

基于空心半球体统计信道模型的 AOA & TOA 研究

周杰¹ 曹志钢¹ 邵根富²

(1. 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京, 210044; 2. 杭州电子科技大学通信学院, 杭州, 310018)

摘要: 针对某些特殊的微小区移动通信环境, 比如空旷的广场或者大型购物商厦等, 移动台 (Mobile station, MS) 周围散射体可能很少, 甚至于为零, 在已有模型基础上建立了一种新的 3-D 空间模型——空心半球体空间模型。散射体均匀分布在移动台附近空间内, 而基站 (Base station, BS) 的位置在离地面有一定的高度。在水平平面和垂直平面内分别推导出来波信号的到达角度 (Angle of arrival, AOA) 的概率密度函数表达式, 另外也研究了信号到达时间 (Time of arrival, TOA) 的概率密度函数。估计结果与某些 2-D 和 3-D 模型对比, 表明本模型的信道参数估计符合以往的理论, 对空间统计信道模型的研究和应用提供了有效的支持与拓展。

关键词: 空间信道模型; 到达时间; 到达角度; 微小区

中图分类号: TN911.6 **文献标志码:** A

AOA & TOA Statistics for 3-D Hollow-Hemispheroid Model Around Mobile Station

Zhou Jie¹, Cao Zhigang¹, Shao Genfu²

(1. College of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, 210044, China; 2. College of Communication, Hangzhou University of Electronic Science and Technology, Hangzhou, 310018, China)

Abstract: A generalized three-dimensional (3-D) geometric model is proposed with the 3-D scattering hollow-hemispheroid at the mobile station (MS) considering macrocellular mobile systems such as crowded square and large shopping malls. Closed-form expressions for joint and marginal probability density functions (PDFs) of the angle of arrival (AOA) seen at the MS and base station (BS) in the azimuth plane and elevation plane are derived respectively. Moreover, closed-form expressions for propagation path delays and trivariate joint PDFs of the time of arrival (TOA) seen at the MS are investigated. The observed theoretical results are compared with some presented 2-D and 3-D scattering models to validate the generalization of the proposed model. The proposed theoretical results provide effective support and development for a practical 3-D scattering environment.

Key words: geometric modeling; time of arrival (TOA); angle of arrival (AOA); microcell

引 言

近年来,在无线通信中对无线信道的研究越来越多,建立能够准确描述信道多径效应的无线信道模型,对信道参数估计(例如,信号到达角度(Angle of arrival, AOA)、到达时间(Time of arrival, TOA)概率分布密度函数、多普勒功率谱以及到达信号的空-时相关性)起着非常重要的作用。

文献[1-16]提出了许多空间信道模型,这些模型适用于各种宏小区或者微小区的移动通信环境。文献[1-2]提出了散射体空间分布圆模型和椭圆模型。在此基础上 Mahmoud 和 Jaafar 提出了散射体双曲线分布模型和空心圆环分布模型^[3-4]。Qu 在提出的 3-D 模型下计算了功率谱密度和垂直面内的 AOA 概率密度,其分析结果与实际测量值对比,发现更符合城市蜂窝通信环境^[5]。在文献[6]中 Baltzis 也提出了一种 3-D 模型,天线发射台的位置在离地面具有一定的高度,而散射体分布空间则是一个 2-D 的圆形区域,这种模型更精确地符合宏小区环境的时空特征。在此基础上 Janaswamy 和 Olenko 提出了半椭圆球体 3-D 模型,分别推导出在移动台(Mobile station, MS)和基站(Base station, BS)不同平面内的信号到达角度 AOA 闭式表达式^[7-8]。而 Nawaz 和 Qureshi 提出一种在基站 BS 有指向性天线的 3-D 模型,有效地将指向性天线与空间统计信道相结合,在此移动通信环境下估计出信道的重要空时参数^[9]。

但是在某些特定的微小区环境下,比如在某个大型购物商场或者空旷的广场上,上面所提到的一些模型就可能不适用。对于这样的移动通信环境,移动台 MS 周围散射体可能很少,甚至于为零。本文针对此特定的微小区移动通信环境,建立一种在移动台 MS 端周围散射体空心的 3-D 统计信道模型,并且估计出此空间信道的重要时空信道参数,如在不同平面内(水平平面和垂直平面)的信号到达角度 AOA、到达时间 TOA 的联合概率密度函数或者边缘密度函数。

