一种改进的椭圆散射空-时无线信道模型

罗 飞, 杜明辉
(华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510640)

摘 要: 空-时无线信道模型的建立是研究无线信道空-时特性的关键, 然而广泛使用的基于散射体分布的单反射椭圆模型(GBSBEM)在描述TOA(Time-Of-Arrival)分布方面存在局限性. 本文在GBSBEM的基础上引入了"有效散射体"和"反射概率"两个有明确物理意义的概念, 给出一种改进的椭圆散射空-时无线信道模型, 并推导TOA和AOA(Azimuth-Of-Arrival)的联合分布和各自的边缘分布表达式. 分析表明该模型不仅能有效克服GBSBEM的局限性, 并且具有适用范围广泛的特点.

关键词: 无线传播; 空-时信道模型; 单反射椭圆模型; 到达时间; 到达角度
中图分类号: TN011 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2006) 12-2200-04

An Enhanced Elliptical Scattering Model for Space-Time Wireless Channels

LUO Fei, DU Ming-hui
(*School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China*)

Abstract: Spatial-temporal modeling of radio channels is the key for space-time wireless channel study. The widely used geometrically based single bounce elliptical model (GBSBEM) has the limitations in the description of Time-Of-Arrival (TOA). By introducing two physical concepts of effective scatterer and reflecting probability to GBSBEM, an enhanced elliptical scattering model is presented, while the probability density functions of TOA and Angle-Of-Arrival (AOA) are also derived. The detailed analysis proves that the enhanced model not only overcomes the limitations of GBSBEM, but also has an advantage of broad application extent.

Key words: radio propagation; space-time channel model; geometrically based single bounce elliptical model; time-of-arrival; azimuth-of-arrival

1 引言

近年来, 多天线技术在无线通信中的应用受到了越来越多的重视. 多天线技术可以大幅度的提高频谱利用率的原理在于利用了信号在不同空间和时间上的不同传播特性. 因此, 各种环境下无线信道空-时特性的研究对发展多天线技术有至关重要的作用. 空-时信道模型的建立更是开展上述工作的关键.

为更好的描述无线信道的特性, 大量信道模型被相继提出[1]. 现在最广泛使用的是基于(散射体)几何分布的单反射模型, 该类模型假设发射和接收天线之间非直达路径的电波传播以在散射体上的单次反射为主. 单反射模型主要包括单反射椭圆模型(GBSBEM)[2,3]和单反射圆模型[3], 以及在其基础上不少有效的派生模型[4,5]. GBSBEM作为一种典型的空-时信道模型给出了空-时信道到达时间(TOA)分布, 到达角度(AOA)分布等重要参数. 然而从本文附录的分析中可以看到GBSBEM的TOA分布概率密度函数在$f_r(r)$归一化传播时延$r=\sqrt{3/2}$处始终存在极小值, 导致了无论其他参数如何变化, $f_r(r)$始终有一个固定且极窄的减区间$(1, \sqrt{3/2}]$和一个较宽的增区间$[\sqrt{3/2}, r_m]$. 这种函数特性决定了GBSBEM不适合描述典型的最大归一化传播时延$r_m>\sqrt{3/2}$且近似指数衰减曲线的TOA分布[6,7].

为此, 本文在GBSBEM的基础上引入了"有效散射体"和"反射概率"两个有明确物理意义的概念, 给出一种改进的椭圆散射空-时无线信道模型, 并推导出TOA和AOA的联合分布和各自的边缘分布表达式. 进一步的分析和讨论表明了该模型在完全兼容GBSBEM的基础上有效克服了后者的局限性, 并且可以通过选择相应的参数, 使该模型广泛适用于各种典型的无线通信环境.

2 模型的建立

2.1 模型概述

假设发射台和接收机之间的距离为d_0, 并假设所有散射

收稿日期: 2005-12-04; 修回日期: 2006-07-07

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

体与发射台和接收机在同一平面上, 为方便起见, 以水平面表示. 如果发射台和接收机存在直达路径, 则最小绝对时延 $\tau_0 = d_0/c$ (c 为光速). 在单反射假设下, 具有相同传播时延 τ 的传播路径所对应的散射体分布在一个以发射台和接收机为焦点的椭圆上[2], 如图 1 所示. 该椭圆的参数方程为: $x = a\cos\theta$, $y = b\sin\theta$, 式中 $a = c\tau/2$, , $b = \sqrt{a^2 - f^2}$ 焦距 $f = d_0/2$. 为方便起见, 采用归一化传播时延 $r = c\tau/d_0 = \tau/\tau_0$, $1 < r < r_m$, 其中 $r_m = \tau_m/\tau_0$ 为归一化最大传播时延. 则椭圆参数可以表示为:

