



距离无关的室内路径损耗模型的建立

杨如民,代琪怡,余成波

(重庆理工大学远程测试与控制技术研究所 重庆 400054)

摘要:针对传统室内路径损耗依赖于距离以及其信道参数在 LOS(视距)和 NLOS(非视距)下的不确定性问题,提出了一种室内的纯统计路径损耗模型。该模型以距离作为随机变量,并引入室内路径切换频度表示 LOS 和 NLOS 的信道条件,从而消除路径损耗对距离的依赖以及信道参数的不确定性。通过该模型,在毋需知道路径长度的情况下,根据操作空间的半径和室内路径切换频度以及路径损耗的置信度估算出路径损耗,同时该模型也提出了 3 种服务质量(QoS)以满足不同的客户需求,与总是以最大功率发送信号的传统模型相比大大优化了资源配置。经实例验证表明,此模型应用方便,是一种简单且实用的模型。

关键词:路径损耗;室内;统计量;统计路径损耗模型;服务质量

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.04.019

Pathloss Model of Distance Independent for Indoor Area

Yang Rumin, Dai Qiyi, Yu Chengbo

(Remote Test and Control Institute, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: A pure statistical indoor path-loss model was proposed with an eye to address the problems of distance dependence and of line-of-sight(LOS) or non-LOS uncertainty, which lie in most conventional path-loss models. In the model, the path length (distance) was taken as a random variable, and the uncertainty of LOS or NLOS was represented by an alternating frequency between LOS and non-LOS channel conditions. Without knowing the priori path length, the model can estimate or predict the loss of path based on the priori knowledge of the radius of operating space, of the LOS/NLOS alternating frequency and of a confidence interval describing the path quality. In addition, three quality of services (QoS) for different quality requirements were proposed in order to conserve energy. As opposed to assuming fixed available power or covering the largest possible distance, which is typical in conventional models, the QoS-oriented model has significant advantages on resource allocation and energy conservation. Through a case study, it is indicated that this model is simple and practical.

Key words: pathloss, indoor, statistics, statistical of path-loss, quality of service

1 引言

路径损耗是通信系统设计和评价中一个至关重要的参变量,是分析通信功率、链路预算以及跟踪定位的基础。随着认知无线电的出现,无线终端愈加智能化,常常需要通过感知、测量来学习、推理和判断自身所处的环境并依

此做出决定,参与通信的两个终端之间的路径损耗,有可能作为一个质量指标,被第三方的认知无线电用户所遵守,以此达到可靠的通信、最大的信道利用率以及最大限度节约能耗的目的^[1]。因此单一的路径损耗模型无法满足现实应用的复杂要求。

目前国内外已经提出了多种模型来估算路径损耗,如



经典对数模型、奥村模型(OM)、人体传感器模型以及双斜率模型等,其中经典对数模型将路径损耗看作距离和阴影^[2]的函数,在统计意义上存在明显缺陷:

- 它依赖于距离,即它要通过测量发射机和接收机(T-R)之间的距离计算路径损耗;
- 在短、超短距离通信系统(譬如无线个域网(WPAN))中,网络所处的操作空间复杂多样,信道传输条件在视距(LOS)和非视距(NLOS)之间频繁切换,信道参数呈现非常大的不确定性;
- 为了保证通信的可靠性,通常发射终端在已知通信距离(路径长度)后,以此距离为覆盖范围,按照最差的信道条件(譬如 NLOS)选择最大的发射功率来传送信号,不利于节能和延长电池的寿命。

OM 是由日本奥村等人在日本东京根据不同的频率、不同的天线高度选择不同的距离做一系列的测试后所产生的一种经验模型,但由于地理环境复杂,该模型给出了大量的修正因子,因此对于小范围操作空间(如 WPAN)存在较大的误差;人体传感器模型和双斜率模型等众多模型虽然都适用于短距离(如 WPAN)的传输环境,但其仍然依赖距离。

因此,本文提出的与距离无关的纯统计路径损耗模型在该方面较大的优势,由于该模型取决于房屋尺寸及室内路径切换频度,从而消除了对距离的依赖以及 LOS-NLOS 不确定性的影响,同时该模型针对不同的用户要求提出 3 种服务质量(QoS),在不重要的场合选择低质量通信以达到保养硬件的目的。

