



基于随机桥过程的窄带信道多径衰落仿真研究

刘磊¹, 夏伟^{1,2}, 韩江洪^{1,3}

(1. 合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009;

2. 蚌埠学院计算机科学与技术系 蚌埠 233000;

3. 教育部安全关键工业测控工程研究中心 合肥 230009)

摘要: 将多径分量仿真为随机射线的传播, 其轨迹描述为随机桥过程的样本。研究随机射线在渗流网格中扩散的物理规律, 以改进物理散射约束, 使之有足够样本用于场强时延分布建模。通过实验, 模拟不同波长的波束在不同散射体密度的渗流网格内的扩散, 得出信道的相干带宽、误码率和场强的统计特征, 验证了信号的多径衰落统计特征与相应的随机射线扩散程度有关, 随机射线模型能够较大概率地仿真信号多径衰落的特性。

关键词: 渗流网格; 随机射线; 布朗桥; 多径衰落

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015010

Research on Simulation of Multi-Path Fading of Narrow-Band Channel Based on Stochastic Bridge

Liu Lei¹, Xia Wei^{1,2}, Han Jianghong^{1,3}

(1. School of Computer & Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Department of Computer Science and Technology, Bengbu University, Bengbu 233000, China;

3. Engineering Research Center of Safety Critical Industrial Measurement & Control Technology, Ministry of Education, Hefei 230009, China)

Abstract: The propagating stochastic rays were employed to simulated multi-path components (MPC), which tracks were represented by samples of stochastic bridge processes. The laws of physics about stochastic ray diffusing in percolation lattices were studied to improve constraints of physical diffusion, which made it with enough samples to model power delay probability. According to experimental, different wavelengths of beam were simulated to diffuse in percolation lattices with different scatters density. Coherence bandwidths, bit error rate and statistics characteristics of power were acquired to verify that stochastic ray model can fit to the characteristics of the multi-path fading channel, which can predict channel parameters in specific locations.

Key words: percolation lattice, stochastic ray, brown bridge, multi-path fading

收稿日期: 2014-09-18; 修回日期: 2014-10-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61370088), 国家国际科技合作专项基金资助项目 (No.2014DFB10060)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61370088), The Program of International Science and Technology Cooperation of China (No.2014DFB10060)

1 引言

无线通信系统的性能主要受无线信道的制约,特别是小尺度范围内的信号幅度与相位快速变化造成的多径衰落,会造成不同程度的信号失真。因此,关于多径衰落信道的建模历来是无线系统设计的难点^[1]。以往的建模方法多以实验为基础,通过网络分析仪对接收信号进行时/频分析,获得信道带宽内的截止频率和平均接收功率等参数。由于密集城区和建筑物内,存在障碍物较多的情况,在该环境下通过仪器对多径衰落信道直接测量,构建实验系统的代价则相当高^[2]。

由于信号波束在传播过程中,受到障碍物的阻隔而被反射,如果该过程能被计算机精确仿真,则给定障碍物的布局图,就能够预测特定位置的信道参数^[3]。融合统计建模和物理建模的思想,利用散射体几何布局仿真波束扩散的随机射线,通过追踪射线轨迹模拟多径分量的时延和路径损耗^[4]。假设射线散射的方向在约束范围内随机取值,则同一散射体产生的射线集合具有波束的意义,每条随机射线的轨迹都是一个各态历经随机过程的样本^[5]。路径轨迹都是相互独立的,则该路径累积的路径损耗具有了随机桥的性质。随机桥是布朗运动的增量过程,随机桥的两个端点分别为发射机与接收机的坐标,能够表示经过次随机反射到达接收机的路径轨迹,每次反射的衰落系数是相互独立的^[6]。

本文在给定障碍物分布密度的情况下,采用渗流网格描述窄带信号波的传播环境,并将无线电波的传播等效为经过若干次反射的随机射线,射线的轨迹由随机桥过程函数产生。根据射线的轨迹和信号波长,可以计算诸多的窄带信道特性(路径损耗、多径时延分布和接收功率分布),预测特定位置的信道场强分布,从而可以分析在该位置通信可能产生的误码率。

2 相关工作

射线追踪法是一种确定性的无线信道建模方法,通过Maxwell方程组解析波束的轨迹,能够区分传播环境,可以对特定站址的传播环境进行建模^[7]。波束的波长与传播环境的粒度决定了波束轨迹的精细度,因此Maxwell方程组比较适合较长波信道的建模,而对于现代无线通信的超高频波束^[8],其几何解析的困难度极高,也易出现过拟合(over-fitting)现象。菲涅耳(Fresnel)区理论提出将传播空间

用若干相同焦点的椭球体来划分,以等效散射体的方法用于简化计算。波束的散射点都等效位于不同椭球的表面,焦点为发射机与接收机的位置,即在椭球内构成等效的二次波反射,该模型参数虽少,但基本满足波束物理现象的描述^[9]。此外,通过蒙特卡罗方法产生加权粒子为一种简化方法,只是等效物为波束,适合给定障碍物分布的情况^[10]。然而,大量粒子的产生、挑选和迭代同样需要很大的计算量,且迭代过程中会出现粒子退化现象,弱化模型的精确度。

参考文献[11]较早提出随机网格描述多散射的传播环境,二维平面均匀划分为 N 个网格,网格边长为 Δ ,空网格(没有散射体)的概率为 p 。信号波束可以看作多条射线,这些射线从 T_x 发出,当遇到散射体(非空网格)时,射线可以改变轨迹。根据波束扩散如同流体流动的规律,从势能高的位置出发,沿着非空网格构成的“水渠”,到达势能低的接收位置,这个过程称作渗流^[12],如图1所示。根据渗流效应,将渗流网格看作“水渠”,并对信号波形成不同阶段的波导(waveguide),每个阶段的轨迹都是独立,可以通过随机过程构造,避免了复杂的微分方程求解^[13]。

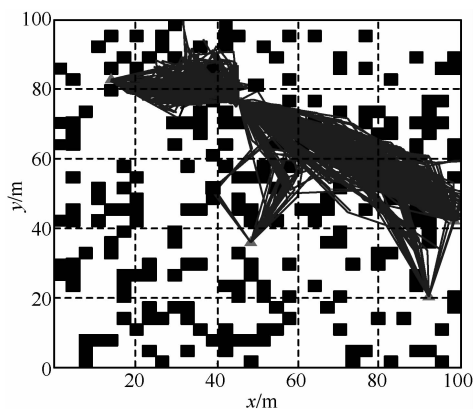


图1 渗流网格示意

对于多径衰落信道的仿真,将多径的轨迹简化为随机射线的轨迹,这样既能遵循波束传播的物理规律,又能利用随机过程的一些理论成果,可以有效提高场强预测的准确度,又能避免模型出现过拟合。随机射线可能有无穷多个,但在传播过程中必须满足一定约束才能构成有效的多径分量。参考文献[14]提出了有约束的布朗桥过程产生随机射线,每条射线由若干线段构成,其3个约束(C1)分别是:

- 两个以上连续的线段不能反射在同一散射体上;
- 任意轨迹点不能位于散射体内;



- 任意线段不能直接穿过散射体, C1 约束遵循了几何反射定律, 但实际仿真过程中发现满足约束 C1 的随机射线个数极少, 所以无法形成足够的多径轨迹样本用来建模。

