

随机桥过程研究短程无线信道的空时特性

扈罗全 王正斌 朱洪波

(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

摘要: 使用随机桥过程的样本建模短程无线信道中多径分量的传播轨迹。由随机桥过程的样本构造出基本随机变量, 在一定的映射规则下由基本随机变量的样本得到反映无线信道空时特性的多径时延、多径信号抽头增益、多径信号的波达方向等参量。使用随机桥过程的特例布朗桥过程, 分别对散射体均匀分布的信道传播环境和有约束的无线信道传播环境的空时特性进行仿真分析。仿真结果表明, 在这两种传播环境中, 多径分量的波达方向在仰角和水平角维度上均存在一定的局部偏好性, 不满足均匀分布的假设。在仰角-水平角-多径分量到达时延这 3 个自由度的空间中, 多径分量的分布表现出一定的规律性。

关键词: 无线通信; 矢量信道模型; 随机桥过程; 信道特性

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)08-1934-04

Applications of Stochastic Bridge Processes to Modeling Space-Time Characteristics of Short Range Wireless Propagation Channels

Hu Luo-quan Wang Zheng-bin Zhu Hong-bo

(School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: The samples of stochastic bridge processes are employed to model propagation trajectories of Multi-Path Components (MPCs) in short range wireless propagation channels. Under some specialized mapping rules, the basic random variables constructed from samples of stochastic bridge processes are used to model the parameters of space-time channels, such as time delay, gains, direction-of-arrivals, etc. The Brownian bridge process, as a special example of stochastic bridge processes, is utilized to simulate the space-time characteristics both in the environment filled with scatterers randomly and in the special bounded propagation environment. The simulation results demonstrate that the direction-of-arrival of MPCs described by the elevation and the azimuth are slightly locally favorable in two propagation environment. Their distribution can not be regarded as uniform. And there is some regularity in the domain of elevation-azimuth-time delay.

Key words: Wireless communications; Vector channel models; Stochastic bridge process; Characteristics of channels

1 引言

在无线通信技术发展到宽带和超宽带(Ultra-WideBand, UWB)系统以后, 电磁信号在传播过程中出现了许多与以往窄带系统不同的特点, 其中尤以由散射环境引起的成簇现象、多径分量在接收机处的波达方向分布规律等信道的空间特性最为引人关注^[1]。在MIMO(Multi-Input Multi-Output)通信技术中, 无线信道的空间特性尤为重要^[2]。早在上世纪 70 年代就开始研究移动台附近的散射体对接收信号的影响^[3]。后来根据宽带信道测量的实验数据, 文献[4]提出了考虑簇现象的模型, 得到了在时延方向电波分批到达的信道模型。此后文献[5, 6]提出了在角域方向也存在簇现象的模型。多径分量在到达接收天线时, 在时延域(τ)和角域(有两个自由度, θ 和 φ , 分别表示波达方向的仰角分量和水平角分量)上分簇到达

的现象, 叫做成簇现象。目前成簇现象已经成为宽带和超宽带无线信道中空间特性的一个重要研究内容^[7]。在Fresnel区理论中假设等效二次波源在接收天线周围的散射成均匀分布, 把传播环境近似成二维, 再假设等效二次波源在接收机周围的圆形区域内呈全向性分布, 使得 φ 满足 $[0, 2\pi)$ 内的均匀分布^[8]。目前有文献指出, 在移动台周围簇中心的分布, 即 $p(\varphi)$, 在 $[0, 2\pi)$ 内均匀分布, 但是在每个簇内可能服从Laplace分布^[9], 或者服从Gauss分布^[10]。本文在以前工作的基础上^[7, 11], 使用随机桥过程对短程无线信道的空时特性进行研究, 建立了描述无线信道空时二维特性的数学模型。分别使用自由布朗桥过程和有约束布朗桥过程产生的样本建模无线信道中的多径传播轨迹, 对无线信道的空时特性进行仿真和分析, 得到的结论对于研究宽带和超宽带无线信道的特性以及信道建模工作具有重要参考价值。本文结构安排如下: 第 2 节介绍随机桥过程分析无线信道空间特性的理论基础, 引入由随机桥过程构建的基本随机变量, 建模无线信道空间特性的数学模型, 以及空-时二维无线信道冲激响应的唯象模