1 移动台 MS 的波达信号 AOA 概率密度

如图 1 所示,本文建立一种新的 3-D 空间模型——空心半球体空间模型。散射体分布空间为一个空心的半球体 I ,其球体的半径为 R ,空心区域球体半径为 r 。基站 BS 离地面的垂直高度为 H ,基站 BS 到移动台 MS 的水平距离为 D ,基站 BS 和移动台 MS 之间的直达视距(line of sight, LOS)为 D_{Los} ,其表达式为

$$D_{\text{Los}} = \sqrt{D^2 + H^2} \quad (1)$$

从图 1 中可以发现散射体都分布在空心半球体区域内,其空间体积可以写为

$$V = V_{\text{hel}} - V_{\text{he2}} = \frac{2}{3}\pi(R^3 - r^3) \quad (2)$$

式中 V_{hel} 和 V_{he2} 分别为大、小半球体的体积。

1.1 水平面内的边缘密度函数

基于信道模型图 1,可以通过雅可比式将坐标 (x_m, y_m, z_m) 转换为 (r_m, ϕ_m, β_m) 来求得极坐标 (ϕ_m, β_m) 下的联合概率密度函数

$$p(r_m, \beta_m, \phi_m) = \frac{f(x_m, y_m, z_m)}{|J(x_m, y_m, z_m)|} \begin{cases} x_m = r_m \cos\beta_m \sin\phi_m \\ y_m = r_m \cos\beta_m \cos\phi_m \\ z_m = r_m \sin\beta_m \end{cases} \quad (3)$$

其中 $J(x_m, y_m, z_m)$ 为坐标转换雅可比(Jacobian)式

$$J(x_m, y_m, z_m) = \frac{1}{r_m^2 \cos\beta_m} \quad (4)$$

假设散射体在 3-D 半球体模型内是均匀分布的,则散射体分布函数为

$$f(x_m, y_m, z_m) = \begin{cases} \frac{1}{V} & (x_m, y_m, z_m) \in I \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

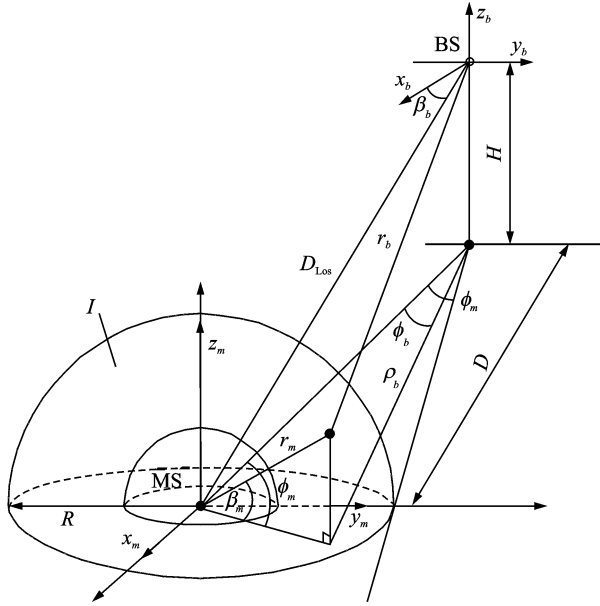


图 1 3-D空间信道模型
Fig. 1 3D spatial channel model

把式(4,5)代入(3)得到联合分布函数

$$p(r_m, \beta_m, \phi_m) = \frac{r_m^2 \cos \beta_m}{V} \quad (6)$$

联合分布函数 $p(r_m, \beta_m, \phi_m)$ 对 r_m 进行积分可以得到 $p(\beta_m, \phi_m)$ 概率密度函数

$$p(\beta_m, \phi_m) = \int_r^R p(r_m, \beta_m, \phi_m) dr_m = \frac{\cos \beta_m}{2\pi} \quad (7)$$

水平面内的边缘密度函数 $p(\phi_m)$ 可对 β_m 直接积分, 联合分布函数式(7)

$$p(\phi_m) = \int_0^{\pi/2} p(\beta_m, \phi_m) d\beta_m = \frac{1}{2\pi} \quad (8)$$