3 系统模型

将波束的多径扩散看作若干条射线从相同位置出发, 经过次转折的随机游走, 到达相同的位置, 这个过程可以由定义 1 描述。

定义 1 $0 \leq t \leq k$, 设一维的随机过程 $Y(t, l)$ 的轨迹通过两个固定点 T_x, R_x , 即 $\{Y(t, l) | Y(0, l) = T_x, Y(k, l) = R_x, T_x, R_x \in R, 0 \leq t \leq k\}$, 被称为随机桥过程:

$$Y(t, l) = T_x + W(t, l) - \frac{t}{k} [W(k, l) - R_x + T_x] \quad (1)$$

$\{W(t)\}$ 是布朗运动的随机过程, 对于 $0 \leq s < t \leq T$, $W(t) - W(s) \sim (t-s)^{\frac{1}{2}} N(0, 1)$, 式 (1) 刻画了质点在一维区间 $[R_x, T_x]$ 内随机游动的轨迹。

存在相互独立的两个随机桥过程 $Y_1(t, l)$ 和 $Y_2(t, l)$, 分别表示随机射线 l 在二维空间内轨迹点的 X 坐标和 Y 坐标, l 的起点坐标为 T_x , l 的终点坐标为 R_x 。

定义 2 定义随机变量 Z_k, Z_k 为随机射线 l 的长度:

$$Z_k = \sum_{i=0}^k \left\{ \sum_{L=1}^2 [Y_{L(t_{i+1}, l)} - Y_{L(t_i, l)}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

l 实际构成了波束扩散的一个分径, Z_k 是该分径在信道经过的路径长度, 结合轨迹点坐标 $Y_1(t, l)$ 和 $Y_2(t, l)$, 就可以构造多径时延和路径损耗。渗流网格中, l 成为有效的多径分量, 需要满足两个条件: 统计约束, l 的轨迹点坐标与空网格概率 p 和等效反射次数 k 相关, 控制了随机射线的扩散程度; 物理散射约束, 与非空网格的具体分布相关, 保留符合散射规律的射线, 约束了随机射线的个数, 其原理如图 2 所示。

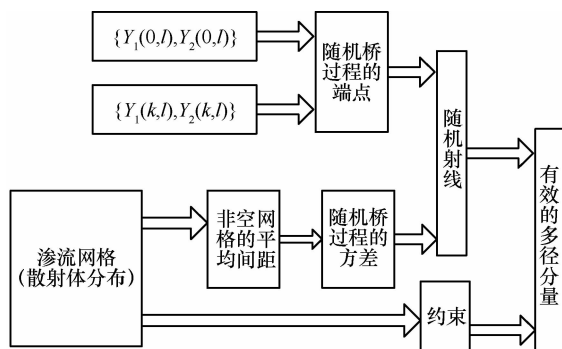


图 2 随机射线产生的原理

3.1 统计约束

设 D_k 为随机射线游走的平均距离:

$$D_k = \bar{d} k^\beta \quad (3)$$

定理 1 $\bar{d}$ 为渗流网格非空网格之间的平均距离, $\bar{d} \approx \frac{\Delta}{(1-p)^\alpha}$, $\alpha > 0$, $\bar{d}$ 反映了射线在渗流网格可以直线传播的平均距离。

证明 假设散射点集中在各个非空网格的质心, 某个网格内的信源发送无穷多条射线, 射线覆盖的面积为 $S = \Delta^2 p N$ 。

(1) $p \rightarrow 0$ 时, 射线传播范围限制在 Δ^2 的网格内, $S = \Delta^2$, 则 $\bar{d} = \Delta$;

(2) $p \rightarrow 1$ 时, 根据几何拓扑分析, 散射面积 $S = \Delta^2 N$; 此时, 渗流网格没有障碍物散射, 根据信道衰落特性, 射线直线传播距离应为无穷大, 所以 $S \rightarrow \infty$ 。

设 $S \approx \bar{d}^2 N$, $\bar{d} = \frac{\Delta}{(1-p)^{\alpha/2}}$, $\alpha > 0$, 恰好可以表现出射线在渗流网格传播距离的变化趋势。上述结论无法依据数学定理进行严格推导, 所以仅提供一个启发性的证明方法。

β 为无序参数, 描述射线的扩散程度:

$$\beta = p + \sqrt{2p-1} (1-p), 0.5 \leq p \leq 1 \quad (4)$$

根据式 (3) 和式 (4) 可以看出, 设随机变量 $Z_k \sim N(D_k, \sigma^2)$, D_k 在射线的随机游走中约束其散射程度。 k 相同时, β 跟随 p 呈线性递增变化。 p 越大, D_k 就越大, 射线的扩散程度越大; p 越小, D_k 就越小, 同时射线的扩散程度越小, 其波束沿直线传播特性就越明显。设 Z_k 的方差 $\sigma^2 = 2(\bar{d}/k)^2$, 使得 T_x 与 R_x 之间如果没有散射体阻挡时, Z_k 的均值能在 T_x 与 R_x 的欧式距离左右, 这样基本满足了波束散射的物理特性。

3.2 物理散射约束

尽管根据式 (1) 和式 (2) 可以产生无穷多条多径分量, 但随着散射次数的增加, 同时满足约束 C1 的随机射线却很少。因此, 修改约束条件, 满足如下约束 (C2) 的随机射线为有效的多径分量:

(1) 如图 3 所示, 随机射线 l 的每个线段都有散射角 θ , θ 需要满足 $\theta \in [0, \arg \sin(p)]$;

(2) λ 为载波波束的波长, λ_{ref} 为参考的波长, $\lambda < \lambda_{\text{ref}}$, l 穿越的散射体厚度不能超过阈值 ρ ;

$$\rho = (1-\beta)p \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_{\text{ref}}}} \quad (5)$$

(3) 随机射线 l 的每个线段端点与最近非空网格质心的距离不能超过 $\left(\frac{\Delta}{\sqrt{2}} + \varepsilon\right)$, ε 为仿真时给定的参考值, 且 $|\varepsilon| \leq \frac{\Delta}{\sqrt{2}}$ 。

约束 1 的 θ 保证散射体越少, 波束随机游走的方向越不固定; 当 $p \rightarrow 0$ 时, 射线趋向于直线传播, 避免了射线无序游走, 连续反射到相同散射体上。由于波束具有绕射和直接穿透散射物体的能力, 同时与波束的波长有关系, 约束 C2 则一定程度地模拟这一过程。

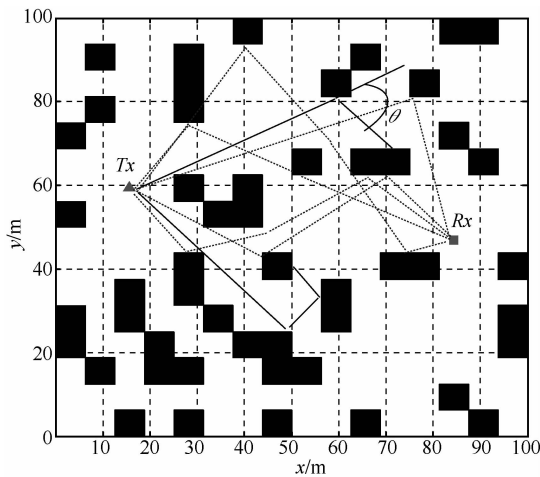


图 3 散射约束示意图

4 随机射线的到达概率

r 为欧式距离, 是连续的随机变量, 概率密度函数 $f(r)$ 需要满足如下条件 (C3):

