

随机桥方法研究超宽带无线信道

扈罗全 朱洪波

(南京邮电大学无线通信与电磁兼容实验室 南京 210003)

摘要 该文使用随机桥方法研究超宽带室内多径信道。首先介绍随机桥理论,分析 UWB 室内多径信道的物理基础;然后对 UWB 脉冲信号失真问题和脉冲信号的相位问题进行深入分析。把 UWB 信号在信道中发生的传播损耗和与散射体发生碰撞产生的损耗分开,假设 UWB 多径信号的传播路径为布朗桥过程,同时采用双值相位假设,得到布朗桥模型信道冲激响应。对有金属网格玻璃门反射的走廊环境进行仿真,得到的 UWB 信道功率时延分布与公布的 UWB 信道测量结果一致。

关键词 无线通信,超宽带,信道模型,随机桥,布朗桥过程

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)10-1846-05

Applications of Stochastic Bridge Methods for UWB Wireless Channel

Hu Luo-quan Zhu Hong-bo

(Lab on Wireless Communication and EMC, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract The stochastic bridge methods are employed in the current research for the modeling of UWB indoor multipath channel. Stochastic bridge processes are first introduced, and a physical fundament of UWB indoor multipath channel is analyzed. Then the distortion and the phase distribution of an UWB signal are investigated in details. A Brownian Bridge Model (BBM) for UWB indoor multipath channel is obtained by dividing the energy loss of an UWB signal into two parts: the propagation loss and the reflection loss, treating the UWB indoor multipaths as Brownian bridge process, and adopting two phase assumptions. Using the channel model to simulate a corridor environment of two glass doors with a metal grid inside, several characteristic parameters of UWB indoor multipath channel, such as amplitude responses, reflection index of every multipath, and power delay profiles (PDPs), are obtained, which are similar to the results from other experiments.

Key words Wireless communications, Ultra-wideband, Channel model, Stochastic bridge, Brownian bridge process

1 引言

研究超宽带(UWB)无线信道模型,是整个UWB通信技术中非常重要的内容,目前已经取得大量研究成果^[1-3]。与传统信道相比,UWB信道有许多不同的传播特性,有大量新问题需要研究。比较突出的有:新的多径分量幅度统计规律,复杂的频率行为,非常高的时延分辨率等^[3]。这些问题导致需要研究新的UWB信道模型。传统上研究无线信道的方法,可以分成两类。一类是冲激响应法,这是一种完全随机性的方法;另一类是射线追踪法,这是一种完全确定性的方法。这两种方法在UWB信道研究领域已经得到应用^[3,4]。以冲激响应法为例,通过研究给定发送信号序列和接收信号的统计特性来得出信道的冲激响应。这实际上是一类给定事件的初始状态和终止状态,研究中间过程变化情况的问题。由于信道变化非常复杂,使用类似于射线追踪法这种确定性方法描述信道遇到了困难,因此常常把信号在信道中的传播过程当作一个随机过程,使用随机模型来描述。给定初始状态和终止状态的随机过程是一类特殊的随机过程,称作随机桥过程。

使用随机微分方程,可以构造一系列随机桥过程。在UWB无线信道建模领域,尝试使用随机桥方法进行研究很有意义。事实上使用随机分析方法研究无线信道早有报道^[5-7],这是基于随机微分方程理论对信道的时变/空变等特性进行分析,但目前的主要工作集中在窄带/宽带通信系统的信道理论。

本文针对 UWB 信道的特殊传播性能,使用随机桥方法研究超宽带室内多径信道。该方法从信号在信道中的传播轨迹这一角度来研究,假设 UWB 多径信号的传播轨迹是一个随机桥过程,从随机桥过程的样本函数可以得到各多径分量的幅度和时延,从而得到信道的冲激响应。数值仿真表明,得到的信道特性与他人的实验测量结果很吻合。本文结构安排如下:第2节介绍了随机桥分析方法的理论基础,包括随机桥过程理论,UWB多径信道的物理基础,UWB脉冲信号失真分析和信号相位分析,以及双值相位布朗桥模型的信道冲激响应;第3节使用得到的信道模型进行了仿真分析;第4节给出结论。

2 理论基础

2.1 随机桥过程

随机桥过程被大量运用在经济数学领域^[8]。我们把随机

桥过程定义如下:

定义 1 随机过程 $\{X(t, \omega)\}_{t \in [0, T]}$ 可以由一个随机微分方程来描述, 如果随机过程 $\{Y(t, \omega)\}_{t \in [0, T]}$ 满足 $\forall 0 \leq t \leq T$, 有

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

即 $Y(t, \omega)$ 满足限制条件 $Y_{0, r_0}^{T, r_1}(0, \omega) = r_0, Y_{0, r_0}^{T, r_1}(T, \omega) = r_1$ 。

作为一个特例, 常见的布朗桥过程定义如下^[9]:

定义 2 随机过程 $\{B(t, \omega)\}_{t \in [0, T]}$ 如果满足 $\forall 0 \leq t \leq T$, 有

$$B_{0, x_0}^{T, x_1}(t, \omega) = x_0 + W(t, \omega) - \frac{t}{T} \{W(T, \omega) - x_1 + x_0\} \quad (2)$$

式中 $W(t, \omega)$ 是一个布朗运动, 满足限制条件 $B_{0, x_0}^{T, x_1}(0, \omega) = x_0, B_{0, x_0}^{T, x_1}(T, \omega) = x_1$ 。有 200 跳的布朗桥过程的一条样本函数如图 1(a)所示。布朗桥过程在研究经验分布函数中十分有用。

使用定义 1 可以构造各种随机桥过程。例如, 随机过程 $\{X(t, \omega)\}_{t \in [0, T]}$ 满足如下的随机微分方程:

$$dX_t = W_t dW_t \quad (3)$$

式中 W_t 是一个布朗运动。该方程也称作乘性噪声方程^[9]。由该过程构造的有 200 跳的随机桥样本如图 1 (b)所示。又如, 随机过程 $\{X(t, \omega)\}_{t \in [0, T]}$ 满足如下的随机微分方程:

$$dX_t = -aX_t dt + b dW_t \quad (4)$$

式中 W_t 是一个布朗运动, a, b 为常数。该方程通常叫做 Langevin 方程^[9], 方程的解也被称作 Ornstein-Uhlenbeck 过程。由该方程构造的有 200 跳的随机桥样本如图 1 (c)所示。

2.2 随机桥方法分析 UWB 多径信道的物理基础

把无线信道中的多径看作是随机过程的样本这一假设, 已经被使用在各个研究领域^[10]。在短距离传播环境中, 对 UWB 脉冲信号产生散射作用的物体非常丰富, 例如大范围

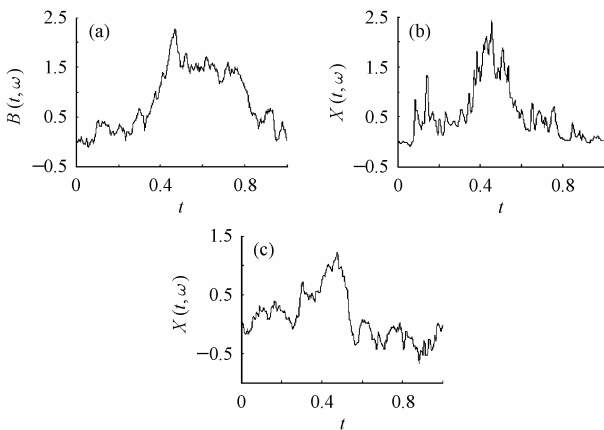


图 1 随机桥过程的样本函数

- (a) 布朗桥过程样本
- (b) 乘性噪声方程构造的随机桥过程样本
- (c) Langevin 方程构造的随机桥过程样本

Fig. 1 Sample functions of stochastic bridge processes

- (a) A sample function of a Brownian bridge process
- (b) A sample function of a stochastic bridge process constructed from multiplicative noise equation
- (c) A sample function of a stochastic bridge process constructed from Langevin equation