2006-01-23 收到, 2006-07-14 改回

国家自然科学基金重点项目(60432040, 60572024), 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0519)和教育部博士点基金项目(200509230031)资助课题

型; 第 3 节使用随机桥过程对散射体均匀分布传播环境和有约束环境传播信道的空时特性进行仿真分析, 并进行讨论; 第 4 节给出结论。

2 理论基础

2.1 随机桥过程和基本随机变量

随机桥过程被大量运用在经济数学研究领域^[12]。参照文献[13]给出的包括Brown桥、Bessel桥和Lévy桥的定义, 本文把随机桥过程定义如下:

定义 1 $\forall 0 \leq t \leq T$, 如果随机过程 $\{Y(t, \omega)\}$ 的轨道通过两个固定的点 r_0, r_1 , 即 $\{Y(t, \omega) | Y(0, \omega) = r_0, Y(T, \omega) = r_1, r_0, r_1 \in R, 0 \leq t \leq T\}$, 则该过程就叫做随机桥过程, 记作 $Y_{0, r_0}^{T, r_1}(t, \omega)$ 。两个固定点 r_0, r_1 称作随机桥过程的两个堡, 或两个端点。

随机桥过程可以直接使用随机微分方程来描述, 但在实际应用中, 可以通过下面的方式来构造

$$Y_{0, r_0}^{T, r_1}(t, \omega) = r_0 + X(t, \omega) - \frac{t}{T}[X(T, \omega) - r_1 + r_0] \quad (1)$$

式中 $\{X(t, \omega)\}, 0 \leq t \leq T$ 为任意一个起点在原点的随机过程。如果式(1)中的 $X(t, \omega)$ 为布朗运动, 则构造得到的 $Y(t, \omega)$ 为布朗桥过程^[13]。

记有 n 跳的 L 维随机桥样本为 $\{Y(t, \omega)\}$, 其各个跳跃点构成一个集合, 记作 $\{Y(t_k, \omega), k=0, 1, \dots, i+1\}$ 。取随机桥样本在 L 维空间的Euclid距离作为变量, 记作 Z_i 。由于 Z_i 为随机变量的非线性映射, 因此 Z_i 是随机的^[13], 可以称之为基本随机变量, 其定义如下:

$$Z_i = \sum_{k=0}^i \left\{ \sum_{l=1}^L [Y_l(t_{k+1}, \omega) - Y_l(t_k, \omega)]^2 \right\}^{1/2} \quad (2)$$

式中 $Y_l(t_k, \omega)$ 为随机桥过程样本点 $Y(t_k, \omega)$ 的第 l 维分量。

2.2 随机桥过程建模多径信号的有向传播

对无线信道的传播环境进行较为精确的描述, 对于特定传播环境的短程信道而言是可能的。在此情况下使用随机桥过程建模信号的传播轨迹, 用随机射线对在信道中传播的实际射线进行近似处理, 给研究无线信道及其特性带来了很大的方便^[11]。以布朗桥过程为例, 当传播环境中的障碍物杂乱无章、可以视作均匀分布时, 使用完全随机的自由布朗桥过程建模从发射机发出、被接收机接收、经过 i 次反射过程的电磁波。在特定的传播环境中, 需要使用有约束布朗桥过程建模多径信号的传播。自由布朗桥过程中的布朗桥样本, 如果同时满足以下 3 个条件, 即构成有约束布朗桥过程的样本: (1) 判断该路径的反射点是否在障碍物的表面上。反射点不在反射面上该条路径无效; (2) 判断该路径在途中是否穿过了某个障碍物, 穿过障碍物的路径无效; (3) 判断该路径在传播过程中发生的连续两次反射是否发生在某个障碍物的同一个表面上。如果发生此种情况, 则该路径无效。满足以上约束条件的样本即可形成有约束布朗桥过程。