- (1) $f(r) \geq 0, r > 0$;
- (2) $\int_0^{\infty} f(r) \rho(r) dr = 1$ 。

定理 2 p -概率的渗流网格中, 一条随机射线经过 k 次散射, 传播的距离为 r , r 作为随机变量, 其概率密度函

$$\text{数为: } f(r) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi D_k^2} \exp\left(-\frac{(r-D_k)}{D_k}\right), & r > D_k \\ \frac{1}{2\pi D_k^2}, & 0 < r \leq D_k \end{cases}。$$

证明 根据参考文献[12]提出的最大熵原理, 设 $\varepsilon = r - D_k$, $f(r) = Q_0 \lambda^{-\varepsilon}, r > D_k$ 。

$$\because \iint_{\varepsilon, \theta} f(\varepsilon) d\varepsilon^2 d\theta = 1,$$

$$\begin{aligned} \iint_{\varepsilon, \theta} f(\varepsilon, \theta) d\varepsilon^2 d\theta &= \iint_{\varepsilon, \theta} Q_0 \lambda^{-\varepsilon} d\varepsilon^2 d\theta \\ &= 2\pi Q_0 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\infty} \varepsilon \lambda^{-\varepsilon} d\varepsilon \\ &= 2\pi Q_0 \int_0^{\infty} \varepsilon \lambda^{-\varepsilon} d\varepsilon \end{aligned}$$

$\because r \rightarrow D_k$ 时, 射线散射处于完全随机的状态, 根据定理 1 所述,

$$\begin{aligned} \therefore Q_0 &\approx \lim_{r \rightarrow D_k} f(r) = \frac{d(1/2\pi r)}{dr} \\ &= -\frac{1}{2\pi r^2} = -\frac{1}{2\pi D_k^2} \end{aligned}$$

$$\text{由于 } \int_0^{\infty} r \lambda^{-r} dr = \frac{1}{(\ln \lambda)^2}, \frac{2\pi Q_0}{(\ln \lambda)^2} = 1,$$

$$\lambda = \exp(\sqrt{-2\pi Q_0})$$

$$\therefore f(r) = Q_0 \exp(-\sqrt{-2\pi Q_0} \varepsilon),$$

$$f(r) = \frac{1}{2\pi D_k^2} \exp\left(-\frac{(r-D_k)}{D_k}\right), r > D_k, \text{证毕。}$$

由约束 C3 的条件(2)可得, $\rho(r) = \pi D_k$ 。

概率密度函数 $f(r)$ 的期望为:

$$\begin{aligned} E(r) &= \int_0^{\infty} f(r) \rho(r) r dr \\ &= \int_0^{D_k} \frac{1}{2\pi D_k^2} \cdot \pi D_k \cdot r dr + \\ &\quad \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{D_k}^R \frac{1}{2\pi D_k^2} \exp\left(-\frac{(r-D_k)}{D_k}\right) \pi D_k r dr \\ &= \frac{D_k}{4} + D_k = \frac{5D_k}{4} \end{aligned} \quad (6)$$

引理 1 $r \rightarrow \infty$ 时, $\bar{r}$ 无法构成参数 D_k 的无偏估计。

证明 式(3)中的 D_k 是在给定 k 和 p 的基础上, 依据质点布朗运动的特点而产生的平均位移, 作为预先给定的固定值, D_k 与随机射线传播的距离无关; $f(r)$ 则是在给定的 D_k 基础上, 结合射线圆盘扩散的几何原理, 质点经过 k 次转折后, 产生位移 r 的概率, $\bar{r}$ 是其样本均值。尽管描述方法不同, $\bar{r}$ 与 D_k 的物理意义相同, $\bar{r}$ 应当构成参数 D_k 的无偏估计。但是, $r \in (0, \infty)$ 时:

$$E(\bar{r}) = E\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i\right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E(r_i) = \frac{1}{n} n \frac{5D_k}{4} = \frac{5D_k}{4} \neq D_k \quad (7)$$



其中, $\bar{r}$ 作为统计量, 却无法构成对参数 D_k 的无偏估计。

5 场强的时延分布

根据射线追踪法的半确定性建模原则, 本文假设每个路径的直线传播相互独立, 同时路径之间也相互独立, 将一条路径分解为 k 段的平坦衰落信道。

定义 3 $\|s(i, l)\|$ 为模值, 表示第 l 条路径的第 i 次散射后得到的分径接收功率:

$$s(i, l) = H(i-1, l) e^{(-j2\pi d_{i-1, l}(l)/\lambda)} 10^{-\frac{1}{10} \|s(i-1, l)\|} d_{i-1, l}^{-2}(l) \quad (8)$$

其中, $d_{i-1, l}(l)$ 为第 l 条路径的第 i 次散射产生的传播距离, $H(i-1, l)$ 则是第 l 条路径的第 i 次散射的随机增益, λ 为载波波束的波长, 信源的发送功率为 P , $\forall s(0, l) = P$ 。则根据随机桥过程性质的正交不变性, $\{H_s(1, \omega), \dots, H_s(i-1, \omega)\}$ 相互独立, 每条路径都看作一个独立的分径时延衰落信道。

定义 4 第 l 个路径内的 $H(i-1, l)$ 满足:

$$H(i-1, l) = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (9)$$

其中, a 和 b 均为服从标准正态分布的随机变量。

假设 1 ns 的时延间隔相当于 0.3 m 的光程, 根据式 (2), 第 l 条路径的长度为 $Z_k(l)$, 则该路径的时延为:

$$\tau(l) = \frac{Z_k(l)}{C} \quad (10)$$

其中, C 为光速。

因此, 确定存在 L 条有效路径的情况下, 根据 $s(k, l)$ 和 $\tau(l)$ 得到场强样本和时延样本, 就能够建立信道的场强时延分布 (power delay probability, PDP)。

6 仿真实验

6.1 实验场景

本文采用 MATLAB 2013b 作为仿真实验平台, 仿真 100 m² 的正方形小尺度范围 Ω 内的随机射线的传播。随机射线从 T_x 出发达到 R_x , 空网格分布的概率为 p , $\bar{d}$ 中的参数 $\alpha = \frac{1}{2}$ 。众所周知, $p=0.8$ 时, 散射体密度较小, 波束扩散程度较大; $p=0.6$ 时, 散射体密度较大, 波束扩散程度较小。根据参考文献[15]提出的阈值 $p_c \approx 0.59275$, 当 $p > p_c$ 时, 绝大多数随机射线的扩散会被限定在很小的范围内, 则满足约束 C2 的随机射线个数几乎为 0。因此, 本文在 $p=0.8$ 和 $p=0.6$ 两种不同的散射环境下, 对给定 T_x 和 R_x 之间建立

随机射线, 并对射线传播的到达概率、场强时延分布和接收概率进行比较研究。假定信号的发送功率为 1 mW (0 dBm), 参考波长 λ_{ref} 为 870 MHz 的载波波长, 将从多径信道的场强时延分布、信号的误码率 (BER) 和场强与时延的概率统计来分析随机桥过程模拟信道场强的有效性。