$$a = r/2,\ b = \sqrt{r^2 - 1}/2,\quad f = 1/2.$$

文献[2]给出 GBSBEM 的重要假设是: 散射体在整个散射区域内均匀分布, 且每个散射体产生一条反射路径. 本模型同样假设散射体在整个散射区域内均匀分布, 但对反射路径产生条件的认识是: 一条反射路径的产生当且仅当物理上存在一个散射体且该散射体的入射波和反射波不被其他散射体阻挡, 入射波和反射波不被阻挡的散射体称为有效散射体, 一个有效散射体产生一条反射路径. 这个假设带来的直观结论是, 远距离的散射体更容易被近距离的散射体阻挡而无法成为有效散射体.

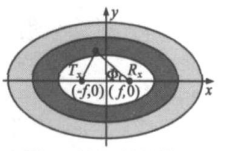


图 1　椭圆散射模型示意图

定义同一归一化传播时延 r 对应的有效散射体与散射体数量之比的期望为反射概率 $R(r)$, 其物理意义是分布在归一化传播时延 r 对应的椭圆上的散射体不被其他散射体阻挡而可以成为有效散射体的概率. 因为散射体在散射区域内均匀分布, 区间内的散射体密度是相等的, 所以单位绝对时延增量对应的散射体对反射概率的衰减相等, 记为 D, ($D > 1$). 令 $D = e^{\lambda}$, $\lambda > 0$, 则归一化传播时延 r 对应的反射概率可以表示为:

$$R(r) = (1/D)^{\tau - \tau_1} = e^{-\lambda\tau_0(r - r_1)} = e^{-L(r - r_1)},\ r_1 \leqslant r \leqslant r_m,\ L > 0 \tag{1}$$

式中 $r_1 = \tau_1/\tau_0$ 为第一条反射路径的归一化传播时延, 系数 $L = \lambda\tau_0$ 正比于绝对时延增量等于 τ_0 时对应的散射体对反射概率衰减的 dB 值.

2.2　TOA 分布概率密度函数

散射区域内满足归一化传播时延小于 r_i 有效散射体数量为:

$$N(r_i) = \rho\int_{r_1}^{r_i}\int_{-\pi}^{\pi} R(r)\cdot J d\theta dr = \rho\int_{r_1}^{r_i} R(r)\frac{\pi(2r^2 - 1)}{4\sqrt{r^2 - 1}}dr \tag{2}$$

式中常量 ρ 为散射体分布密度, J 为雅可比式,

$$J = \left|\frac{\partial(x, y)}{\partial(r, \theta)}\right| = \frac{\sqrt{r^2 - 1}\cos^2\theta}{4} + \frac{r^2\sin^2\theta}{4\sqrt{r^2 - 1}} \tag{3}$$

所以时延 r_i 对应的累积概率分布函数为:

$$F_r(r_i) = N(r_i)/N(r_m) = N(r_i)/N_m \tag{4}$$

式中 $N_m = N(r_m)$ 是整个散射区域内有效散射体总数. 对 $F_r(r_i)$ 求导可得时延 r_i 的概率密度函数表达式:

$$f_r(r_i) = F'_r(r_i) = \frac{\pi\cdot e^{-L(r_i - r_1)}(2r_i^2 - 1)}{4A_m\sqrt{r_i^2 - 1}} \tag{5}$$

式中系数:

$$A_m = N_m/\rho = \int_{r_1}^{r_m} R(r)\frac{\pi(2r^2 - 1)}{4\sqrt{r^2 - 1}}dr \tag{6}$$

2.3　AOA 和 TOA 联合分布概率密度函数

散射区域 $r \in [r_i, r_i + \Delta r]$, $\theta \in (-\pi, \theta]$ 内的有效散射体数量为:

$$n = \rho\int_{r_i}^{r_i + \Delta r}\int_{-\pi}^{\theta} R(r)\cdot J d\theta dr \tag{7}$$