在对传播环境进行建模以后, 使用随机桥过程建模多径

信号在无线信道中的传播过程, 得到多径信号在信道中的传播轨迹。根据直角坐标和极坐标之间的关系, 令 $\theta \in [0, \pi), \varphi \in [0, 2\pi)$, 并根据直角分量 x, y, z 的符号来判断该方位角 θ 和 φ 所在的象限。判断规则如下:

$$\theta = \begin{cases} \theta, & z \geq 0 \\ -\theta + \pi/2, & z < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\varphi = \begin{cases} \varphi, & x > 0, y \geq 0 \\ \varphi + \pi, & x \leq 0 \\ \varphi + 2\pi, & x > 0, y < 0 \end{cases} \quad (4)$$

根据式(3)和式(4), 使用随机桥样本产生 L 维 Euclid 空间的直角坐标分量后, 就可以得到在信道中传播的多径分量在接收机处的方位角。

2.3 空-时无线信道冲激响应的数学模型

以脉冲无线信道为例。采用双下标来标定多径分量, 则几何随机多反射模型的冲激响应可以表示如下

$$h(t) = \sum_{i=0}^N \sum_{l=1}^{M_i} a_{il} \delta(t - \tau_{il}) \quad (5)$$

式中 $i (=0, 1, \dots)$ 表示某多径分量在信道中经历的反射次数(非直达路径情形时, $i=1, 2, \dots$), $l (=1, 2, \dots)$ 表示发生 i 次反射的第 l 条多径分量, N 是最大反射次数, M_i 是发生 i 次反射的多径分量数, a_{il} 和 τ_{il} 分别表示脉冲信号多径分量的幅度增益和时延。根据文献[5, 6, 9]的分析, 假设信道的时延响应和空间响应统计独立, 则在计及多径分量的空间特性时, 式(5)变为:

$$h(t, \theta, \varphi) = \sum_{i=0}^N \sum_{l=1}^{M_i} a_{il} \delta(t - \tau_{il}) \delta(\theta - \theta_{il}) \delta(\varphi - \varphi_{il}) \quad (6)$$

其中^[11]

$$a_{il} = p_{il} 10^{-\frac{1}{20} \left[\sum_{k=0}^i L_{ilk} + (1-\delta(i))L_a \right]} z_{il}^{-n/2}, \quad z_{il} > 1 \quad (7)$$

$$\tau_{il} = z_{il} / c \quad (8)$$

式(6)–式(8)中, $k (=0, 1, \dots, i)$ 表示发生第 k 次反射, p_{il} 表示接收机收到的某条多径分量由于在传播过程中经历的极性反转而发生的幅度取向, 为一个随机变量, p_{il} 以等概率取+1和-1^[11](在窄带或宽带信道情形时, $p_{il} = \exp(j2\pi z_{il} / \lambda)$); z_{il} 为 Z_i 的第 l 个样本, $z_{il} > 1$ 是远场辐射的要求; L_{ilk} 是第 il 条多径分量与散射体发生第 k 次反射作用造成的损失, 同时也包括该多径分量与接收天线之间的极化失配效应, 单位为dB; L_a 为由于天线的非全向等增益辐射特性而引起的损耗, 单位为dB; $\delta(i)$ 为Dirac- δ 函数; n 为路径损耗指数, 窄带时 $n=2$, 对宽带和超宽带, 由于天线的影晌一般取 $2.0 \leq n \leq 2.5$; c 为光速。

这样由式(3)–式(4)得到在信道中传播的多径分量在接收机处的方位角, 式(7)–式(8)得到多径分量的幅度增益和时延。得到 $\{a_{il}, \tau_{il}, \theta_{il}, \varphi_{il}\}$ 以后, 由式(6)可以得到反映无线信道空时特性的信道冲激响应。