6.2 构成有约束的随机射线

每条随机射线都是由独立的随机桥过程构成, 第 l 个随机桥过程样本的均值为 μ , $\mu = D_k$; 方差为 σ^2 , $\sigma^2 = 2(\bar{d}/k)^2$, k 为散射次数。设随机变量 $W_{i,1}$ 和 $W_{i,2}$, $W_{i,1}, W_{i,2} \sim N(\mu, \sigma^2)$, 代入式 (1) 得到第 l 条随机射线的第 t 个轨迹点的二维坐标 $(Y(t, 1), Y(t, 2))$ 。根据二维坐标, 形成候选随机射线 l 的轨迹。当 l 满足物理散射约束 C2 时, 才能构成有效的随机射线。

如图 4 所示, 横坐标是候选的随机射线个数, 也是独立的随机桥过程个数。在两种不同的散射体密度的情况下, 分别根据参考文献[14]提出的散射约束 C1 与本文提出的散射约束 C2 提取有效的随机射线个数。约束 C1 遵循的是几

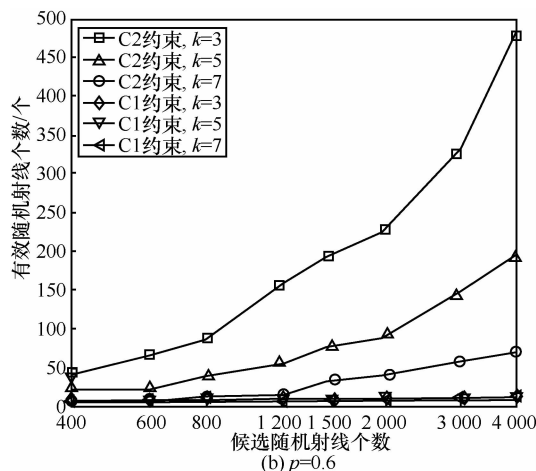
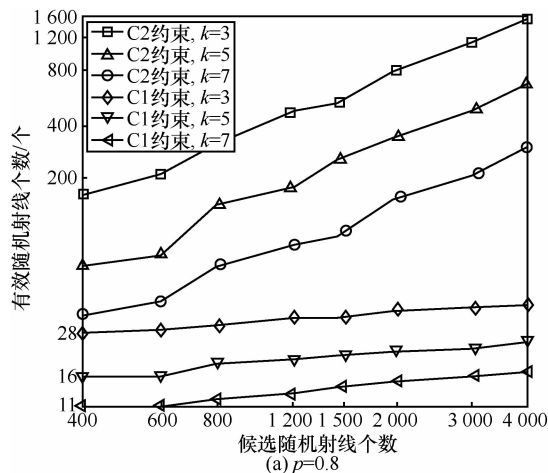


图 4 约束 C1 与约束 C2 产生的有效随机射线比较

何反射规律的数学约束,相对严格;而约束 C2,则是在限定散射角 θ 前提下的物理约束,并考虑波长的因素。从结果看出,约束 C2 产生的有效随机射线个数远多于约束 C1,这为随机射线的到达概率、场强时延分布和概率分布的建模提供了充足的样本。

6.3 k 次散射的随机射线到达概率

将 T_x 到 R_x 的所有随机射线看作一个波束, T_x 与 R_x 的欧式距离为 r ,也可以看作波束传播的有效距离。每条射线最大的反射次数为 k , 随机射线到达的概率函数 $f(r)$ 如图 5 所示。

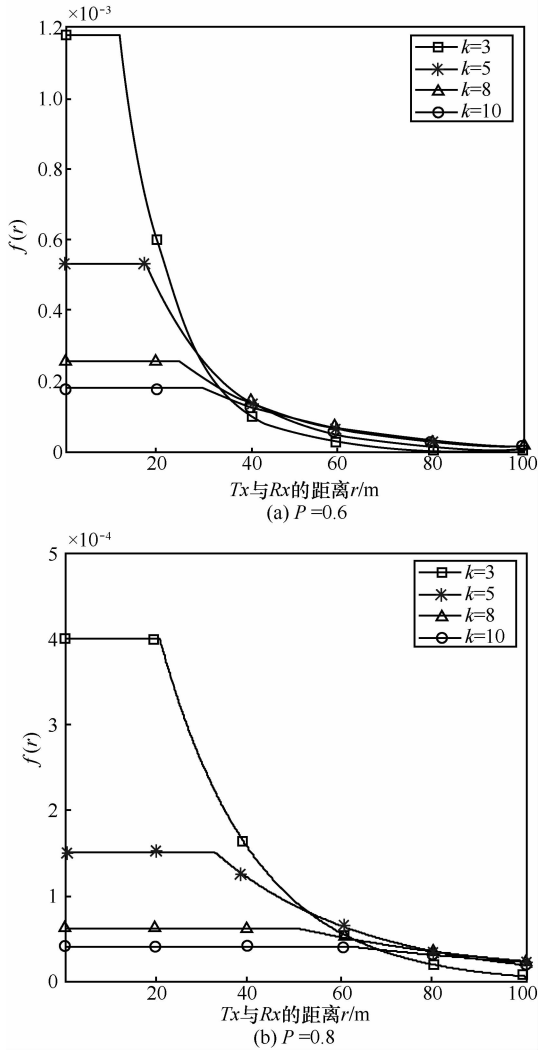


图 5 不同散射体密度下的随机射线 k 散射后的到达概率

D_k 是一个给定的先验阈值, $\bar{r}$ 则是关于参数 D_k 概率密度函数的后验结果, D_k 是 $\bar{r}$ 的充分条件, D_k 与 $\bar{r}$ 都假设 Ω 内的射线平均散射次数为 k 。 D_k 的物理意义在于, k 次散射等效于半径为 D_k 的 Fresnel 区内的一次散射,且散射体均分

布在 Fresnel 区的弧边上, $r < D_k$ 是一个自由空间,射线在这个范围内散射是等概率到达且没有损耗。而 $\bar{r}$ 的物理意义更加直接,即 Ω 内所有随机射线的平均距离。

D_k 与 $\bar{r}$ 的物理意义是相同的, 为了满足 D_k 成为 $\bar{r}$ 的充分必要条件,对于常数 k 的取值,应当使得 $\bar{r}$ 与 D_k 在数值上尽可能接近,即 $\bar{r}$ 构成对 D_k 的无偏估计。而根据引理 1, $r \in (0, \infty)$, $\bar{r}$ 构不成 D_k 的无偏估计。但在实际建模过程中,给定了射线的最大传播距离 R , 即 $r \in (0, R]$ 时,转化为如下最优化求解:

$$\begin{aligned} \bar{r} &= \int_0^R f(r) \rho(r) r dr \\ \min & \left| 1 - \frac{\bar{r}}{D_k} \right| \\ \text{s.t.} & k \in \{2, 3, \dots, \infty\} \end{aligned} \tag{11}$$

找出最优值 k^* , 使其满足 $E(r) = D_{k^*}$ 。随机射线只能在 Ω 内传播, r 的最大距离不超过 $100\sqrt{2}$ m, 故设式(11)积分上限 $R = 100\sqrt{2}$ m, k 对应的参数 D_k 和 $\bar{r}$ 见表 1。