可以发现 $p(\phi_m)$ 是一个常数, 即水平角度在 $(0, 2\pi)$ 内是均匀分布的, 与其他参数没有关系。

1.2 垂直面内的边缘密度函数

垂直平面内的边缘密度函数 $p(\beta_m)$ 可以通过同样的方法得到

$$p(\beta_m) = \int_0^{2\pi} p(\beta_m, \phi_m) d\phi_m = \cos \beta_m \quad (9)$$

从式(8)和(9)中可以发现 $p(\phi_m)$ 和 $p(\beta_m)$ 之间相互独立, 即

$$p(\beta_m, \phi_m) = p(\beta_m) p(\phi_m) \quad (10)$$

2 BS端的波达信号 AOA 概率密度

2.1 水平面内的边缘密度函数

类似于 MS 端波达信号 AOA 概率密度函数的计算方法, BS 端的联合分布函数 $p(r_b, \beta_b, \phi_b)$ 为

$$p(r_b, \beta_b, \phi_b) = \frac{r_b^2 \cos \beta_b}{V} \quad (11)$$

式(11)对 r_b 进行积分可以得到 $p(\beta_b, \phi_b)$ 的表达式

$$p(\beta_b, \phi_b) = \frac{(r_{b_1}^3 - r_{b_2}^3) \cos \beta_b}{2\pi(R^3 - r^3)} \Big|_{r_b = a/\cos \beta_b} = \frac{(\rho_{b_1}^3 - \rho_{b_2}^3)}{2\pi \cos^2 \beta_b (R^3 - r^3)} \quad (12)$$

式中: r_{b_1} 和 r_{b_2} 为在 BS 端一定角度 (β_b, ϕ_b) 情况下与散射体空间相交的距离; ρ_{b_1}, ρ_{b_2} 分别为 r_{b_1} 和 r_{b_2} 在水平面内的投影,有^[7]

$$\rho_{b_{1,2}} = \frac{V \mp \sqrt{V^2 - UW}}{U} \quad (13)$$

式中: $U = 1 + \tan^2 \beta_b$; $V = D \cos \beta_b + H \tan \beta_b$; $W = D^2 - R^2 + H^2$ 。

基站水平面内的边缘密度函数可以通过式(12)对 β_b 积分得到,但文献[7]给出了更加简单的方法计算 $p(\phi_b)$

$$p(\phi_b) = \iint_{S_\varphi} \frac{1}{V} \rho_b d\rho_b dz_b = \frac{D \cos \phi_b A_\varphi}{V} \quad (14)$$

式中: A_φ 为垂直平面投影的面积(见图2)。另外定义 $\sin \varphi_m = (R/D)$ 和 $\sin \varphi'_m = (r/D)$ 。如图2所示,当 $-\varphi'_m \leq \phi_b \leq \varphi'_m$ 时,此时散射体覆盖的面积 A_{φ_1} 为

$$A_{\varphi_1} = \frac{\pi}{2} [(R^2 - D^2 \sin^2 \phi_b) - \pi(r^2 - D^2 \sin^2 \phi_b)] \quad (15)$$

而当 $\varphi'_m \leq \phi_b \leq \varphi_m$ 或 $-\varphi_m \leq \phi_b \leq -\varphi'_m$ 时,此时散射体覆盖的面积 A_{φ_2} 为

$$A_{\varphi_2} = \frac{\pi}{2} (R^2 - D^2 \sin^2 \phi_b) \quad (16)$$

联合式(14-16),可以得到 $p(\phi_b)$ 的表达式

$$p(\phi_b) = \begin{cases} \frac{3 \cos \phi_b (R + r)}{4(R^2 + Rr + r^2)} & -\varphi'_m \leq \phi_b \leq \varphi'_m \\ \frac{3 \cos \phi_b (R^2 - D^2 \sin^2 \phi_b)}{4(R^3 - r^3)} & \varphi'_m \leq \phi_b \leq \varphi_m, -\varphi_m \leq \phi_b \leq -\varphi'_m \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