同理, 散射区域 $r \in [r_i, r_i + \Delta r]$, $\theta \in (-\pi, \pi]$ 上的有效散射体总数量为:

$$n_0 = \rho\int_{r_i}^{r_i + \Delta r}\int_{-\pi}^{\pi} R(r)\cdot J d\theta dr \tag{8}$$

在条件 $r \in [r_i, r_i + \Delta r]$ 下椭圆参数方程角度参数 θ 的累积概率分布函数可以写作:

$$F_{\theta|r}(\theta | r_i \leqslant r \leqslant r_i + \Delta r) = n/n_0 \tag{9}$$

因为到达角度 ϕ 与椭圆方程角度参数 θ 的关系为:

$$\theta = \arctan\left[\frac{\sqrt{r^2 - 1}\sin\phi}{r\cos\phi - 1}\right] \tag{10}$$

所以在条件 $r \in [r_i, r_i + \Delta r]$ 下到达角度 ϕ 的条件概率密度函数可以写作:

$$f_{\phi|r}(\phi | r_i \leqslant r \leqslant r_i + \Delta r) = \frac{dF_{\theta|r}(\theta | r_i \leqslant r \leqslant r_i + \Delta r)}{d\theta}\frac{d\theta}{d\phi} \tag{11}$$

上式中令 $\Delta r \to 0$ 可得在条件 $r = r_i$ 下到达角度 ϕ 的概率密度函数:

$$\begin{aligned} f_{\phi|r_i}(\phi | r_i) &= \lim_{\Delta r \to 0} f_{\phi|r}(\phi | r_i \leqslant r \leqslant r_i + \Delta r) \\ &= \frac{(r_i^2 - 1)^{3/2}(1 + r_i^2 - 2r_i\cos\phi)}{\pi(2r_i^2 - 1)(r_i - \cos\phi)^3} \end{aligned} \tag{12}$$

合并式(5)和(12), 可得到达角度 ϕ 和到达时延 r 的联合概率密度函数:

$$\begin{aligned} f_{\phi, r}(\phi, r) &= f_{\phi|r}(\phi | r)\cdot f_r(r) \\ &= \frac{e^{-L(r - r_1)}(r^2 - 1)(r^2 - 2r\cos\phi + 1)}{4A_m(r - \cos\phi)^3} \end{aligned} \tag{13}$$

2.4　AOA 分布概率密度函数

式(13)对自变量 r 在 $r_1 \leqslant r \leqslant r_m$ 上积分, 可得到达角度 ϕ 的边缘概率密度函数:

$$\begin{aligned} f_\phi(\phi) &= \int_{r_i}^{r_m}\frac{e^{-L(r - r_1)}(r^2 - 1)(r^2 - 2r\cos\phi + 1)}{4A_m(r - \cos\phi)^3}dr \\ &= G(r_m) - G(r_1) \end{aligned} \tag{14}$$

式中 $G(x)$ 的表达式见式(15). 值得指出的是, 当 $L \to 0$ 且 $r_1 = 1$ 时, $f_\phi(\phi)$ 与 GBSBEM 的 AOA 分布概率密度函数有相同的数学表达式.

$$\begin{aligned} G(x) = \frac{1}{16A_m}\Big(e^L\Big\{&-2e^{L(\cos\phi - r_1)}L\mathrm{Ei}(L(\cos\phi - x))\sin^2\phi(4\cos\phi \\ &+ L\sin^2\phi) + e^{-L(x - r_1)} \\ &\cdot\left[-\frac{4x}{L} - \frac{4(1 + L\cos\phi)}{L^2} + \frac{2\sin^4\phi}{(x - \cos\phi)^2} - \frac{2\sin^2\phi(4\cos\phi + L\sin^2\phi)}{x - \cos\phi}\right]\Big\}\Big) \end{aligned} \tag{15}$$

上式中指数积分函数: $\mathrm{Ei}(x) = -\int_{-x}^{\infty}\frac{e^{-t}}{t}dt$.