表 1 k 次散射随机射线的平均传播距离							
p	k	2	3	4	5	6	7
0.8	D_k/m	13.5	19.9	26.3	32.5	33.7	44.8
	$\bar{r}/\text{m}$	16.92	24.75	31.77	37.57	42.02	45.22
	k	8	9	10	11	12	13
	D_k/m	50.9	56.9	62.9	68.9	74.96	80.92
	$\bar{r}/\text{m}$	47.38	48.68	49.31	49.41	49.12	48.51
	k	2	3	4	5	6	7
0.6	D_k/m	8.47	11.62	14.54	17.3	19.94	22.49
	$\bar{r}/\text{m}$	10.59	14.53	18.17	21.57	24.75	27.7
	k	8	9	10	11	12	13
	D_k/m	24.95	27.35	29.69	31.98	34.22	36.42
	$\bar{r}/\text{m}$	30.41	32.89	35.13	37.14	38.95	40.55
	k	2	3	4	5	6	7

根据表 1 得出, $p=0.8$ 时, 满足式(11)的最优值 $k^*=7$; $p=0.6$ 时, $k^*=17$ 。此外, $p=0.6$ 时的 D_k 总是小于 $p=0.8$ 时的 D_k 。当 $r < D_k$ 时, 即 T_x 和 R_x 都落在 Fresnel 区内, 自由空间越小, 空间内的射线个数反而越多。因此, $f(r)$ 在 $p=0.6$ 的概率值反而高于 $p=0.8$, 这是符合实际环境下的多径传播效应。但随着 r 的增加, 当 $r > D_k$ 时, 传播的射线就会有损耗, $p=0.6$ 时, $f(r)$ 在 $r > D_k$ 的收敛速度比 $p=0.8$ 时要快, 这是由于散射体密度越高, 射线的损耗就越多, 也符合实际情况。

6.4 场强时延分布

在以往的统计方法中, 场强时延分布中的时延参数是根据载波的传播特性给定的, 与散射体分布和波束的散射过程无关。因此, 统计模型得到的场强分布特征描述局部



特定位置的场强是没有区分性的。由于散射体对波束的随机反射,不同位置观测的场强有很大的差异,这却是统计模型所无法估计的。本文的射线追踪法主要考虑散射体的实际分布,在给定 p 、 k 和 r 的前提下,通过随机桥过程生成轨迹样本,并根据约束 C2,得出 T_x 与 R_x 之间的有效随机射线。每条射线就是一个时延分径,通过式(8)和式(10)计算场强样本 $s_p=\{s_1, s_2, \dots, s_l\}$ 和时延样本 $\Gamma_p=\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_l\}$,由此得出 R_x 位置的场强时延分布(PDP)。

如图6、图7所示, $p=0.8$ 时的随机射线扩散程度要高于 $p=0.6$ 时。图6为 $p=0.8, k=7$, 870 MHz 载波和 2.4 GHz 载波在 T_x 与 R_x 之间有效的射线轨迹以及对应的 PDP。根据图8所示的时延的经验概率密度函数 $P(s)^*$, 得到两种载波各自相应的 RMS 时延扩展 $\tau_m, \tau_m=\sigma_{\Gamma_p}^2$ 。其中, 870 MHz 的

射线个数为 122, $\tau_m=88.25$ ns; 2.4 GHz 的射线个数为 109, $\tau_m=52.09$ ns; 图7为 $p=0.6, k=13$, 两种载波的射线轨迹以及对应的 PDP, 870 MHz 的射线个数为 50, $\tau_m=7.53$ ns; 2.4 GHz 的射线个数为 27, $\tau_m=6.82$ ns。由信道的相干带宽 $B=\frac{1}{2\pi\tau_m}$ 可知, $p=0.8$ 时, 870 MHz 载波的相干带宽 $B=1.8$ MHz, 2.4 GHz 载波的相干带宽 $B=3.1$ MHz; $p=0.6$ 时, 870 MHz 载波的相干带宽 $B=21.1$ MHz, 2.4 GHz 载波的相干带宽 $B=23.3$ MHz。

$p=0.6$ 时, 两种载波的 RMS 时延扩展 τ_m 相对较小, 同时射线个数也较小, 表明了渗流作用约束了波束扩散程度, 使得 τ_m 减少, 与位置和距离相关, 此时的 T_x 与 R_x 通信信道的相干带宽相对较大。2.4 GHz 载波信道的相干带