2.2 垂直面内的边缘密度函数

如图2所示,基站 BS 垂直面角 β_b 的范围为 $\beta_{\min} \leq \beta_b \leq \beta_{\max}$, 其中

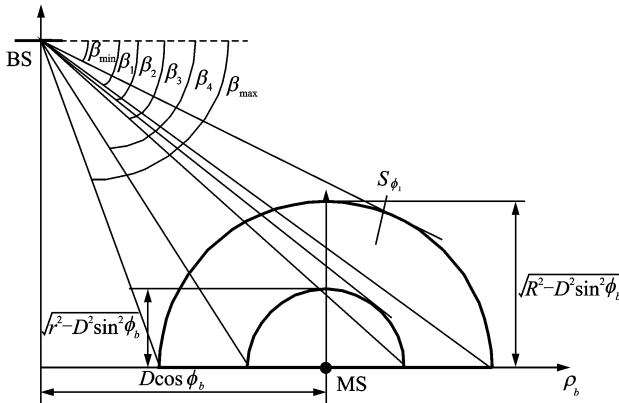


图2 以 ρ_b 为横坐标的垂直平面图
Fig. 2 Vertical plan with ρ_b as abscissas

$$\beta_{\min} = \arctan\left(\frac{HD - \sqrt{H^2 R^2 + R^2(D^2 - R^2)}}{D^2 - R^2}\right) \quad (18)$$

$$\beta_{\max} = \arctan\left(\frac{H}{D - R}\right) \quad (19)$$

在计算垂直面内的边缘密度函数 $p(\beta_b)$ 需要用到 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 和 β_4 , 其表达式分别为

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{H}{D + R}\right) \quad (20)$$

$$\beta_2 = \arctan\left(\frac{HD - \sqrt{H^2 r^2 + r^2(D^2 - r^2)}}{D^2 - r^2}\right) \quad (21)$$

$$\beta_3 = \arctan\left(\frac{H}{D + r}\right) \quad (22)$$

$$\beta_4 = \arctan\left(\frac{H}{D - r}\right) \quad (23)$$

对于给定的 β_b , 水平面内的 ϕ_{\max} 和 ϕ_1 通过计算可以得到^[9]

$$\phi_{\max} = \arccos\left(-\frac{\tan\beta_b}{D} + \frac{1}{D}\sqrt{(D^2 - R^2 + H^2)(1 + \tan^2\beta_b)}\right) \quad (24)$$

$$\phi_1 = \arccos\left(\frac{H^2 + (D^2 - R^2)\tan^2\beta_b}{2DH\tan\beta_b}\right) \quad (25)$$

如图 2,3 所示, 垂直面角 β_b 可以分为 5 种情况计算出垂直面内的边缘密度函数。当 $\beta_2 \leq \beta_b \leq \beta_3$ 时, 与散射体空间相交面在水平内的投影内部出现空心圆, 此时计算边缘密度函数需要减去空心圆的部分。另外当 $\beta_b \geq \beta_1$, 投影部分不是完整的圆, 出现曲线 OO' , 此时 $\rho_{b2} = H/\tan\beta_b$ (见图 3)。综合考虑这 5 种情况, 利用式(12)可推导出垂直面内边缘密度函数

$$p(\beta_b) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi\cos^2\beta_b(R^3 - r^3)} \int_{-\phi_{\max}}^{\phi_{\max}} (\rho_{b2}^3 - \rho_{b1}^3) d\phi_b & \beta_{\min} \leq \beta_b \leq \beta_2, \beta_4 \leq \beta_b \leq \beta_{\max} \\ \frac{1}{2\pi\cos^2\beta_b(R^3 - r^3)} \left[\int_{-\phi_{\max}}^{\phi_{\max}} (\rho_{b2}^3 - \rho_{b1}^3) d\phi_b - \int_{-\phi'_{\max}}^{\phi'_{\max}} (\rho'_{b2}^3 - \rho'_{b1}^3) d\phi_b \right] & \beta_2 \leq \beta_b \leq \beta_4 \end{cases} \quad (26)$$