2 WPAN 操作空间距离的随机性

2.1 T-R 距离的随机性

WPAN 中的一些设备,虽然一个接入点是固定的,但与其通信的点却随机分布在操作空间中,因此,T-R 距离 d 可认为是操作空间的随机分布。假设一个尺寸为 a 的方形区域为 WPAN 的操作空间,用坐标 $A(X_1, Y_1)$ 和坐标 $B(X_2, Y_2)$ 表示两个通信点,它们均匀且独立分布在该区域里。即坐标 X_1, Y_1, X_2 和 Y_2 是区间 $[0, a]$ 的独立的均匀分布,则 A 与 B 两点的距离如式(1)所示。

$$d = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} \quad (1)$$

显然距离 d 是一个随机变量,得到的概率分布函数(PDF)如式(2)所示。

$$f_D^{(\text{squ.})}(d) = \begin{cases} \frac{2d^3}{a^4} - \frac{8d^2}{a^3} + \frac{2\pi d}{a^2}, & 0 \leq d < a \\ -\frac{2d^3}{a^4} + \left[-\frac{4}{a^2} + \frac{8\arcsin(\frac{a}{d})}{a^2} + \frac{8\sqrt{d^2 - a^2}}{a^3} - \frac{2\pi}{a^2}\right]d, & a \leq d \leq \sqrt{2}a \end{cases} \quad (2)$$

其中, a 为方形操作空间的边长。考虑到 WPAN 操作空间的多样性,接着计算圆形操作空间下关于 d 的概率密度函数(PDF)如式(3)所示。

$$f_D^{(\text{cir.})}(d) = \frac{2d}{\pi R^2} \left[2\arccos\left(\frac{d}{2R}\right) - \frac{d\sqrt{4R^2 - d^2}}{2R^2} \right], d \in [0, 2R] \quad (3)$$

这里的 R 为圆形操作空间的半径。

2.2 操作空间的选择

虽然操作空间是复杂多样的,但多数的通信区域为方形和圆形,所以这里重点计算方形区域以及圆形区域关于 d 的统计量。这两类操作空间关于 d 的 PDF 虽然在形式上不相同但却有相同形式的矩,计算其 1 到 4 阶矩,并令其两类空间下关于 d 的 4 个矩相等,即:

$$\begin{cases} E[d]^{(\text{squ.})} = E[d]^{(\text{cir.})} \Rightarrow 0.522a = \frac{128}{45\pi}R \Rightarrow \frac{R}{a} = 0.577 \\ E[d^2]^{(\text{squ.})} = E[d^2]^{(\text{cir.})} \Rightarrow 0.333a^2 = R^2 \Rightarrow \frac{R}{a} = 0.577 \\ E[d^3]^{(\text{squ.})} = E[d^3]^{(\text{cir.})} \Rightarrow 0.241a^3 = \frac{2048}{525\pi}R^3 \Rightarrow \frac{R}{a} = 0.579 \\ E[d^4]^{(\text{squ.})} = E[d^4]^{(\text{cir.})} \Rightarrow 0.189a^4 = \frac{5}{3}R^4 \Rightarrow \frac{R}{a} = 0.580 \end{cases} \quad (4)$$

如式(4)所示,方形和圆形的操作空间下,关于 d 的 4 个矩函数在 $R=0.58a$ 的关系式下有相同的均值、方差、偏度和峭度。既然如此,可默认操作空间为圆形,如果实际情况 WPAN 操作空间是方形,只需要取半径 $R=0.58a$ 。

3 纯统计的路径损耗模型

3.1 传统的路径损耗模型

经典对数路径损耗模型以 dB 为单位,其 T-R 距离为 d 的路径损耗如下:

$$L = l_0 + 10\gamma \lg(d/d_0) + s(d), d \geq d_0 \quad (5)$$

其中, l_0 为参考距离 $l_0=1$ m 时的路径损耗, γ 是路径损耗指

数, d 是 T-R 距离, s 是零均值的对数正态阴影衰落, 即 $s \sim [0, \sigma]$ 。其中, $\{l_0, \gamma, s\}$ 3 个参数取决于信道条件 LOS 或 NLOS。