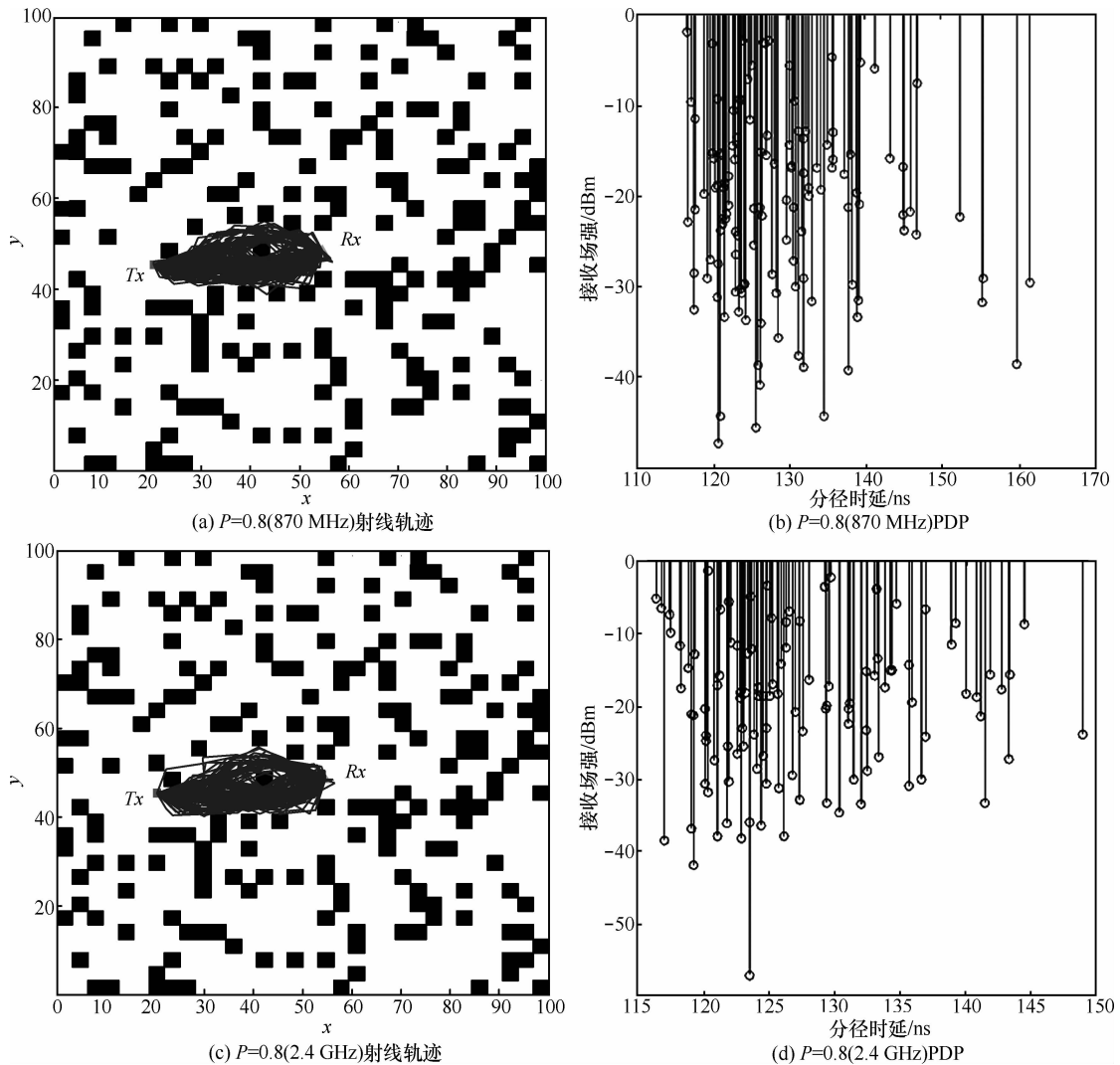


图6 $p=0.8$ 时的随机射线轨迹与 PDP

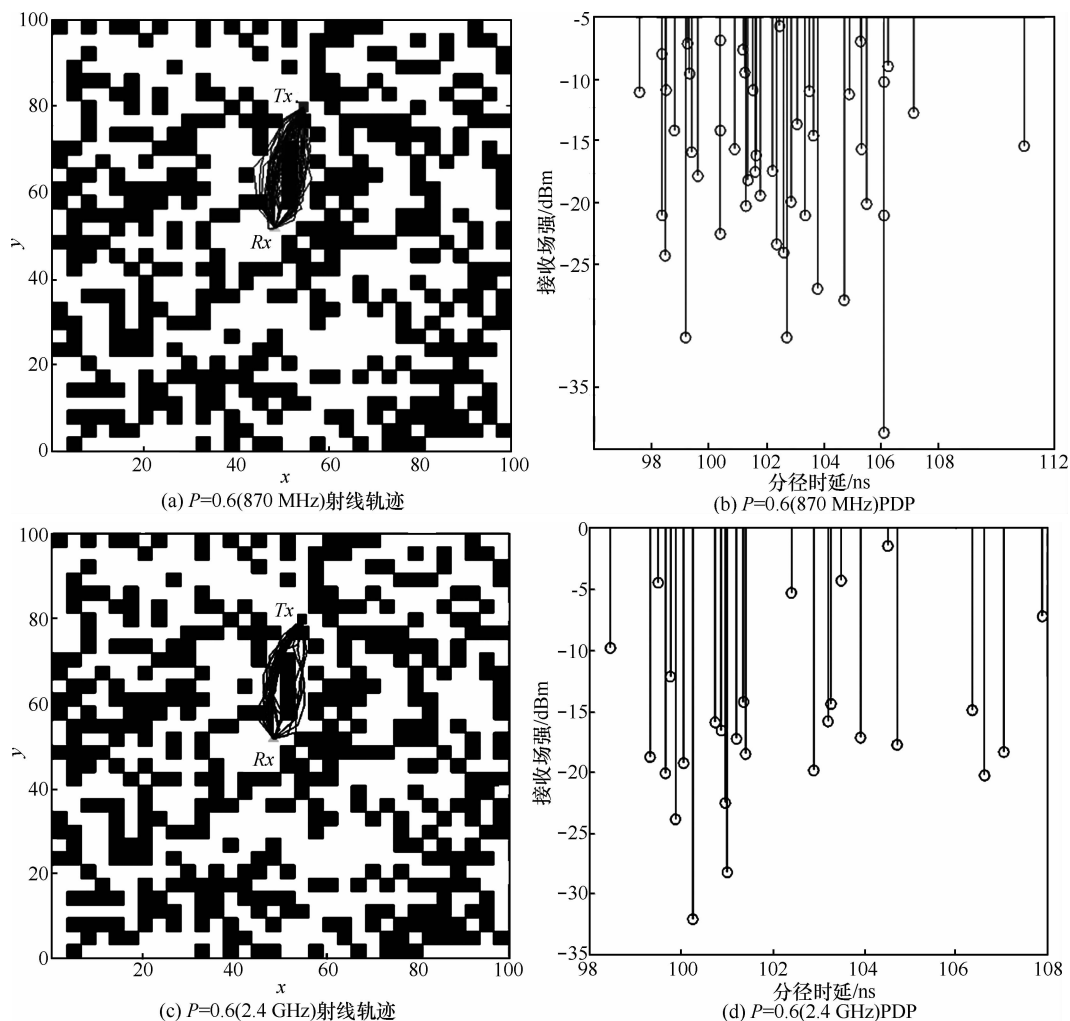
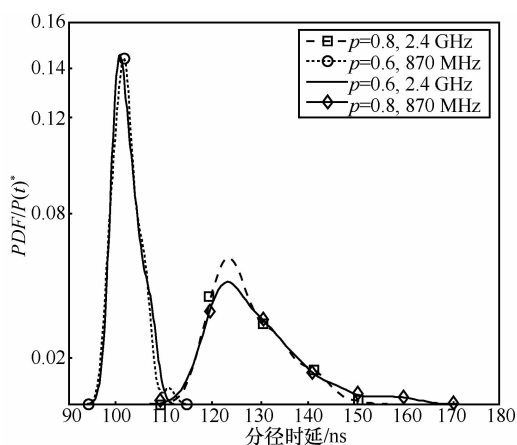

 图 7 $p=0.6$ 时的随机射线轨迹与 PDP


图 8 分径时延的经验概率密度函数

宽大于 870 MHz 载波的的相干带宽,表明了高频载波的扩散程度比低频载波要高。鉴于上述时延扩展均在纳秒级范围,根据参考文献[16]提供的旧金山某处办公室内的实测

数据,1 900 MHz 载波的实际平均时延扩展 $\tau_m=70\sim94 \text{ ns}$,接近于本文在 $p=0.8$ 时的仿真结果,可见系统模型得出的随机射线能够较好地逼近实际数据。

6.5 接收信号的误码率

假定仿真得到的所有多径分量幅度是可分辨的,由于时延 τ 的关系,载波信号经过多径信道后产生的码间干扰与码元间隔有直接的关系。通常,如果输入信号的码元间隔大于 τ_m ,接收信号不存在码间干扰,误码率也就相对小;反之,码元间隔小于 τ_m ,信道会对输入信号产生频率选择性的衰减,产生不同程度的码间干扰,误码率就会升高。

本文通过随机射线模拟特定类型的载波,信道编码采用 NRZ 码,检验不同空网格概率的情况下产生的码间干扰。例如,当输入波形通过图 6、图 7 描述的多径轨迹后,在 R_x 位置形成的冲激响应如下:



$$\left\{ \begin{array}{l} h(t) = \sum_{j=1}^l s_j b(t - \tau_j) \\ \tau_j \in \Gamma_p \\ s_j \in s_p \end{array} \right. \quad (12)$$

其中,输入码元序列 a_n 的长度为 $n, n=1\ 000$;从 T_x 输出的信号波形为 $b(t), b(t) = \sum_n a_n \delta(t - nT_s) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T_s \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$, T_s 为码元间隔, NRZ 码为 $[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$ 。

如图 9 所示, 870 MHz 载波和 2.4 GHz 载波分别在 $p=0.6$ 和 $p=0.8$ 时, 接收信号的误码率随 T_s 变化的差异是显著的。无论何种情况, 当 $T_s > \frac{1}{B}$ 时, BER 均减少至 0, 这表示当输入信号 $b(t)$ 的带宽小于信道相干带宽 B 时, 信道对 $b(t)$ 的衰减是相对平坦的。因而, $h(t)$ 经过解调后, 其误码率相对较低。反之, $BT_s < 1$ 时, 接收信号的同相相加或反向相消的概率增加, 造成误码率的升高。