3 仿真分析与讨论

由于不同随机桥过程构造生成的基本随机变量具有相似的统计特性^[14], 因此本文使用布朗桥过程来研究短程无线信道的矢量特性。布朗桥过程可以通过式(1)得到。仿真条件如下: 布朗桥过程的起点在(0, 0, 2), 终点在(18, 0, 2), 单位为米, 两者相当于发射机和接收机的位置。取在传播空间 3 个维度上产生布朗桥过程样本的布朗运动方差向量为 $V=(22, 28, 10)$, V 的大小与所在的传播环境有关, 但关系并不密切; 信道中多径分量的最高反射次数为 4, 样本数量为 230 条左右; $L_{ijk} \sim N(5, 0.5^2)$, $L_a=5$, $N=2.4$ 。

3.1 散射体均匀分布信道的空时特性

首先研究散射体均匀分布时信道传播环境的空时特性。图 1 为仿真得到的随机射线的三维传播轨迹图, 可以看出多径分量分布在各个方向。自由布朗桥过程的样本决定了随机射线表征的多径分量具有这种特性。图 2 描述了仰角和水平角维度的多径分量分布的散点图。由于坐标系的选择使得直达路径分量在(0°, 90°)处(如图 2 中的箭头所指)。可以看出, 在由自由布朗桥过程产生样本建模多径信号传播的情形下, 多径分量的波达方向与全向均匀分布相差较大; 即 θ 和 φ 满足均匀分布并不是一个合理的假设, 这可以从图 3 更清楚地看出来。图 3(a)和 3(b)分别为仰角和水平角的样本概率密度分布, 该图为在相同仿真条件下取 5000 个样本得到的样本概率密度的统计分布。 $p(\theta)$ 服从具有双峰型概率密度分布函数, $p(\varphi)$ 服从以发射机-接收机连线角度为均值的 Gauss 分布。从图 3 可以看出, 由自由布朗桥过程得到的 θ 和 φ , 其分布不满足均匀分布假设。图 4 给出了仰角-水平角-多径分量增益三者之间关系的柄状图, 该图显示出多径分量的波达方向在概率意义上表现为具有一定局部偏好的随机变量。图 5 为接收信号的增益-时延分布。可以看出, 由式(7)-式(8)决定的多径分量的幅度增益和时延是完全随机的, 这与实际无线信道特性的测量结果一致。

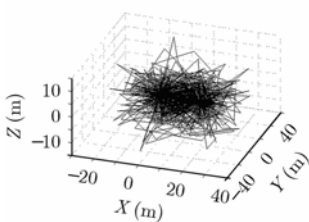


图 1 随机射线的三维传播轨迹图

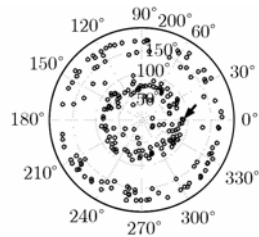
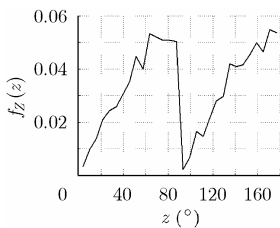
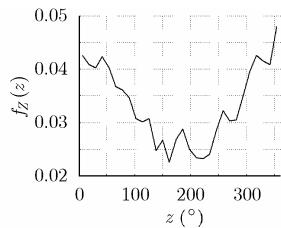