3　TOA 分布概率密度函数分析

式(5)给出了 TOA 分布概率密度函数, 对其求导得:

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$f'_r(r)=\frac{\pi\cdot e^{-L(r-r_1)}(2Lr^4-2r^3-3Lr^2+3r+L)}{4A_m(r^2-1)^{3/2}} \quad (16)$$

为求 $f_r(r)$ 的极值点, 在满足 $r>\min(r_1)=1$ 且 $L>0$ 的条件下, 令 $f'_r(r)=0$ 得:

$$\begin{cases}2Lr^4-2r^3-3Lr^2+3r+L=0\\ r>1,\ L>0\end{cases} \quad (17)$$

求解式(17)可得 r 的两个根:

$$\begin{cases}\zeta_1=k_1-k_2\\ \zeta_2=k_1+k_2\end{cases} \quad (18)$$

式中 k_1, k_2 的表达式见式(19a)和(19b).

$$k_1=\frac{1}{4L}+\frac{1}{12}\sqrt{36+\frac{9}{L^2}+\frac{6\times 3^{2/3}(6+11L^2)}{L\alpha}+\frac{6\times 3^{1/3}\alpha}{L}} \quad (19a)$$

$$k_2=\frac{1}{2}\sqrt{2+\frac{1}{2L^2}-\frac{6+11L^2}{2\times 3^{1/3}L\alpha}-\frac{\alpha}{2\times 3^{2/3}L}+\frac{3\left(\frac{1}{L^3}-\frac{6}{L}\right)}{2\sqrt{36+\frac{9}{L^2}+\frac{6\times 3^{2/3}(6+11L^2)}{L\alpha}+\frac{6\times 3^{1/3}\alpha}{L}}}} \quad (19b)$$

上式中:

$$\alpha=(72L+63L^3+\sqrt{6}\sqrt{-4L^6+423L^4+270L^2-108})^{1/3}.$$

由式(18)和(19)可以看出, ζ_1 和 ζ_2 是参量 L 的函数. 通过数值方法可近似求得当 $L\in(0, 0.527886)$ 时, ζ_1 和 ζ_2 为实根, 且二阶导数 $f_r^{(2)}(\zeta_1)>0$, $f_r^{(2)}(\zeta_2)<0$, 即在 ζ_1 和 ζ_2 处 $f_r(r)$ 分别为极小值和极大值. 以 L 为自变量在区间(0, 0.527886)上作出 ζ_1、ζ_2 的曲线如图 2 所示. $L\in(0, 0.527886)$ 时 ζ_1 和 ζ_2 分别是 L 的增函数和减函数, 且 ζ_1 和 ζ_2 在区间的左右端点处有极限值:

$$\lim_{L\to 0.527886}\zeta_1=\lim_{L\to 0.527886}\zeta_2=1.61268 \quad (20a)$$

$$\lim_{L\to 0}\zeta_1=\sqrt{3/2},\ \lim_{L\to 0}\zeta_2\to+\infty \quad (20b)$$

假设 r_1 足够小($r_1=1$), r_m 足够大, 分区间讨论参数 L 对函数 $f_r(r)$ 的影响.

(a) $L\in(0, 0.527886)$ 且 L 较大: 此时 ζ_1 和 ζ_2 都为较小的实根, 在曲线上可以看到极小值 $f_r(\zeta_1)$ 和极大值 $f_r(\zeta_2)$. 其曲线大致形状如图 3(a)所示.

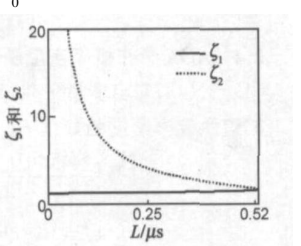


图 2 实根 ζ_1 和 ζ_2 随参数 L 变化曲线

(b) $L\in(0, 0.527886)$ 且 L 较小: L 较小时, ζ_2 随 L 的减小几乎成指数增大, 当满足 $\zeta_2>r_m$ 时, 曲线上无法看到极大值 $f_r(\zeta_2)$. 其曲线大致形状如图 3(b)所示. 值得指出的是, 当 $L\to 0$ 且 $r_1=1$ 时, $f_r(r)$ 与 GBSBEM 的 TOA 分布概率密度函数有相同的数学表达式.

(c) $L\geqslant 0.527886$: 因为 $L\notin(0, 0.527886)$, ζ_1 和 ζ_2 为非实根, 故函数无极值点, $f_r(r)$ 为单调减函数. 其曲线大致形状如图 3(c)所示.