的建筑物结构(门, 墙壁, 过道, 屋檐), 路灯, 树丛, 室内的物体(如桌椅), 以及其他日常用品等。由于这些物体的形状一般不规则, 或者某些物体的表面不光滑, 会使得脉冲信号在遇到这些物体发生反射、折射和绕射作用时, 传播轨迹的取向极为复杂。一般 UWB 信号在无线信道中的传播轨迹, 可以用其传播路径上各个反射点的三维坐标来表示。但事实上不可能确切地知道某一条具体射线真实的传播轨迹, 因此可以使用一个随机过程来描述这些传播轨迹。假设发射机和接收机为一个随机桥过程的两个端点, 记多径分量的第 i 次反射点为 $P_i(x, y, z)$, 则 $P_i(x, y, z)$ 为一个随机变量。由各个 P_i 决定的一条传播路径可以看作是随机桥过程的一个样本(或轨道), 这样就可以使用随机桥方法研究 UWB 多径信道。尽管对于某一条具体的射线来说, 这样处理会与实际的传播情况不相符, 但是由于 UWB 信道中有很多可分辨的多径分量, 一般 UWB 信道的可分辨多径分量有几十到数百条左右, 这些多径分量往往相互散开而不重叠。从统计意义上看, 把 UWB 信号的传播过程当作随机桥过程处理是合理的。因此, 在研究 UWB 多径信道时, 如果把发射机和接收机当作一个随机桥过程的起点和终点, 就可以把在信道中传播的 UWB 多径信号的轨迹当作一个随机桥过程来处理。每一条射线都可以看作是该随机桥过程的一条轨道(或一个样本, 一个实现), 一条特定的随机样本对应了不同的时延。在不同时延处的来波, 是运动了不同时间的随机桥过程的样本函数。

2.3 UWB 脉冲信号失真分析

UWB 信号的一个基本特征是以在时域内持续时间极短的脉冲为信号载体进行信息传输。由于 UWB 信号具有非常宽的带宽, 使得信号频谱的低频端和高端的传播特性很不一样, 造成同一个信号的不同频率分量在信道中的衰减情况不一样, 因此极窄脉冲的波形在信道传输过程中失真比较严重。这样刻画 UWB 信号波形失真就非常困难, 比如 Pozar 把脉冲波形的失真当作一个优化问题来处理^[11]。脉冲波形的失真会导致两方面的影响: 信号的幅度发生畸变, 相位发生迟延。此处先考虑幅度失真。大量 UWB 信道的测量结果表明, 接收信号的幅度时延轴上与时延近似成指数衰减关系。电磁波经过自由空间传播时存在损耗, 同时与散射体发生碰撞也产生能量损耗。碰撞产生的能量损耗有很大的随机性, 无法用一个确定的量来描述, 可以引入一个随机变量。Menemenlis 认为信号幅度失真服从 Black-Scholes 方程^[6], 该方程定义如下:

$$dX_t = bX_t dt + \sigma X_t dW_t \quad (5)$$

式中 X_t 为信号的幅度, b 为非噪声影响的线性失真系数, σ 为由噪声等不确定因素影响产生的失真系数, 也叫波动率。图 2 显示了噪声对信号幅度产生影响的一次实现。

对于信号的幅度失真, 也可从另外一个角度进行分析。把脉冲信号与障碍物体发生反射、折射和绕射的作用, 统一由一个反射损耗系数表示, 把在自由空间中传播发生的损耗

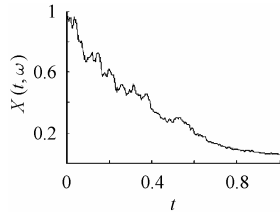


图2 Black-Scholes 方程的一次样本实现
Fig. 2 A realization of Black-Scholes equation

分离出来(此时的损耗系数不一定为 2, 而与特定的传播环境有关)。这样可以根据某条路径经历的反射次数和传播距离, 计算出该多径分量在接收机处的幅度。可以看出, 这种处理方法物理意义明确, 计算比较简单。

2.4 UWB 脉冲信号相位分析

极窄脉冲由于不具有单一频率或单一波长, 在频域中无法使用单一的相位概念来描述信号。在频域中, 对应于信号不同的频谱分量, 有不同的相位分量。Foerster把信号当作一个实的时域信号, 把UWB信号在信道中传播时发生的反转效应使用一个取值为+1/-1 的随机变量来描述, 这相当于假设接收到的UWB信号只有两个相位: 0 和π^[3]。Poazar提出UWB信号的相位是一个随机变量, 服从一个特定的分布^[11]。Chen把发射/接收天线对信号相位的影响都考虑进去, 引入群延迟, 但是没有考虑信道对信号相位的影响^[12]。