式中: $\rho_{b1}, \rho_{b2}, \rho'_{b1}$ 和 ρ'_{b2} 分别为 β_b 在某一范围内相对应的值。

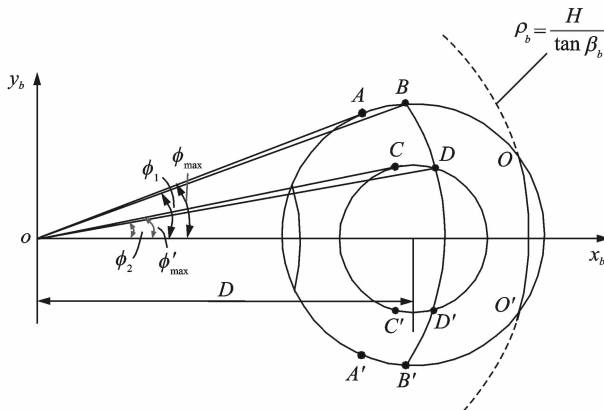


图 3 3-D 信道模型俯视图

Fig. 3 Overhead view of 3-D channel model

3 波达信号 TOA 概率密度

对任何散射体反射的信号,从基站 BS 到移动台 MS 存在传播路径,其到达时延为

$$\tau = \frac{r_m + r_b}{c} \quad (27)$$

式中: c 为光速。基站与移动台之间的最短距离为直达视距 D_{Los} , 则信号的到达时延最小值 τ_{min} 为

$$\tau_{\text{min}} = \frac{D_{\text{Los}}}{c} \quad (28)$$

其到达时延的最大值 τ_{max} 为

$$\tau_{\text{max}} = \frac{R + \sqrt{H^2 + (d+R)^2}}{c} \quad (29)$$

文献[9]给出了 r_b 关于 (r_m, β_m, ϕ_m) 的表达式

$$r_b(r_m, \beta_m, \phi_m) = \sqrt{r_m^2 + D_{\text{Los}}^2 - 2r_m(D\cos\beta_m\cos\phi_m + H\sin\beta_m)} \quad (30)$$

将式(30)代入式(27)中,将所得式子移项平方后可计算 $r_m(\tau, \beta_m, \phi_m)$ 的表达式

$$r_m(\tau, \beta_m, \phi_m) = \frac{c^2\tau^2 - D_{\text{Los}}^2}{2(c\tau - D\cos\beta_m\cos\phi_m - H\sin\beta_m)} \quad (31)$$

来波信号的 AOA/TOA 联合密度函数表达式为^[8]

$$p(\tau, \beta_m, \phi_m) = \frac{p(r_m, \beta_m, \phi_m)}{|J(r_m, \beta_m, \phi_m)|} \quad (32)$$

其中 $J(r_m, \beta_m, \phi_m)$ 为雅可比转换式,有

$$J(r_m, \beta_m, \phi_m) = \left| \frac{\partial r_m}{\partial \tau} \right|^{-1} = \frac{2(D\cos\beta_m\cos\phi_m - c\tau + H\sin\beta_m)^2}{c(D_{\text{Los}}^2 - c^2\tau^2 - 2c\tau(D\cos\beta_m\cos\phi_m + H\sin\beta_m))} \quad (33)$$

将式(31,33)代入式(32)中,得到 AOA/TOA 的联合密度函数

$$p(\tau, \beta_m, \phi_m) = \frac{(c^2\tau^2 + D_{\text{Los}}^2 - 2c\tau(D\cos\beta_m\cos\phi_m + H\sin\beta_m))}{8V(D\cos\beta_m\cos\phi_m - c\tau + H\sin\beta_m)^4} \times [c(D_{\text{Los}}^2 - c^2\tau^2)^2 \cos\beta_m] \quad (34)$$

对式(30)分别进行 β_m 或 ϕ_m 积分计算可以得到移动台 MS 在水平面内或者垂直面内的时延特性 TOA 联合分布函数

$$p(\tau, \phi_m) = \int_0^{\pi/2} p(\tau, \beta_m, \phi_m) d\beta_m \quad (35)$$

$$p(\tau, \beta_m) = \int_0^{2\pi} p(\tau, \beta_m, \phi_m) d\phi_m \quad (36)$$

4 仿真结果与分析

本节将通过数值计算和仿真,给出由于 3-D 模型中存在散射体空心区域对信号到达角度和到达时间等参数的影响。假设移动台接收器是处于微小区移动通信环境中,给出定量的微小区模型参数,基站 BS 和移动台 MS 之间水平距离为 $D=500$ m, 基站 BS 离地面的垂直高度为 $H=100$ m, 散射体空间半球体的半径为 $R=100$ m。

在图 4 中显示了参数 r/R 对水平面内边缘密度函数的影响。从图中可以发现,波达信号 AOA 概率分布呈现左右对称的特征。当 $r/R=0$ 时,此时本文模型转化为 Janaswamy 模型^[7]。而当 $r/R \neq 0$ 时,本文模型与 Janaswamy 均匀分布模型比较,由于散射体空间球体存在空心部分,导致 ϕ_b 在 $-\phi'_m \leq \phi_b \leq \phi'_m$ 范围内的概率密度变化非常小,基本接近于一条水平直线。随着参数 r/R 逐渐变大,波达信号