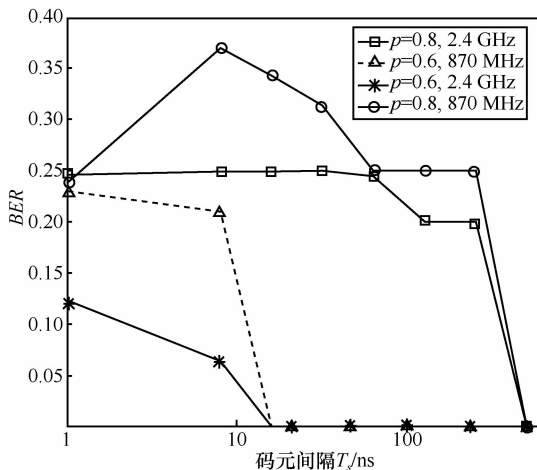


图 9 无噪声情况的接收信号误码率变化

设码元间隔 $T_s=512$ ns, 通过仿真得到不同信噪比 (SNR) 下的接收信号误码率变化, 如图 10 所示。870 MHz 载波在 $p=0.6$ 时的平均 BER 相比于 $p=0.8$ 时的平均 BER , 下降了 18%。其中, $SNR=15$ dB 时的 BER 更是相差 0.118; 同时, 2.4 GHz 载波的误码率与空网格概率 p 无关, 但随着 SNR 增加也逐步减少。

通过上述仿真得到的结论是: 散射体密度较高时, 信道的相干带宽大, 误码率较低; 散射体密度较小时, 信道的相干带宽小, 误码率较大。各个载波的 BER 也逐步收敛于 0.25~0.3, 其结果验证了射线追踪法可以对实际的信道传播环境进行近似模拟, 其路径约束 C2 对于多径轨迹的假设是合理的。

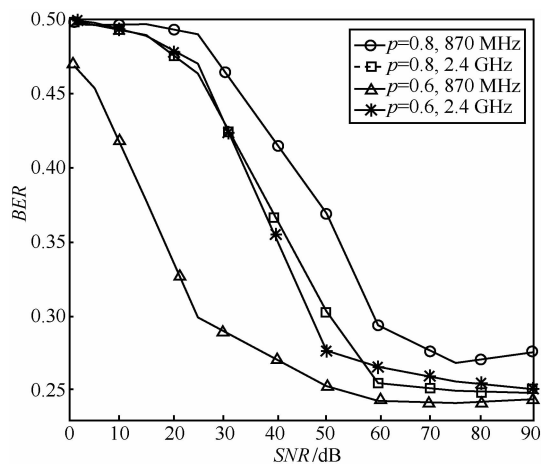


图 10 不同信噪比下的接收信号误码率变化 ($T_s=512$)

6.6 场强的经验概率密度与累计分布函数

根据场强样本 s_p , 统计得出 870 MHz 和 2.4 GHz 载波分别在 $p=0.6$ 和 $p=0.8$ 时的经验场强概率密度 $P(s)^*$ 。如图 11 所示, 就平均的场强 $\bar{s}$ 而言, $p=0.6$ 时的 $\bar{s}$ 大于 $p=0.8$ 时的 $\bar{s}$ 。只要是 $p < 1$, 无论何种载波的分径都会存在一定概率的相干叠加, 相干叠加的路径可以看作一条非直线的绕射路径, 尽管不存在视距传播 (light-of-sight, LOS), 但相对部分射频能量仍存在于这一条稳定的平坦衰落路径, 将其称为主径, 场强分布可以服从莱斯分布, 本文通过莱斯衰落分布拟合主径的功率。

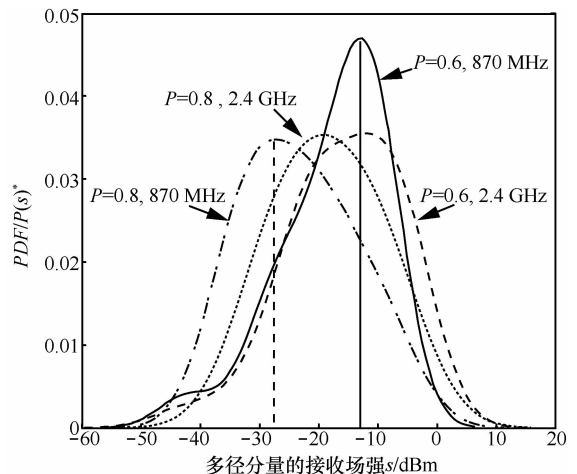


图 11 多径分量场强的概率密度

莱斯分布公式为:

$$p(s) = \frac{s}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(s^2 + A^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{As}{\sigma^2}\right), \quad A \geq 0 \quad (13)$$

σ^2 为相应场强样本 s_p 的方差, 其意义为信号包络的功率; A 为信号主径的幅度峰值; K 为莱斯因子, 表示主径功

率与分径功率之比, $K=10 \lg \left(\frac{A^2}{2\tau_m} \right)$ dB。当 $K \rightarrow -\infty$ dB 时, 主径功率趋于 0, $p(s)$ 退化为 Rayleigh 分布。通过式 (13), 拟合出两种载波的经验累积分布函数 (CDF)。如图 12 所示, 对 2.4 GHz 载波而言, $p=0.6$ 时, 拟合的莱斯分布 K 因子为 9.85 dB, 而 $p=0.8$ 时的 K 因子为 6.14 dB。如图 13 所示, 对 870 MHz 载波而言, $p=0.6$ 时, 拟合的莱斯分布 K 因子为 8.97 dB, 而 $p=0.8$ 时的 K 因子为 5.06 dB。