信道的相位-频率特性可以用群延迟来描述。群延迟定义如下:

$$\tau(\omega) = d\varphi(\omega)/(d\omega) \quad (6)$$

它属于线性失真范畴。借用信道的群延迟概念, 可以假设UWB信号也存在群延迟。显然群延迟是描述其相位特性的一个很好的参量。

根据式(6)可以得到脉冲信号的群延迟分布。在不考虑发射/接收天线对相位的影响时, τ(ω)是线性的, 使得在信号的频段内某频率分量响应的相位的分布为一个稳定分布。对于一个脉冲信号, 假设有初相位为 0, 频带范围为 3.1~10.6GHz。由于脉冲信号具有一个很宽的频带, 现对其频带进行剖分。例如如果每个子带的带宽为 100MHz, 要求使用 75 个频率样本, 即使用 75 个宽带信号来逼近UWB信号。设各个子带频率从低到高进行排列为: ω₀<ω₁<...<ω_{n-1}<ω_n, 各个子信号的相位延迟为

$$\Delta\varphi = k_i d = k_i c \tau = \omega_i \tau, \quad i=0, 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中k_i为波数, d为传播距离, c为光速, τ为时延。从式(7)可以看出, 脉冲信号在经过了一定的传播时延后, 其各个频段的相位延迟不一样, 但是按照式(6), 其τ(ω)是一个常量。这相当于该信号发生了线性群延迟。图3显示了假设脉冲信号的初始相位为 0, 使用 100 个样本逼近UWB频谱时, 信号经过不同时延(20ns和 40ns)以后, 脉冲信号的相位分布。可以看出, 脉冲信号的相位分布非常复杂, 基本上可以认为在 [0, 2π]内均匀分布。这样即使从发射天线出来的信号有一个对外显示的相位(不妨称为 UWB 信号的代表相位), 接收

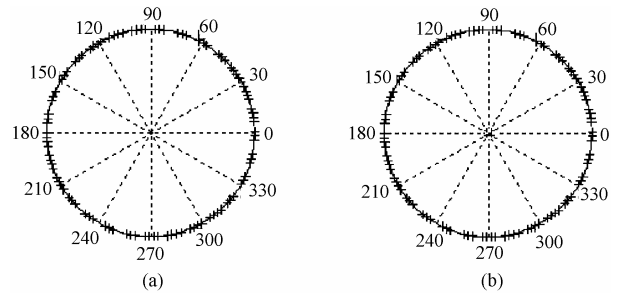


图3 100 个频率样本时脉冲信号的相位分布, “+”表示相位位置
(a)时延 20ns (b) 时延 40ns

Fig. 3 Phase distribution of a pulse signal with 100 sampling frequencies, “+” is the position of a phase
(a)After 20ns time delay (b)After 40ns time delay

机接收到的某个多径分量, 在各个频段内的相位是一个随机变量, 这与 Poazar 的结论相符。

从上面的分析可以看出, 脉冲信号中各个频率分量的相位在 [0, 2π]内均匀分布, 即脉冲信号具有 [0, 2π]内的各个相位分量。脉冲信号对外显示的表征相位(记作φ₀), 可以根据实际问题的需要有各种取值。例如:

(1) 单值相位假设。UWB信号的表征相位只有一个, 即 φ₀=0。常见的高斯脉冲信号经过Fourier变换后为实函数, 没有相位谱, 因此可以认为高斯脉冲信号没有相位, 可以使用单值相位假设。

(2) 双值相位假设。UWB信号的表征相位有两个, 即 φ₀=0, π。Foerster提出的UWB信道模型就是使用这种假设。

(3) 4 值相位假设。UWB信号的表征相位有 4 个, 即 φ₀=0, π/2, π, 3π/2。这种情况是把UWB信号当作复信号来处理。

2.5 双值相位布朗桥模型的信道冲激响应

根据前面的分析, 可以得到双值相位布朗桥模型的信道冲激响应。把发射机和接收机之间 UWB 信号的射线轨迹(或路径)当作布朗桥过程, 发射机和接收机为布朗桥过程的起点和终点, 每一条射线都可以看作布朗桥过程的一条轨道(或一个样本); 在不同时延处的来波, 是运动不同时间的布朗桥过程的样本函数。以反射次数为指标的电磁波在传播环境中经过多次反射, 最后到达移动台的路径, 服从概率选择性原理, 即某条有 n 次反射次数的电磁波束是否存在, 完全由概率来判断。已经发现, 反射超过 7 次以上的射线对接收机基本不起作用。以此为基础, 可以构建 UWB 信道的布朗桥模型 (Brownian Bridge Model, BBM), 它是对 UWB 无线传播信道中散射体完全随机分布情况的近似, 可以认为是一个理想的随机桥信道模型。当相邻多径分量到达接收机的时延间隔小于脉冲在时域的持续时间时, 才考虑脉冲之间发生的叠加。UWB 信道的冲激响应表示如下:

$$h(t) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^{M_i} a_{ij} \delta(t - \tau_{ij}) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^{M_i} p_{ij} \left(\prod_{k=0}^i \gamma_{ijk} \right)^{1/2} \left(\frac{d_{ij}}{d_{01}} \right)^{-n/2} \delta \left(t - \frac{d_{ij} - d_{01}}{c} \right) \quad (8)$$

BBM模型中各种记号的意义说明如下: i ($=0, 1, \dots$) 为某多径分量在信道中经历的反射次数(NLOS情形时, $i = 1, 2, \dots$)。 D_i 为所有发生 i 次反射的多径分量构成的集合。 j ($=1, 2, \dots$) 为 D_i 中第 j 条多径分量, k ($=0, 1, \dots, i$) 表示发生第 k 次反射。 d_{ij} 为 D_i 中第 j 条多径分量行走轨迹的路程长度; d_{01} 表示在LOS条件下的直达距离, 当在NLOS条件下时, d_{01} 表示首条到达射线走过的路程长度。 τ_{ij} 表示对应于路径为 d_{ij} 的多径分量的超出时延, $\tau_{ij} = (d_{ij} - d_{01})/c$, c 为光速; $\tau_{01} = 0$ 表示以首条多径分量的时延为参照。 γ_{ijk} 表示对应于路径为 d_{ij} 的多径分量第 k 次反射发生损耗残留的能量, 与特定传播环境中反射体的介电常数有关, 一般可以将其建模为一个随机变量; $\gamma^{1/2}_{ijk}$ 相当于多径分量发生第 k 次反射脉冲幅度发生的变化。 a_{ij} 表示路径为 d_{ij} 多径分量的幅度, $a_{ij} = p_{ij} \prod_{k=0}^i \gamma_{ijk}^{1/2} \left(\frac{d_{ij}}{d_{01}}\right)^{-n/2}$, 其中 n 为路径损耗指数, 一般 $n \geq 2$; $a_{01} = 1$,

表示以首条多径分量的幅度进行归一化。 p_{ij} ($i=0, 1, \dots; j=0, 1, \dots$) 为接收机收到的某条多径分量的幅度取向, 是一个随机变量, $p_{ij} = +1/-1$ 。 N 是最大反射次数, M_i 是 D_i 中的多径分量数。

式(8)是一个时域离散型UWB信道模型。由于 d_{ij} 是随机变量, a_{ij} 和 τ_{ij} 也是随机变量, 得到的多径分量在时域的分布完全随机, 幅度也随机, 这与实际情况相符。因此, 式(8)得到的信道响应与使用传统的冲激响应方法得到的信道响应相似。

对BBM模型中的布朗桥样本函数进行约束, 就可以很自然地把BBM模型推广到有约束的布朗桥模型(Bounded Brownian Bridge Model, BBBM)。约束条件就是传播环境的几何描述, 使每次射线发生反射的点在障碍物的表面上。在一个室内环境或相近的环境中, 房间的6个面, 以及各个障碍物的表面, 都是能够使射线发生反射、折射或绕射作用的面。

2.6 随机桥方法建立UWB室内多径信道的仿真算法

在式(8)表示的UWB信道模型中, 有4个关键参数:

$\sum_{i=0}^N M_i, d_{ij}, \gamma_{ijk}, n$ 。前面两个参数可以由合适的布朗桥样本来决定, 只依赖于传播环境的几何特性; 后面两个参数可以通过实验测量得到。对于仿真而言, 一般 $\gamma_{ijk} \sim N(0.6, 0.05^2)$, $n = 2.0 \sim 3.0$ 。将仿真的UWB脉冲波形与得到的信道冲击响应进行卷积运算, 就可以得到仿真的功率时延分布。使用随机桥方法建立UWB室内多径信道的仿真算法描述如下:

- (1) 建立传播环境的几何描述数据库和障碍物反射特性数据库, 确定发射/接收天线的位置;
- (2) 选择某个随机桥过程(如布朗桥过程), 产生合适的样本函数作为UWB多径分量的轨迹;
- (3) 判断该样本函数是否是BBBM中的有效路径。需要分3步确定, 约束条件如下:

- (a) 判断该路径的反射点是否在障碍物的表面上, 不在反射面上该条路径无效;
- (b) 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;
- (c) 判断该路径在途中是否穿过了某个障碍物同一个表面2次或2次以上, 如果发生此种情况, 则该路径无效;
- (4) 选择样本函数的最高反射次数和初始射线总数, 按照式(8)得到信道冲激响应的各个参数。

3 仿真结果与分析

描述UWB信道特性的参数很多, 典型的如RMS时延扩展, 功率时延谱, 多径分量数(有不同的定义, 例如在峰值多径分量10dB以内的多径到达数)^[3]。现使用BBBM模型对UWB信道的功率时延谱进行仿真分析, 因为功率时延谱可以反映出信道最重要的一些信息。

Hamalainen等对走廊环境的UWB信道进行了测量^[2], 其走廊环境如图4(a)所示。走廊高度为3.3m, 天线高度为1.1m。图中在END2和END3处各有一个金属网格的玻璃门, 是为了让脉冲信号能够穿过。假设 $\gamma_{ijk} \sim N(0.6, 0.05^2)$, $n = 2.5$; 接收信号为高斯二阶导数, 脉冲持续时间 $T_e = 0.5$ ns, 接收到的射线数目约为190条(此处射线数目较多是因为该散射环境的尺寸比较大)。由于该环境比较规则, 故使用低反射次数的假设, 此处取最高反射次数为3。图4(b)为发射机和接收机之间脉冲信号的三维行走轨迹, 图4(c)为信道幅度响应, 图4(d)为信道功率时延谱。在图4(d)上箭头所指处可以很清晰地看到有5个峰, 亦即5个簇。这5个峰的时延分别在53ns, 70ns, 107ns, 123ns, 160ns。Hamalainen认为这5个峰是由END1, END2和END3产生的一次反射与二次反射造成的,

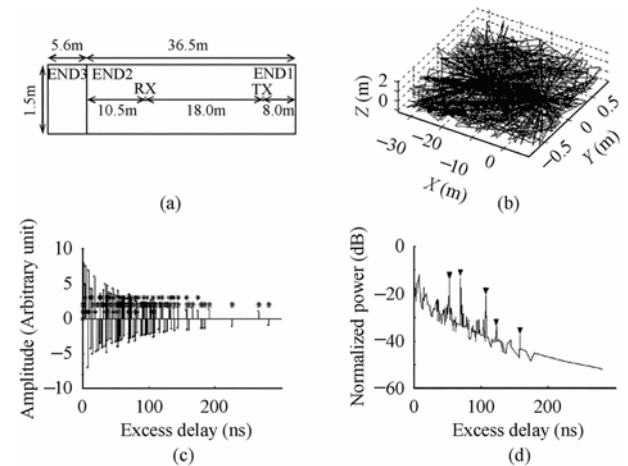


图4 仿真环境及其数值结果
 (a) 传播环境示意图 (b)信号的三维轨迹 (c)信道幅度响应, “*”表示对应于该时延多径分量的反射次数 (d)信道功率时延谱
 Fig.4 Simulation environment and numerical results
 (a)Scheme of propagation environment (b) Propagation trajectories of signals (c)Amplitude response of channel, “*” corresponding to the reflection number of a MPC (d) Power delay profile

没有考虑高次反射, 以及不同反射次数的电磁波之间的叠加效应产生的影响。在 BBBM 模型中很自然地考虑了这些影响因素, 得到的功率时延谱特性, 与 Hamalainen 给出的测量结果一致。这表明 BBBM 模型可以成功地描绘随机散射环境的信道特性。