AOA 概率密度值越来越小。这是因为空心球体包含散射体数量越来越少,信号的反射概率也随之变小。另外由图 4 可以看出,在 $\phi_b = 0^\circ$ 处,概率密度存在最大值,而在 $|\phi_b| = \phi_m$, 其概率密度为零值,与文献[7]的结果是一致的。

图 5 是在 3-D 半球体模型下,参数 r/R 对垂直面内边缘密度函数的影响。与水平面内波达信号 AOA 概率分布相比较,垂直面内的边缘密度函数呈现非对称分布。从图 5 中可以发现,当垂直面角在小角度区域时,其 AOA 概率增大,而随着垂直面角的不断增大,其概率值在达到峰值后迅速地下降。另外随着 r/R 越来越大,也就是说当散射体空心区域的范围逐渐变大时,垂直面内的边缘密度函数值是在逐渐降低的,这符合信道的统计特征。

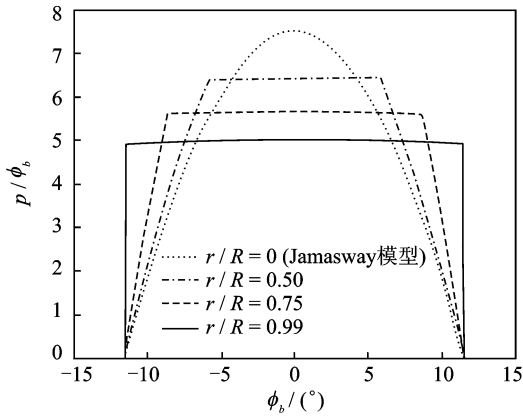


图 4 参数 r/R 对水平面内边缘密度函数的影响 ($D = 500 \text{ m}, H = 100 \text{ m}, R = 100 \text{ m}$)

Fig. 4 Edge density function in correspondence with different r/R in horizontal plane

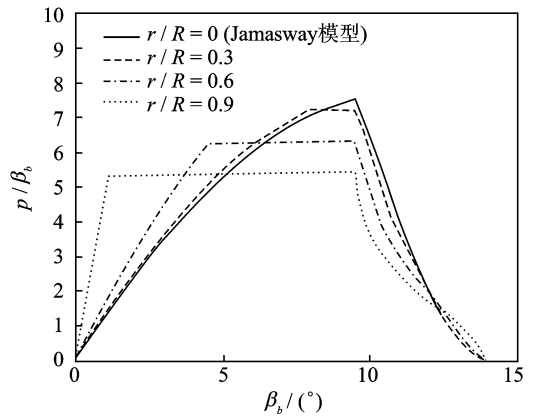


图 5 参数 r/R 对垂直面内边缘密度函数的影响 ($D = 500 \text{ m}, H = 100 \text{ m}, R = 100 \text{ m}$)

Fig. 5 Edge density function in correspondence with different r/R in vertical plane

如图 6 所示在散射体均匀分布下,MS 端水平平面的时延特性 TOA 联合概率密度。从图中可以发现,在最小时延 τ_{\min} 和水平面角 $\phi_m = 0^\circ$ 的区域,MS 端的 TOA 概率密度分布最大。在本模型与 Ertel 圆模型[1]空间参数选择一致时,当 $r=0$ 时,此时散射体空间内部不存在空心区域,并且假设 $H \rightarrow 0$ 和半球