3.2 频率相关性

路径损耗计算式(5)受制于信道参数的选择, 除了与距离有关, 也取决于 $\{l_0, \gamma, s\}$, 而 $\{l_0, \gamma, s\}$ 3 个参数在一定程度上又依赖于频率。 $\{l_0, \gamma, s\}$ 对频率的依赖性可以通过取空间测量数据的平均值加以避免。考虑在超宽带(UWB), 也就是 3.1~10.6 GHz 的带宽范围里, 做一个室内关于 LOS 和 NLOS 的参数测试, 并取平均数据, 见表 1^[3]。

表 1 l_0, γ, σ 的统计量

统计量	LOS		NLOS	
	均值	标准差	均值	标准差
l_0 (dB)	47	/	51	/
γ	1.7	0.3	3.5	0.97
σ (dB)	1.6	0.5	2.7	0.98

在这种情况下, 所得的参数为随机变量, 因此参考文献[3]中提出了 3 个零均值的正态高斯函数 n_1, n_2 和 $n_3, n_1, n_2, n_3 \sim N[0, 1]$ 并令:

$$\begin{cases} \gamma = \mu_\gamma + \sigma_\gamma n_1 \\ s = \sigma n_2 \\ \sigma = \mu_\sigma + \sigma_\sigma n_3 \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)得:

$$L = l_0 + [\sigma_\sigma n_2 + \sigma_\sigma n_3] + [10\mu_\gamma \lg d + 10\sigma_\gamma n_1 \lg d] \quad (7)$$

3.3 圆形操作空间的统计路径损耗模型

实际中三维空间里的通信装置一般不是随机地安置在轴上的。大部分的设备都垂直固定在一个与其他平面坐标相比高度可忽略不计的位置, 因此, 该模型所讨论的范围均为二维空间。

(1) 信道参数

由于操作空间的复杂性, 通信过程中信道参数不停发生变化, 为了消除 LOS 和 NLOS 的不确定性, 引入室内路径切换频度 q 随机化信道参数 $\{l_0, \gamma, s\}$, 其表示如下:

$$p(\Theta) = \begin{cases} q, & \Theta = \Theta' \\ 1-q, & \Theta = \Theta'' \end{cases} \quad (8)$$

$\Theta' \triangleq [l'_0, \mu'_\gamma, \sigma'_\gamma, \mu'_\sigma, \sigma'_\sigma]$, $\Theta'' \triangleq [l''_0, \mu''_\gamma, \sigma''_\gamma, \mu''_\sigma, \sigma''_\sigma]$ 分别对应 LOS 和 NLOS 条件下信道参数。

(2) 路径损耗 L 的矩母函数

计算 L 的矩母函数(MGF)如下:

$$M_L(t) = \int_R e^{tL} p(\Theta) d\Theta M_{N_2, N_3}(t) M_{N_1, D}(t) \quad (9)$$

其中, $d\Theta$ 取决于式(8)的参数选择, $M_{N_2, N_3}(t)$ 是式(7)中第一个方括号项的 MGF:

$$\begin{aligned} M_{N_2, N_3}(t) &= \frac{1}{2\pi} \iint_R e^{t(\mu_\sigma n_2 + \sigma_\sigma n_3)} e^{-\frac{n_2^2 + n_3^2}{2}} dn_2 dn_3 \\ &= \frac{e^{\frac{t^2 \mu_\sigma^2}{2(1-t^2 \sigma_\sigma^2)}}}{\sqrt{1-t^2 \sigma_\sigma^2}}, -\frac{1}{\sigma_\sigma} < t < \frac{1}{\sigma_\sigma} \end{aligned} \quad (10)$$

$M_{N_1, D}(t)$ 是式(7)中第二方括号项的 MGF, 如下:

$$\begin{aligned} M_{N_1, D}(t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \iint_R e^{10t(\mu_\gamma + \sigma_\gamma n_1) \lg z} f_D(z) e^{-\frac{n_1^2}{2}} dz dn_1 \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{2R} z^{\frac{t\mu_\gamma}{\xi}} f_D(z) dz \int_R z^{\frac{t\sigma_\gamma n_1}{\xi}} e^{-\frac{n_1^2}{2}} dn_1 \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{2R} z^{\frac{t\mu_\gamma}{\xi}} f_D(z) dz \left[\sqrt{2} \sum_k^K \omega_k z^{\frac{t\sqrt{2}\sigma_\gamma x_k}{\xi}} + \theta(K) \right] \\ &\approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{k=1}^K \omega_k \int_0^{2R} z^{\frac{t(\mu_\gamma + \sqrt{2}\sigma_\gamma x_k)}{\xi}} \frac{2z}{\pi R^2} [2 \cos^{-1}(\frac{z}{2R^2}) - \frac{z\sqrt{4R^2 - z^2}}{2R^2}] dz \\ &\quad \sum_{k=1}^K \omega_k \frac{8\xi(2z)^{\frac{t(\mu_\gamma + \sqrt{2}\sigma_\gamma x_k)}{\xi} + \xi} \Gamma[\frac{3\xi + t(\mu_\gamma + \sqrt{2}\sigma_\gamma x_k)}{2\xi}]}{\pi[2\xi + t(\mu_\gamma + \sqrt{2}\sigma_\gamma x_k)] \Gamma[\frac{6\xi + t(\mu_\gamma + \sqrt{2}\sigma_\gamma x_k)}{2\xi}]}, \\ |t| &\leq 2.8 \times 10^{-2} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $\xi = \frac{\ln(10)}{10} \approx 0.23$; $\Gamma[\cdot]$ 为伽马函数, x_k 是 K 次埃尔米特多项式的零点, ω_k 是相应权重因子^[4], $\theta(K)$ 是与 K 对应的误差函数, 为:

$$\theta(K) = \frac{K! \sqrt{\pi}}{2^K (2K)!} z^{\frac{t\sigma_\gamma \eta}{\xi}} \left[-\frac{t\sigma_\gamma}{\xi} \ln(z) \right]^{2K}, \eta \in \{n_1 \text{ 的域} \} \quad (12)$$

考虑到精度的要求, 取 $K=2$, $|\theta(2)| \leq 10^{-3}$; 因为实际 WPAN 中^[3] $z \leq 20$ m, $n_1 \in [-1.25, 1.25]$ 也就是 $\eta \leq 1.25$ 以及表 1 中 $\sigma_\gamma \leq 0.97$, 则有:

$$\theta(2) \leq 940.85 \times 20^{5.27} t^4 \leq 10^{-3} \text{ 或 } |t| \leq 2.8 \times 10^{-2} \quad (13)$$

将式(10)、式(11)代入式(9)得 L 的矩母函数:

$$\begin{aligned} M_L(t) &\approx \frac{q e^{\frac{t^2 \mu_\sigma^2}{2(1-t^2 \sigma_\sigma^2)}}}{\sqrt{1-t^2 \sigma_\sigma^2}} \times \\ &\quad \sum_{k=1}^2 \omega_k \frac{8\xi(2R)^{\frac{t(\mu_\gamma + \sqrt{2}\sigma_\gamma x_k)}{\xi} + \xi} \Gamma[\frac{3\xi + t(\mu_\gamma + \sqrt{2}\sigma_\gamma x_k)}{2\xi}]}{\pi[2\xi + t(\mu_\gamma + \sqrt{2}\sigma_\gamma x_k)] \Gamma[\frac{6\xi + t(\mu_\gamma + \sqrt{2}\sigma_\gamma x_k)}{2\xi}]} + \end{aligned}$$



$$\frac{(1-q)e^{\frac{l^2}{2}}}{\sqrt{1-t^2}\sigma_\sigma^2} e^{\frac{t^2\mu_\sigma^2}{2(1-t^2)\sigma_\sigma^2}}$$

$$\times \sum_{k=1}^2 \omega_k \frac{8\xi(2R)^{\frac{t(\mu_\gamma + \sqrt{2}\sigma_\gamma x_k) + \xi}{\xi}} \Gamma[\frac{3\xi + t(\mu_\gamma + \sqrt{2}\sigma_\gamma x_k)}{2\xi}]}{\pi[2\xi + t(\mu_\gamma + \sqrt{2}\sigma_\gamma x_k)] \Gamma[\frac{6\xi + t(\mu_\gamma + \sqrt{2}\sigma_\gamma x_k)}{2\xi}]},$$

$$|t| \leq 2.8 \times 10^{-2}$$

(14)

(3) L 的 PDF 和累计分布函数(CDF)