使用随机桥方法, 可以对一些实际室内传播环境非常方便地进行仿真, 得到 UWB 信道的功率时延谱, 然后在此基础上可以得到信道的其他特征参数。不像冲激响应法对于测量条件要求很高, 也不像射线追踪法那样计算成本非常大。与现有的其它 UWB 信道模型(典型的如 S-V 模型^[13] 或其改进模型^[3])相比, BBBM 模型不需要专门针对 UWB 信道中的成簇现象进行建模, 信道功率时延分布出现的能量尖峰可以由经过不同传播轨迹的多径分量叠加自动产生, 大大简化了信道模型的结构。通过调整相应的布朗桥样本函数, 可以得到与实验结果非常一致的信道功率时延分布, 这对于通信系统性能的评估具有重要意义。使用 BBBM 得到的多径分量在时域的分布和幅度大小是完全随机的, 与实际情况相符, 这在其它的一些模型中无法实现^[1]。

4 结束语

本文研究使用随机桥方法对 UWB 室内无线信道进行建模。在分析 UWB 多径信道的物理基础后, 将 UWB 信号多径传播轨迹视作随机桥过程的样本。使用随机桥过程来逼近 UWB 射线的传播轨迹, 给研究 UWB 信道的建模工作带来了许多方便。从 Black-Scholes 方程和产生能量损耗的因素两个方面对 UWB 脉冲信号失真问题进行分析, 从方便建模出发把 UWB 信号在信道中发生的传播损耗和与散射体发生碰撞产生的损耗分开来处理。此外对脉冲信号的相位也进行深入分析, 发现可以根据实际问题的需要使用各种相位假设, 本文采用双值相位假设, 因为这种处理方式简洁, 并且与他人一致。使用随机桥方法得到的 UWB 信道布朗桥模型的冲激响应, 与使用传统的冲激响应方法得到的信道响应相似, 信道模型的结构比较简单, 特征参数的选择能够与实际情况相符。使用该模型对有金属网格玻璃门反射的走廊环境进行仿真, 得到具有明显成簇现象的 UWB 信道的功率时延谱, 峰值位置与已公布的 UWB 信道实测结果一致。

致谢 Vladimir Lyandres 教授, 胡泽春博士和作者进行了有益讨论。

参 考 文 献

- [1] Cassioli D, Ciccognani W, Durantini A. UWB Channel Model Report. Ultrawaves, W03-03-0012- R03.
- [2] Oppermann I, Hamalainen M, Iinatti J. UWB Theory and Applications. Chichester: John Wiley & Sons, 2004: 9 – 38.
- [3] Foerster J. IEEE P802.15-02/368r5-SG3a, 2002.12.
- [4] Yao R, Zhu W, Chen Z. An efficient time-domain ray model for UWB indoor multipath propagation channel. Vehicular Technology Conference, VTC 2003-Fall: 1293 – 1297.
- [5] Kontorovitch V, Lyandres V. Stochastic differential equations: an approach to the generation of continuous non-Gaussian processes. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1995, 43(10): 2372 – 2385.
- [6] Menemenlis N. Stochastic Models for Multipath Fading Channels. [Ph. D. Dissertation], McGill University, 2002.
- [7] Charalambous C D, Menemenlis N. General non-stationary models for short-term and long-term fading channels. EUROCOMM 2000, IEEE/AFCEA, April 2000: 142 – 149.
- [8] Quintos C E, Phillips P C B. Parameter constancy in cointegrating regressions. *Empirical Economics*, 1993, 18(4): 675 – 706.
- [9] Kloeden P E, Platen E, Schurz H. Numerical Solution of SDE Through Computer Experiments. New York: Springer-Verlag, 1994: 69 – 90.
- [10] Trump T, Ottersten B. Estimation of nominal direction of arrival and angular spread using an array of sensors. *Elsevier Signal Processing*, 1996, 50(1): 57 – 69.
- [11] Pozar D M. Waveform optimizations for ultra-wideband radio systems. *IEEE Trans. on AP*, 2003, 51(9): 2335 – 2345.
- [12] Chen Z, Wu X, Li H, et al.. Considerations for source pulses and antennas in UWB radio systems. *IEEE Trans. on AP*, 2004, 52(7): 1739 – 1748.
- [13] Saleh A A M, Valenzuela R A. A statistical model for indoor multipath propagation. *IEEE J. on Select. Areas Commun.*, 1987, 5(2): 128 – 137.

扈罗全: 男, 1972 年生, 博士生, IEEE 学生会员。从事无线通信与电磁兼容的研究。

朱洪波: 男, 1956 年生, 教授, 博士生导师, IEEE 会员, 南京邮电大学无线通信与电磁兼容实验室主任, 主要从事无线通信与电磁兼容、移动通信与射频无线技术等方面的研究。