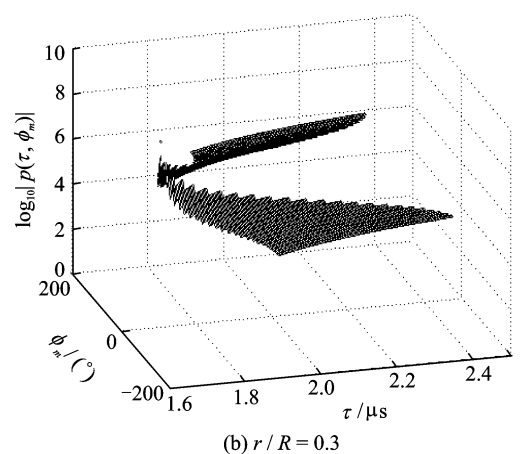
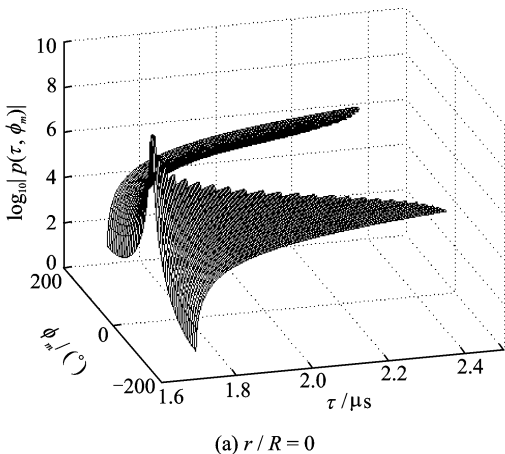


图 6 MS 端水平面内的 TOA 联合概率密度分布 ($D = 500 \text{ m}, H = 100 \text{ m}, R = 100 \text{ m}$)

Fig. 6 TOA joint probability density distribution in horizontal plane at MS

体的短轴 $R_{\text{minor}} \rightarrow 0$, 本模型就转化为圆模型, 两者的分析结果趋于一致。当 $r/R = 0.3$ 时, 即使移动台 MS 附近没有了散射体, 但是 TOA 联合概率密度峰值还是在 $(\tau_p, \pm \phi_{m_p})$ 点达到峰值, 其中 $\tau_p = \tau_{\text{min}}^+$ 和 $\phi_m = 0^+$ 。可以推测, 当 $r/R > 0.9$ 时, TOA 概率密度分布将集中在很小的一块区域里。

如图 7 揭示了在散射体均匀分布下, r/R 对 MS 端垂直平面的时延特性 TOA 联合概率密度的影响。移动台 MS 接收信号基本上在垂直角小角度区域 ($\beta_m = 0^+$) 和最小时延处, 而在大角度 ($\phi_m = 90^-$) 和最大时延处其概率密度分布较小。本模型与 Janaswamy 均匀散射体分布模型^[7] 相比较可以发现, 本文分析和推导出了 TOA 概率密度函数的表达式, 更加拓展了 3-D 模型的研究。而与 Nawaz^[9] 均匀 3-D 模型比较, 本模型更能准确灵活地描述 MS 端没有散射体的移动通信环境下的传播特性。

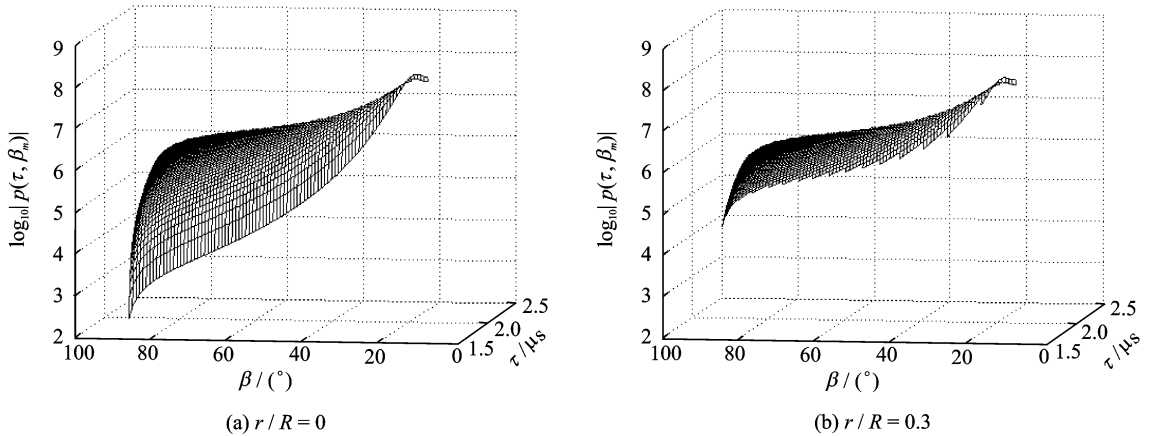


图 7 MS 端垂直面内的 TOA 联合概率密度分布 ($D = 500 \text{ m}, H = 100 \text{ m}, R = 100 \text{ m}$)