根据 MGF, 通过 $m_k = \frac{\partial^k M_L(t)}{\partial t^k} \Big|_{t=0}$ 可得 L 的 1~4 阶矩如下:

$$\left\{ \begin{aligned} m_1 &= (15.2 - 7.82) \ln R + 47.2 - 2.05q \\ m_2 &= (248.8 - 192.6q)(\ln R)^2 + (1426.0 - 760.1q) \ln R + 2333.0 - 269.5q \\ m_3 &= (4321.3 - 3881.2q) \ln^3 R + (34824.8 - 27229.8q) \ln^2 R + (105752.2 - 60134.6q) \ln R + (118440.5 - 23203.5q) \\ m_4 &= (78300.8 - 74771.6q) \ln^4 R + (803241.1 - 724043.4q) \ln^3 R + (3444091.9 - 2750755.8q) \ln^2 R + (7177925.7 - 4371037.7q) \ln R + (6146830.4 - 1713516.3q) \end{aligned} \right.$$

(15)

进而得到 L 的均值、标准差、偏度和峭度为:

$$\left\{ \begin{aligned} \mu_L &= m_1 \\ \sigma_L &= \sqrt{m_2 - m_1^2} \\ \eta_3 &= \frac{E(L - \mu_L)^3}{\sigma_L^3} = \frac{m_3 - 3m_1m_2 + 2m_1^3}{\sigma_L^3} \\ \eta_4 &= \frac{E(L - \mu_L)^4}{\sigma_L^4} = \frac{m_4 - 4m_1m_3 + 6m_1^2m_2 - 3m_1^4}{\sigma_L^4} \end{aligned} \right. \quad (16)$$

根据式(16)将 L 标准化:

$$l = \frac{L - \mu_L}{\sigma_L} \quad (17)$$

标准化后的路径损耗的 PDF 如图 1 所示, 虽稍微向右偏斜, 但仍接近于标准正态分布, 因此可认为用式(17)对路径损耗做标准化是合理的。

根据 l, η_3, η_4 , 通过一个正态埃尔米特多项式校正^[5]近似得到 l 的 PDF 和 CDF, 使其逼近于式(16)所示的均值、

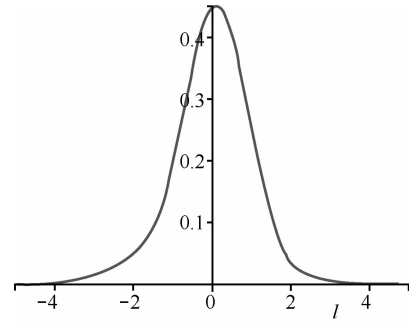


图 1 l 的 PDF

标准差、偏度和峭度, 如式(18)所示。

$$f_L(l|q, R) \approx \frac{e^{-\frac{l^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}} \left[1 + \frac{\eta_3}{6} (l^3 - 3l) + \frac{1}{24} (\eta_4 - 3)(l^4 - 6l^2 + 3) \right] \quad (18)$$

$$F_L(l|q, R) \approx \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{l}{\sqrt{2}}\right) \right] - \frac{e^{-\frac{l^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}} \left[\frac{\eta_3}{6} (l^2 - l) \right] \quad (19)$$

其中式(18)的和式(19)的分别表示标准化后的路径损耗的 PDF 和 CDF, 式(19)的是误差函数, 它和 η_3, η_4, l 一样都与 q, R 有关。

3.4 拟合优度的检验

本文采用蒙特卡罗模拟法来检验该模型的拟合优度。假设 $R=5$ m, 根据式(7)首先随机生成 10 000 个路径损耗的样本, 接着计算各自的 PDF, 然后根据它们的均值和方差将其标准化, 最后绘制出样本和式(18)的分位点。如图 2 所示, 样本分位点(图中空心的点)的连线是接近于式(18)给出的分位点线。因此, 可认为式(18)是合理的模型。

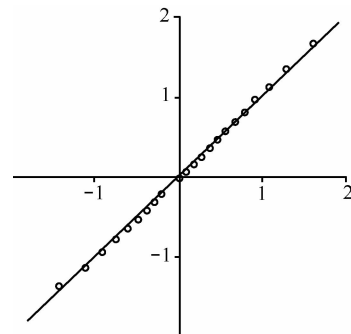


图 2 分位点

4 数据处理

该模型有一个明显的、传统模型所不具备的优势, 即在链路预算中, 可根据信道条件和路径损耗的置信度提出

3种不同的QoS,针对不同的服务质量调整发送功率,在不重要的场合可选择低服务质量的传输方式达到保养硬件的目的。3种服务质量为:

- Top QoS 最大覆盖半径($R=10\text{ m}$),纯 NLOS 连接($q=0$),置信度 $\delta=100\%$,即是 l 的 CDF 取 $1(F_L(lq, R)=1)$;
- Medium QoS 最大覆盖半径($R=10\text{ m}$),纯 NLOS 连接($q=0$),置信度 $\delta=95\%$;
- Lowest QoS 覆盖半径 ($R=5\text{ m}$), 半 LOS 和半 NLOS 连接($q=\frac{1}{2}$),置信度 $\delta=95\%$ 。

对第一种 Top QoS 的情况,将 q 和 R 的值代入式(15)和式(16)计算出均值、标准差、偏度和峭度,如下:

$$\begin{cases} \mu_L=82.20 \\ \sigma_L=13.40 \\ \eta_3=-0.07 \\ \eta_4=2.91 \end{cases} \quad (20)$$

将其代入式(19),取 $\delta=100\%$, $q=0$ 和 $R=10\text{ m}$,有 $(F(l|0, 10)=1)$, 可得 $l=3.57$,则置信度 100%,路径损耗 $l_1=l \cdot \sigma_L + \mu_L=130\text{ dB}$,可以看到,该方式不需要知道通信双方的距离也可计算出路径损耗,消除了原始模型对距离的依赖。同理可得后两种方式下的路径损耗分别为: $l_2=103\text{ dB}$, $l_3=83\text{ dB}$,显然,若降低 QoS 则路径损耗也会降低,即低 QoS 更加节能。因此在不重要的场合可选择低 QoS 通信方式降低能耗,从而保养硬件和延长电池寿命。在传统的链路预算中要考虑到最严重的情况,也就是在最差的纯 NLOS 信道条件下的最大链路距离,将 $l_m=2R=20\text{ m}$ 代入式(7)得到其均值和标准差,如下:

$$E[L]=l_0+10\mu_\gamma \lg 20=51+10 \times 3.5 \times \lg 20=96.5\text{ dB}$$

$$D[L]=\sqrt{100\sigma_\gamma^2(\lg 20)^2+\mu_\sigma^2+\sigma_\sigma^2}=13\text{ dB} \quad (21)$$

在实际情况下,传统模型路径损耗的预算应该留一些安全余量,即 $96.5+(2\sim 3) \times 13=122.5\sim 135.5\text{ dB}$,而该值正是对应 Top QoS 的情况,该方式功耗最大,即终端一直以最大功率发送信号,这对无线设备的保养十分不利。

5 结束语

考虑到 WPAN 操作空间的形状和复杂性,用纯统计的方式建立了一种与距离无关的路径损耗模型。通过计算两个常用操作空间(正方形和圆形)的统计量,发现当圆形区域的半径为正方形边长 0.58 倍($R=0.58a$)时,两者的统计量(1 到 4 阶矩)是相等的,因此选用圆形区域作为默认操作空间,将距离作为随机变量,通过操作空

间的尺寸和室内路径切换频度以及路径损耗的置信度估算路径损耗。该模型消除了原始模型对距离的依赖,在链路距离未知的情况下也能计算出路径损耗,同时该模型也提出了 3 种服务质量,可根据用户的要求来选择发送功率,在不太重要的应用程序中可以降低服务质量以减少功耗。

参考文献

- 1 Haykin S. Cognitive radio: wireless communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201~202
- 2 Molisch A F, Balakrishnan K, Cassioli D, et al. IEEE 802.15.4a channel model final report. <http://www.ieee802.org/15/pub/04/15-04-0662-02-004a-channel-model-final-report-r1.pdf>
- 3 Ghassemzadeh S S, Jana R, Rice C W, et al. Measurement and modeling of an ultra-wide bandwidth indoor channel. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(10)
- 4 Abramowitz M, Stegun I A. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. Wiley, 1972
- 5 Papoulis A, Pillai S U. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes. Fourth Edition. McGraw Hill, 2002

[作者简介]



杨如民,男,博士,重庆理工大学教授,主要从事认知无线电、传感器网络、可再生能源的开发及利用等方面的有关研究工作。



代琪怡,女,重庆理工大学电子信息与自动化学院硕士研究生,主要从事无线传感器网络、信号处理与获取等相关知识的研究工作。



余成波,男,博士,重庆理工大学教授,主要从事远程测试技术、网络化仪器、信息处理等领域研究。

(收稿日期:2013-01-16)