因为 $L=\lambda\tau_0$, 所以函数 $f_r(r)$ 的曲线形式是由参数 λ 和 τ_0 共同决定的. 参数 λ 是无线环境对反射概率的衰减指数, 其大小取决于具体的蜂窝环境内散射体的分布密度, 从郊区、城市到室内, 参数 λ 依次增大. 参数 τ_0 是直达路径的绝对时延, 其大小取决于发射机和接收机之间的直线距离, 也就是具体的蜂窝规模, 从微微小区、微小区到宏小区, 参数 τ_0 依次增大. 表 1 中给出了不同 λ 和 τ_0 取值所对应的不同蜂窝环境和蜂窝规模的组合. 由此可以看出, 参数 λ 和 τ_0 分别为本模型在描述蜂窝环境和蜂窝规模方面提供了自由度. 通过选择合适的 λ 和 τ_0 参数, 模型可以适用于各种常见的空-时无线信道. 从这层意义上可以认为: 对应于 $L=\lambda\tau_0\to 0$ 的 GBSBEM 只是本模型在特定情况下的一个子集, 其 TOA 分布概率密度函数更适合描述 $\lambda\to 0$ 且较小的理想平坦郊区环境下的微蜂窝.

表 1 不同蜂窝环境和规模组合的 λ, τ_0 参数取值及对应的典型 TOA 分布大致曲线

	郊区(λ 较小)	城市(λ 较大)	室内(λ 极大)
宏小区(τ_0 较大)	图 3(a)	图 3(c)[6]	少见
微小区(τ_0 较小)	图 3(b)	图 3(a)[7~9]	少见
微微小区(τ_0 极小)	少见	少见	图 3(a)[10,11]

另外, 函数 $f_r(r)$ 的自变量取值范围为 $[r_1, r_m]$, 且在具体传播环境下 r_1 足够小($r_1=1$), r_m 足够大的条件一般是无法满足的. 因此实际应用中 $f_r(r)$ 函数曲线大致形状只是图 3 各图中对应 $[r_1, r_m]$ 的一部分.

4 结束语

本文分析了 GBSBEM 的 TOA 分布概率密度函数的局限性(见附录), 并在 GBSBEM 基础上给出了一种改进的椭圆散射空-时无线信道模型, 推导出 TOA 和 AOA 的联合分布和各自的边缘分布表达式. 与 GBSBEM 相比, 本模型有以下几个特点:

(a) 模型具有描述蜂窝环境方面的自由度. 选择相应的表征散射体对反射概率衰减大小的系数 λ, 可使模型适用于城市、郊区和室内等通信环境.

(b) 模型具有描述蜂窝规模方面的自由度. 选择相应的参数 τ_0, 可使模型适用于宏小区、微小区和微微小区等各种规模的蜂窝.

(c) 对各种无线信道下的传播有更加直观合理的物理解释. 分析表明 GBSBEM 只是本模型在描述理想平坦郊区环境下微蜂窝的特定子集, 本模型向下兼容 GBSBEM 的结论, 并有效克服了后者的局限性.

附录:

GBSBEM 的 TOA 分布概率密度函数的分析

文献[2]中推导出 GBSBEM 的 TOA 分布概率密度函数为:

$$f_r(r)=\frac{2r^2-1}{\beta\sqrt{r^2-1}},\ 1<r\leqslant r_m \quad (21)$$

其中归一化传播时延 $r=c\tau/d_0=\tau/\tau_0$, $\beta=r_m\sqrt{r_m^2-1}>0$, 最大归一化传播时延 $r_m=\tau_m/\tau_0$.

显然 $f_r(r)$ 在区间 $(1, r_m]$ 上是连续函数, 式(21)对自变量 r 求导得:

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$f'_r(r)=\frac{4r}{\beta\sqrt{r^2-1}}-\frac{r(2r^2-1)}{\beta(r^2-1)^{3/2}},\ 1<r\leqslant r_m \tag{22}$$

令 $f'_r(r)=0$, 可得 $r=0,\ \pm\sqrt{3/2}$, 所以在 $1<r\leqslant r_m$ 区间内 $r=\sqrt{3/2}$ 处, $f_r(r)$ 存在一个极值点, 且易知当 $r\in(1,\sqrt{3/2})$ 时, $f'_r(r)<0$, 函数单调递减; 当 $r\in(\sqrt{3/2}, r_m)$ 时, $f'_r(r)>0$, 函数单调递增. 又:

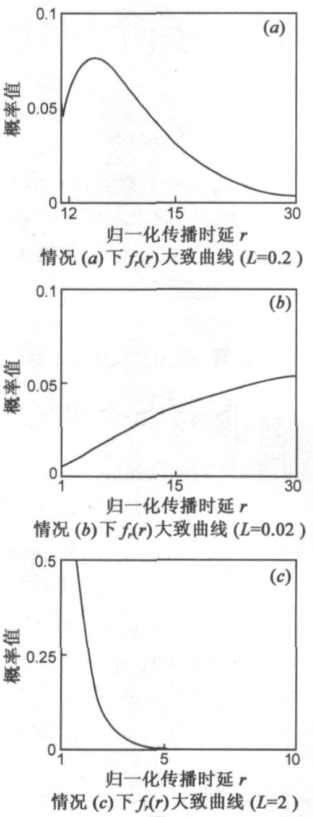
$$f_r^{(2)}(r)=\frac{3}{\beta(r^2-1)^{5/2}} \tag{23}$$

在 $1<r\leqslant r_m$ 区间上存在, 且:

$$f_r^{(2)}(\sqrt{3/2})=\frac{12\sqrt{2}}{\beta}>0 \tag{24}$$

故 $r=\sqrt{3/2}$ 处 $f_r(r)$ 有极小值.

以上分析表明, 无论参数 β 如何变化, $f_r(r)$ 始终有一个固定且极窄的减区间 $(1,\sqrt{3/2}]$ 和一个较宽的增区间 $[\sqrt{3/2}, r_m]$. 图 4 是 $r_m=5$ 时 $f_r(r)$ 的函数曲线. 这种函数特性决定了 GBSBEM 不适合描述大多数典型环境下的最大归一化传播时延 $r_m>\sqrt{3/2}$ 且近似指数衰减曲线的 TOA 分布[6, 7].



情况 (a) 下 $f_r(r)$ 大致曲线 (L=0.2)

情况 (b) 下 $f_r(r)$ 大致曲线 (L=0.02)

情况 (c) 下 $f_r(r)$ 大致曲线 (L=2)

图 3

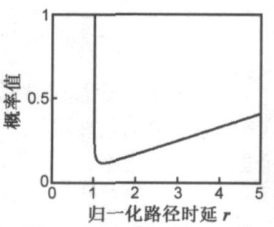


图 4　GBSBEM 的 $f_r(r)$ 曲线 (r_m=5)

参考文献:

[1] Ertel R B, Cardieri P, et al. Overview of spatial channel models for antenna array communication systems[J]. IEEE Personal Communications, 1998, 5(1): 10- 22.

[2] Liberti J C, Rappaport T S. A geometrically based model for line-of-sight multipath radio channels[A]. IEEE 46th Vehicular Technology Conference[C]. Atlanta: IEEE, 1996. 844- 848.

[3] 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.

[4] Zhai Mingyue, Li Hua. New space-time wireless channel model and its computer simulation method[A]. IEEE 60th Vehicular Technology Conference[C]. Los Angeles: IEEE, 2004. 1- 5.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Weiju chang, Tarng J H. A novel TOA estimation method of broadband signal propagation in outdoor environment[A]. IEEE 59th Vehicular Technology Conference[C]. Milan: IEEE, 2004. 280- 283.

[8] Olenko A Y, Wong K T, Abdulla M. Analytically derived TOA-DOA distributions of uplink/downlink wireless cellular multipaths arisen from scatterers with an inverted- parabolic spatial distribution around the mobile[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(7): 516- 519.

[9] Jiang L, Tan S Y. Geometrical- based propagation model for mobile communication systems[A]. ICMMT 4th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology[C]. Beijing: IEEE Press, 2004. 834- 837.

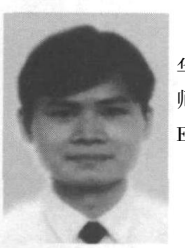
[10] Saleh A, Valenzuela R. A statistical model for indoor multipath propagation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1987, 5(2): 128- 137.

[11] Ganesh R, Pahlavan K. Statistical modelling and computer simulation of indoor radio channel[J]. IEE Proceedings I: Communications, Speech and Vision, 1991, 138(3): 153- 161.

作者简介:

罗　飞　男, 1979 年出生于湖南省郴州市, 华南理工大学博士研究生. 主要研究方向为无线信道建模和移动通信技术.

E-mail: eefluo@163.com



杜明辉　男, 1964 年出生于广东省韶关市, 华南理工大学电子与信息学院教授, 博士生导师. 主要研究方向为信号处理和无线网络.

E-mail: ecmhdu@scut.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net