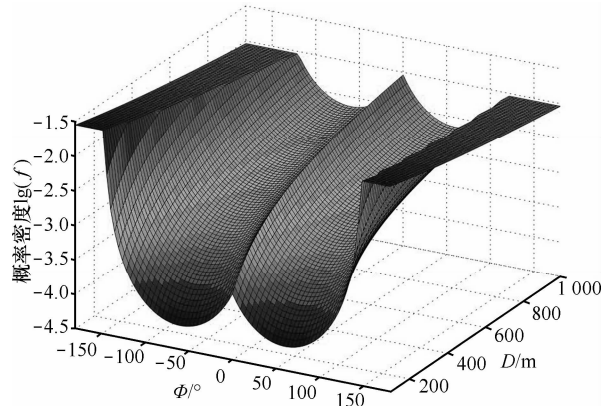


图 7 MS 的来波信号 AOA 概率分布 ( $2\alpha=\pi/3$ )

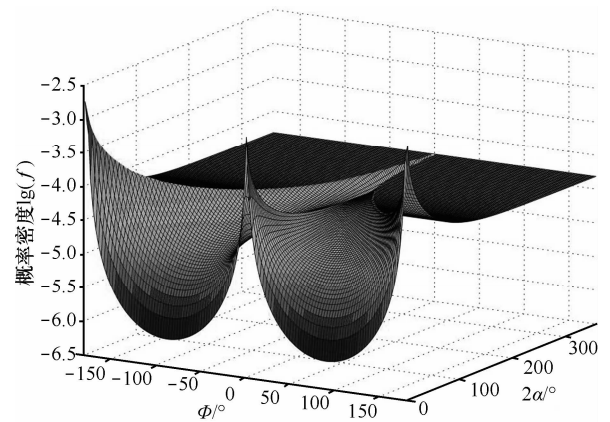


图 8 MS 的来波信号 AOA 概率分布 ( $D/R=0.8$ )

MS 的移动性将导致产生多普勒效应, 这种效应可用 Clarke 经典模型来评估。但是如果在 BS 设计为指向天线时, 修正的多普勒功率谱式(20)阐明了来波信号 AOA 概率分布、MS 移动方向以及移动速度和载波频率的关系式。假设 MS 的移动速度  $54\text{ km/h}$ 、载波频率  $2\text{ GHz}$  以及移动方向为与 LOS 射线平行(参数  $\phi_v = 0$  或  $\pi$ )和垂直( $\phi_v = \pi/2$ )方向。图 9 详细阐明和比较了在 2 种不同分布和  $\phi_v = \pi/2$  时, MS 的来波信号多普勒功率谱。在 MS 移动方向与 LOS 射线垂直方向时, 由于指向天线主瓣  $2\alpha$  以坐标  $x$  轴上下对称, 因此多普勒功率谱左右对称。且主瓣宽度越小使得信号多径分量越少, 多普勒功率谱越集中在多普勒频率零点附近。随主瓣宽度越大, 功率谱逐渐趋于 Clarke U-shaped 经典模型。

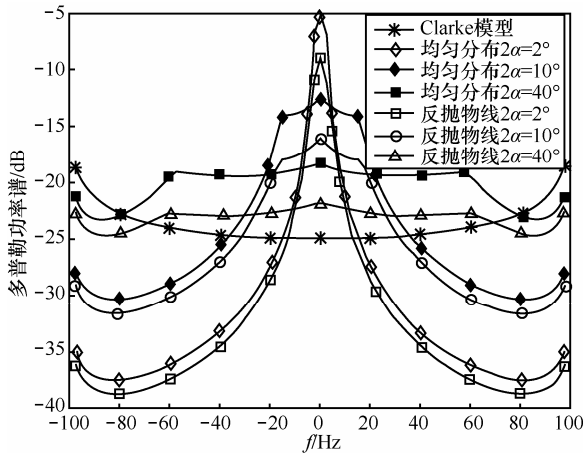


图 9 MS 多普勒功率谱( $D/R=0.8$  和  $\phi_v = \pi/2$ )

图 10 给出在 MS 移动方向平行于 LOS 来波方向时, 来波的多普勒功率谱, 阐明了功率谱左右倾斜并呈现非对称图形, 且频谱分布边缘较大中间平稳。在  $\phi_v = 0$  时功率谱倾斜于右方向, 说明多普勒频率负分量比重较大。原因是 MS 移动方向与 LOS 来波方向相反, 产生多普勒频率负分量的散射体数量较多, 因此负分量多径信号较强。反之在  $\phi_v = \pi$  时 MS 移动方向与来波方向同行, 产生完全相反结果。

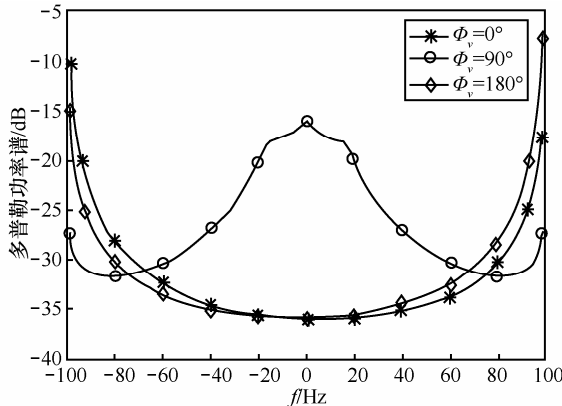


图 10 MS 多普勒功率谱( $D/R=0.8$  和  $2\alpha = \pi/36$ )