Fig. 7 TOA joint probability density distribution in vertical plane at MS

5 结束语

针对室外微小区移动环境的空间衰落信道, 本文研究的是 3-D 空心半球体统计信道模型。在散射体服从均匀分布的情况下, 推导出波达信号 AOA 和 TOA 概率密度函数, 揭示了此模型下 BS 以及 MS 端在水平面以及竖直平面上的各信道参数变化特征。最后仿真分析结果与 2-D 和 3-D 模型对比, 在某种程度上是对这些信道模型的补充, 拓展了 3-D 空间统计信道模型的研究。

参考文献:

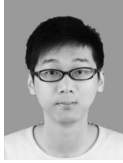
- [1] Ertel R B, Reed J H. Angle and time of arrival statistics for circular and elliptical scattering model[J]. IEEE J Sel Areas Commun, 1999, 17(11):1829-1840.
- [2] Petrus P, Reed J H. Geometrical-based statistical macrocell channel model for mobile environment[J]. IEEE Trans Commun, 2002, 50(3):495-502.
- [3] Mahmoud S S, Al-Qahtani F S, Hussain Z M, et al. Spatial and temporal statistics for the geometrical-based hyperbolic macrocell channel model[J]. Dig Signal Process, 2008, 18(2):151-167.
- [4] Jaafar I, Boujemaa H, Siala M. Angle and time of arrival statistics for hollow-disc and elliptical scattering models[C]//Proc 2nd Int Conf Signals, Circuits Syst. Monastir: [s. n.], 2008:1-4.
- [5] Qu S, Yeap T. A three-dimensional scattering model for fading channels in landmobile environment[J]. IEEE Trans Veh Technol, 1999, 48(3):765-781.
- [6] Baltzis K B, Sahalos J N. A simple 3-D geometric channel model for macrocell mobile communication[J]. Wireless Pers Commun, 2009, 51(2):329-347.

- [7] Janaswamy R. Angle of arrival statistics for a 3-D spheroid model[J]. *IEEE Trans Veh Technol*, 2002, 51(5):1242-1247.
- [8] Olenko A Y, Wong K T, Qasmi S A, et al. Analytically derived uplink/downlink TOA and 2-D DOA distributions with scatterers in a 3-D hemispheroid surrounding the mobile[J]. *IEEE Trans Antenna Propag*, 2006, 54(9):2446-2454.
- [9] Nawaz S J, Qureshi B H, Khan N M. A generalized 3-d scattering model for macrocell environment with directional antenna at bs[J]. *IEEE Trans on Veh Technol*, 2010(99):1-1.
- [10] Alsehaili M, Sebak A, Noghalian S. A 3D geometrically based ellipsoidal wireless channel model[C]//*Proc 12th Int Symp Antenna Technol Appl Electromagn. USA*:[s. n.], 2006:407-410.
- [11] Janaswamy R. Angle and time of arrival statistics for the Gaussian scatter density model[J]. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2002, 1(3):488-497.
- [12] Le K N. On angle-of-arrival and time-of-arrival statistics of geometric scattering channels[J]. *IEEE Trans Veh Technol*, 2009, 58(8):4257-4264.
- [13] Zhou J, Qiu L. Analyses and comparisons of geometrical-based channel model arisen from scatterers on a hollow-disc for outdoor and indoor wireless environments[J]. *Communications IET*, 2012, 6(17):2775-2786.
- [14] Alsehaili M, Sebak A, Noghalian S. A 3D geometrically based ellipsoidal wireless channel model[C]//*Proc 12th Int Symp Antenna Technol Appl Electromagn. USA*:[s. n.], 2006:407-410.
- [15] Petrus P, Reed J H, Rappaport T S. Geometrical-based statistical macrocell channel model for mobile environments[J]. *IEEE Trans Commun*, 2002, 50(3):495-202.
- [16] Blaunstein N, Toeltsch M, Christodoulou C G, et al. Azimuth elevation and time-delay distributions in wireless communication channels[J]. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2006, 48(1):160-167.

作者简介:



周杰 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 移动通信理论、无线传感网和无线接入网等。



曹志刚 (1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 移动通信理论和多天线 MIMO 信道建模等, E-mail: 461834138@qq.com。



邵根富 (1962-), 男, 教授级高工, 博士生导师, 研究方向: 通信理论、信号检测技术与自动化装置等。