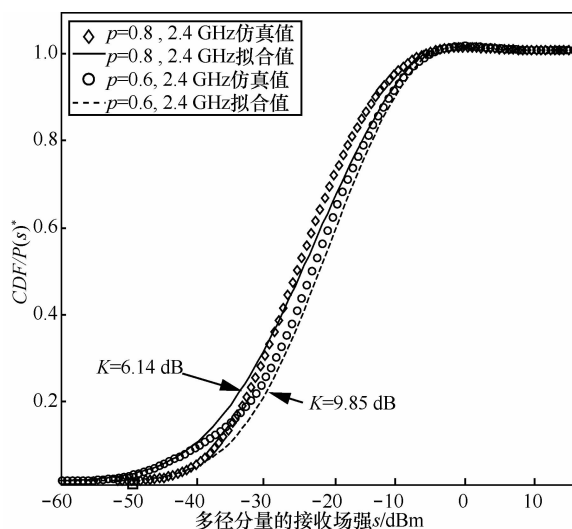


图 12 2.4 GHz 载波的仿真 CDF 和拟合 CDF

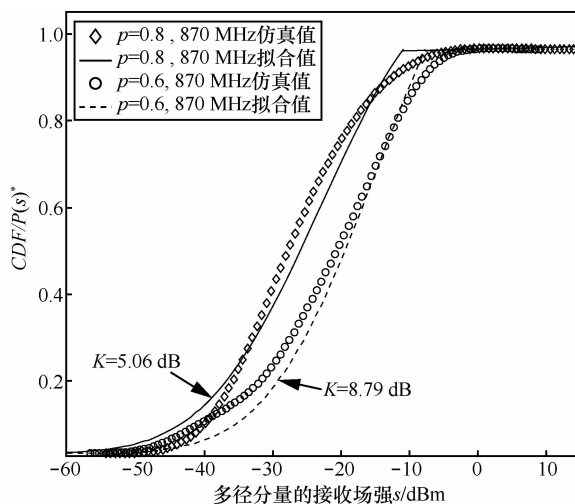


图 13 870 MHz 载波的仿真 CDF 和拟合 CDF

根据上述结果分析得出, 与载波频率无关, $p=0.6$ 时的主径平均幅度显著高于 $p=0.8$ 时的主径平均幅度。就扩散程度而言, $p=0.8$ 时比 $p=0.6$ 时要严重, 结合图 6、图 7 所述的随机射线轨迹, $p=0.6$ 时的 T_x 与 R_x 之间的障碍物布局对波束传送形成了波导。同时, 结合图 10 的结果, K 因子越

高, 其误码率就越低, $p=0.6$ 时的相干叠加概率也高 $p=0.8$ 时, 符合图 8 所示的 $\tau_m(p=0.6) < \tau_m(p=0.8)$ 。因此, p 越大, $P(s)^*$ 越趋向于 Rayleigh 分布。

7 结束语

本文基于随机桥过程样本, 构造随机射线模拟无线信号波束扩散, 实现了窄带信号多径衰落的信号分量轨迹仿真。以 870 MHz 和 2.4 GHz 的窄带波束为实例, 通过仿真实验, 在不同散射体密度以及给定信号的发射和接收位置, 将上述类型波束离散化为随机射线, 射线轨迹由随机桥过程的样本构成, 分析次散射的随机射线到达概率、信道场强的时延分布、误码率以及场强分布的经验密度函数。根据实验结果得出, 信号的多径衰落统计特征与相应的随机射线扩散程度有关, 本文仿真的随机射线轨迹具有的物理意义明确, 能够快速仿真得到特定环境下的特定位置信道特征。

参考文献

- 1 Dardari D, Conti A, Ferner U, et al. Ranging with ultra-wide bandwidth signals in multipath environments. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(2): 404~426
- 2 Dabin A J, Haimovich M A, Grebel H. A statistical ultra-wideband indoor channel model and the effects of antenna directivity on path loss and multipath propagation. IEEE Journal on Selected Area in Communications, 2006, 24(4): 752~758
- 3 Chan C, Jensen A M. A stochastic model of the time-variant MIMO channel based on experimental observations. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2009, 58(6): 2618~2625
- 4 王正斌, 扈罗全. 非波动方法分析二维无线信道的接收功率. 应用科学学报, 2007, 25(3): 239~242
Wang Z B, Hu L Q. Non-wave approach to analysis of received power distribution in 2D wireless channels. Journal of Applied Sciences, 2007, 25(3): 239~242
- 5 扈罗全, 朱洪波. 随机桥方法产生相关时间序列及其应用研究. 通信学报, 2006, 27(7): 27~34
Hu L Q, Zhu H B. Stochastic bridge approach for generating correlated time series and its applications. Journal of Communications, 2006, 27(7): 27~34
- 6 Primak S, Kontorovitch V, Lyandres V. Stochastic Method and Their Applications to Communications: Stochastic Differential Equations Approach. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2004
- 7 ITU-R P 1238-4. Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Indoor Radio Communication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 900 MHz to 100 GHz, 2005



- 8 Simpson J J, Taflove A. A review of progress in FDTD maxwell's equations modeling of impulsive subionospheric propagation below 300 kHz. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 2007, 55(6): 1582~1590
- 9 Leon G, Heras L F. Fresnel-zone-based focused planar array. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014(13)
- 10 Chao C H, Chu C Y, Wu A Y. Location-constrained particle filter human positioning and tracking system. *Proceedings of IEEE Workshop on Signal Processing Systems (SIPS)*, Washington, DC, USA, 2008
- 11 Franceschetti G, Marano S, Palmieri F. Propagation without wave equation toward an urban area model. *IEEE Trans on Antennas Propag*, 1999, 47(9): 1393~1404
- 12 Martini A, Franceschetti M, Massa A. Stochastic ray propagation in stratified random lattices. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2007(6)
- 13 Penkin D, Yarovoy A, Janssen G. A study on communication aspects of two-dimensional large-scale wireless sensor networks using percolation principles. *Proceedings of IEEE Conference on Communications and Vehicular Technology (SCVT)*, Benelux, 2010
- 14 扈罗全, 朱洪波. 超宽带室内多径信道特性的最优化分析. *通信学报*, 2005, 26(10): 143~148
Hu L Q, Zhu H B. Analysis of optimization for properties of UWB indoor multipath channel. *Journal on Communications*, 2005, 26(10): 143~148
- 15 Marano S, Franceschetti M. Ray propagation in a random lattice: a maximum entropy, anomalous diffusion process. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 2005, 53(6): 1888~1896

2015010-11

(上接 2015049-6)

- 3 Gentry C. Fully homomorphic encryption using ideal lattices. *Proceedings of the 41st ACM Symposium on Theory of Computing (STOC)*, Washington, DC, USA, 2009(9): 169~178
- 4 Naehrig M, Lauter K, Vaikuntanathan V. Can homomorphic encryption be practical. *Proceedings of the 3rd ACM on Cloud Computing Security Workshop*, New York, USA, 2011: 113~124
- 5 Atallah M J, Frikken K B. Securely outsourcing linear algebra computations. *Proceedings of the 5th ACM Symposium on Information, Computer and Communications Security*, Beijing, China, 2010: 48~59
- 6 Ma Z. Sparse principal component analysis and iterative thresholding. *The Annals of Statistics*, 2013, 41(2): 772~801
- 7 Bai Z, Li R C. Minimization principles for the linear response eigenvalue problem II: computation. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 2013, 34(2): 392~416

2015049-7

- 16 Devasirvatham D J, Krain M J, Rappaport, D A. Radio propagation measurements at 850 MHz, 1.7 GHz, and 4.0 GHz inside two dissimilar office buildings. *Electronics Letters*, 1990, 26(7): 445~447

[作者简介]



刘磊,男,合肥工业大学计算机与信息学院博士生,主要研究方向为压缩感知和无线传感器网络定位。



夏伟,男,合肥工业大学计算机与信息学院博士生,蚌埠学院计算机科学与技术系讲师,主要研究方向为形式化技术及其应用、无线网络。



韩江洪,男,合肥工业大学教授、博士生导师,主要研究方向为计算机控制、网络与通信、无线网络。

- 8 Al-Vahed A, Sahhavi H. An overview of modern cryptography. *World Applied Programming*, 2011, 1(1): 3~8
- 9 Regev O. On lattices, learning with errors, random linear codes, and cryptography. *Journal of the ACM (JACM)*, 2009, 56(6): 34~43
- 10 Lenstra A K, Verheul E R. Selecting cryptographic key sizes. *Journal of Cryptology*, 2001, 14(4): 255~293

[作者简介]



张丽敏,女,西安外事学院现代教育技术中心讲师,主要研究方向为云计算、网络安全、计算机仿真。