## 6 结束语

针对移动通信空间信道环境特征, 本文给出了一种基于 Inverted Parabolic 非均匀散射体分布的空间统计信道模型。阐明了室外宏小区和微小区环境下空时信道参数 AOA、TOA 和 AOA/TOA 联合概率分布规律。在求解非均匀散射体分布下 TOA 以及多普勒功率谱时, 引入了几何分割法导出了空间统计信道参数闭合表达式。数值结果与均匀分布圆模型和高斯分布圆模型对比表明本模型的信道参

数估计结果符合理论和经验, 且与实测结果吻合得较好。在 BS 设计为指向性天线时, 研究了 MS 的多普勒效应, 修正了 Clarke 经典模型, 揭示了指向天线主瓣宽度  $2\alpha$ 、空间模型参数  $D/R$  和非均匀散射体分布影响多普勒功率谱的内在机理。本模型弥补了现有研究的不足, 拓展了空间统计信道模型的研究和应用, 对评估多天线 MIMO 系统空时处理算法和仿真无线通信系统提供有力的工具。

## 参考文献:

- [1] MOHAMMAD A S. Generalized Three Dimensional Geometrical Scattering Channel Model for Indoor and Outdoor Propagation Environments[D]. University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, 2010.
- [2] BALTZIS K B. On the geometric modeling of the uplink channel in a cellular system[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2008,1(11):75-82.
- [3] BALTZIS K B, SAHALOS J N. A simple 3D geometric channel model for macrocell mobile communication[J]. Wireless Pers Commun, 2008, 51(2):329-347.
- [4] WU Y I, WONG K T. A geometrical model for the TOA distribution of uplink/downlink multi-paths assuming scatterers with a conical spatial density[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2008, 50(6): 196-205.
- [5] WU Y I, WONG K T. Polarization-sensitive geometric modeling of the distribution of direction-of-arrival for uplink multi-paths[J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2011,5(1): 95-101.
- [6] PETRUS P, REED J H, RAPPAPORT T S. Geometrical-based statistical macrocell channel model for mobile environment[J]. IEEE Trans Commun, 2002, 50(3): 495-502.
- [7] ERTEL R B, REED J H. Angle and time of arrival statistics for circular and elliptical scattering model[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999,17(11): 1829-1840
- [8] JANASWAMY R. Angle and time of arrival statistics for the Gaussian scatter density model[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002,1(3):488-497.
- [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] JIANG L, TAN S Y. Geometrically based power azimuth spectrum models for mobile communication systems[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007,49(9): 2093-2097.
- [11] OLENKO A Y, WONG K T, ABDULLA M. Analytically derived TOA-DOA distributions of uplink/downlink wireless cellular multi-paths arisen from scatterers with an inverted-parabolic spatial distribution around the mobile[J]. IEEE Signal Processing Letter, 2005, 12(7): 516-519
- [12] 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 Trans Veh Technol*, 2000,49(2): 437-447.
- [13] LEUNG J. Hybrid Waveguide Theory-Based Modeling of Indoor Wireless Propagation[D]. University of Toronto, 2009.
- [14] MITTAL A, BHATTACHARJEE R, PAUL B S. Angle and time of arrival statistics for a far circular scattering model[A]. *Proc of NCC2009*[C]. 2009.141-145.
- [15] 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.
- [16] KHAN N M, SIMSIM M T, RAMER R. Modeling spatial aspects of mobile channel for macrocells using Gaussian scattering distribution[A]. *Proc of 8th International Conference on Telecommunications*[C]. 2005.
- [17] INTARAPANICH A, KAFLE P L, DAVIES R J, *et al.* Geometrically based broadband MIMO model with tap-gain correlation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007,56(6): 3631-3641.
- [18] MAHMOUD S S, HUSSAIN Z M, SHEA P O. Geometrical model for mobile radio channel with hyperbolically distribution scatterers[A]. *Proc of ICCS2002*[C]. 2002.17-20.
- [19] LUO F, DU M H. AOA and TOA estimation based on an enhanced circular scattering model[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2007, 22(5):799-803.
- [20] ZHOU J, ONOZATO Y, KIKUCHI H. Distribution of ISR and its optimization in performance evaluation of forward link in cellular mobile radio systems[J]. *IEICE Trans on Communications*, 2002,85(8): 1479- 1489.
- [21] ZHOU J, CHUNMEI L, LIN Q, *et al.* Geometrical statistical channel model arisen from scatterers around the mobile with an inverted-parabolic spatial distribution[J]. *Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2012, 19(5):1-8.
- [22] ANDREA G. *Wireless Communications*[M]. Cambridge: Cambridge Press, 2005.

#### 作者简介:



**周杰 (1964-)**，男，四川泸州人，南京信息工程大学教授，日本国立新泻大学工学部访问教授、博士生导师，主要研究方向为移动通信理论、无线传感网络和无线接入网等。



**徐冬冬 (1980-)**，男，江苏扬州人，南京信息工程大学博士生，主要研究方向为移动通信理论和多天线 MIMO 信道建模等。



**菊池久和 (1951-)**，男，新泻人，日本国立新泻大学教授，南京信息工程大学名誉教授、博士生导师，主要研究方向为信号处理和通信理论等。