图 2 仰角和水平角维度的多径分量散点图



(a) 仰角样本概率密度分布



(b) 水平角样本概率密度分布

图 3 多径分量波达方向的样本概率密度分布

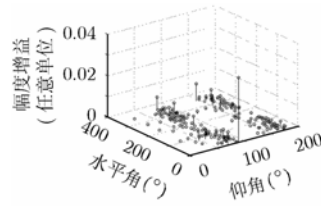


图 4 仰角-水平角-多径分量增益的柄状图

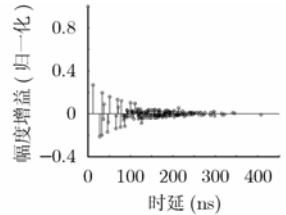


图 5 归一化的接收信号增益-时延分布

3.2 有约束传播环境的空时特性

图 6 为传播环境的三维示意图, 该仿真环境来自实际的测量环境。图 7 描述了仰角和水平角维度的多径分量散点图。从该图可以明显地看出, 在由实际传播环境约束的布朗桥过程产生样本建模多径信号传播的情形下, 多径分量的波达方向与全向分布相差很大。图 8 给出了仰角-水平角-多径分量增益三者之间关系的柄状图, 该图显示了多径分量的波达方向在概率意义上表现为具有明显的局部偏好性。这个结果可以用来对实际脉冲无线信道测量中出现的成簇现象给出概率意义上的解释^[7]。图 9 为接收信号仰角-水平角-多径分量时延三者之间的关系图。在 3 个自由度的空间中, 多径分量的分布表现出一定的规律性, 此结果可以被应用于信道估计^[15]和设计接收机。

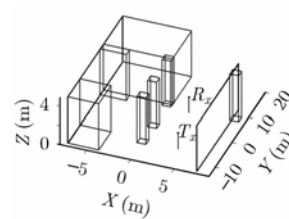


图 6 仿真环境的三维示意图

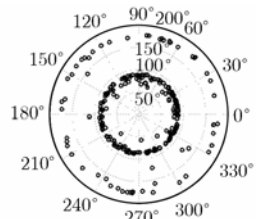


图 7 约束环境下仰角和水平角的多径分量散点图

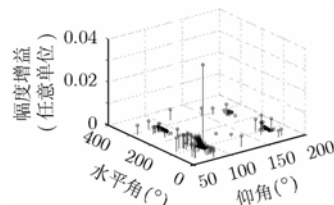


图 8 约束环境下仰角-水平角-增益的柄状图

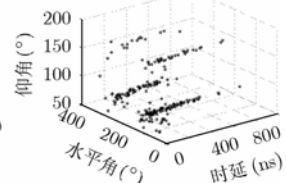


图 9 约束环境下仰角-水平角-时延到达时延分布图

3.3 讨论

根据文献[5,6,9]的分析, 接收信号的能量在角域(水平角 φ 自由度)成双边 Laplace 分布。双边 Laplace 分布概率密度函数的数学表达式如下:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma} e^{-|\sqrt{2}(x-\varepsilon)|/\sigma} \tag{9}$$

式中 σ 为 x 的标准方差, ε 为均值, $x=\varepsilon$ 为概率密度函数的对称轴。文献[10]指出接收信号的能量在角域成 Gauss 分布。图 10 是在相同的标准方差和均值条件下双边 Laplace 分布和 Gauss 分布的概率密度函数的示意图。从图中可以发现, 拉氏分布在均值附近的能量, 远比高斯分布均值附近的能量要集中。经典的 Fresnel 区理论在分析窄带通信系统的传播特性时, 把传播环境近似成二维来处理, 假设等效二次波源在接

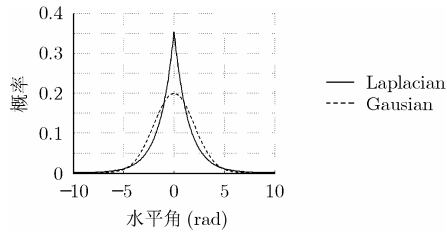


图 10 Laplace 分布和 Gauss 分布比较图

收机周围的圆形区域内呈全向性分布,使得 φ 在 $[0, 2\pi)$ 内满足均匀分布^[8]。本文的仿真结果表明, θ 和 φ 满足的概率分布由实际的环境决定。根据假设得到的 θ 和 φ 的先验概率密度函数,与实际传播环境中的分布偏差比较大。在不严格的情况下, φ 自由度可以近似为均匀分布,而 θ 自由度离均匀分布相差太远。在进行MIMO通信系统性能更高精度的仿真分析时,考虑水平角自由度, $p(\varphi)$ 可以使用以发射机-接收机连线角度为均值的Gauss分布;考虑仰角自由度, $p(\theta)$ 可以使用具有双峰型概率密度分布函数。

4 结束语

本文使用随机桥过程研究短程无线信道的空时传播特性。由随机桥过程的样本构造出基本随机变量,其样本所携带的欧氏距离、跳跃和空间方位等信息,可以构造出多径时延、多径信号抽头增益、多径信号的波达方向等,以此来建模描述信道空时特性的一些特征参量。在一定的仿真条件下,使用布朗桥过程产生的样本建模无线信道中的多径传播轨迹,分别对散射体均匀分布的信道传播环境,以及有约束的信道传播环境的空时特性进行分析。仿真结果表明,随机桥过程的样本能够很好地建模无线信道中多径分量的空时特性。在由自由布朗桥过程描述的散射体完全分布的传播环境中,多径分量的波达方向在仰角和水平角维度上均存在一定的局部偏好性,这种现象在有约束环境中更为明显。此结果可以用来解释在脉冲无线信道中出现的成簇现象。在仰角-水平角-多径分量到达时延这3个自由度的空间中,多径分量的分布表现出一定的规律性,此结果可以被应用于信道估计和设计接收机。在进行MIMO通信系统性能更高精度的仿真分析时,水平角分布可以使用以发射机-接收机连线角度为均值的Gauss分布;仰角分布可以使用具有双峰型概率密度分布函数。

致谢 南洋理工大学的Dr. Y. Chen和作者进行了有益讨论,Dr. S.C. Kiat给作者提供了实验数据。

参 考 文 献

- [1] Foerster J. Channel modeling sub-committee report final. IEEE P802.15-02/368r5-SG3a, 2002.12.
- [2] Tse D and Viswanath P. Fundamentals of Wireless Communications. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2005, chap. 7.
- [3] Lee W C Y. Effects on correlation between two mobile radio base-station antennas. *IEEE Trans. on Communications*, 1973, 21(11): 1214–1224.
- [4] Saleh A A M and Valenzuela R A. A statistical model for indoor multipath propagation. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 1987, 5(2): 128–137.
- [5] Spencer B J Q, Rice M, and Jeffs B, *et al.* A statistical model for the angle-of-arrival in indoor multipath propagation. IEEE Vehicular Technology Conference. Phoenix, Arizona, USA, 1997: 1415–1419.
- [6] Spencer B J Q, Jeffs B, and Jenson M, *et al.* Modeling the statistical time and angle of arrival characteristics of an indoor multipath channel. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2000, 18(2): 347–360.
- [7] 扈罗全, 朱中华, 朱洪波. 超宽带室内多径信道成簇特性仿真与分析. *南京邮电学院学报*, 2005, 25(6): 17–21.
- [8] Dersch U and Zollinger E. Propagation mechanisms in microcell and indoor environments. *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, 1994, 43(11): 1058–1066.
- [9] Cramer R J M, Scholtz R A, and Win M Z. Evaluation of an ultra-wideband propagation channel. *IEEE Trans on Antenna and Propagation*, 2002, 50(5): 561–570.
- [10] Poon A S Y and Ho M. Indoor multiple-antenna channel characteristics from 2 to 8 GHz. IEEE International Conference on Communications. Anchorage, AK, USA, 2003, vol. 5: 3519–3523.
- [11] 扈罗全, 朱洪波. 一种有多反射特性的超宽带信道建模方法. *微波学报*, 2007, 23(1): (待出版).
- [12] Quintos C E and Phillips P C B. Parameter constancy in cointegrating regressions. *Empirical Economics*, 1993, 18(4): 675–706.
- [13] Rogers L C G and Williams D. Diffusions, Markov Processes and Martingales. 2nd ed. London: Cambridge Univ press, 2000, chap. 4.
- [14] 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.
- [15] Carbonelli C and Mitra U. Clustered channel estimation for UWB signals. IEEE International Conference on Communications. Paris, France, 2004, vol. 4: 2432–2436.

扈罗全: 男, 1972年生, 博士生, 研究方向为无线通信、随机分析理论在通信工程中的应用。

王正斌: 男, 1978年生, 硕士, 讲师, 主要研究方向为无线通信与电磁兼容。

朱洪波: 男, 1956年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线通信与电磁兼容、移动通信与超宽带无线技术等。