

引用格式: 曹小东, 汪小君, 姜弢. 基于随机桥理论的海面微波信道建模方法[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(2): 60-64.

CAO Xiaodong, WANG Xiaojun, JIANG Tao. A modeling method of sea surface microwave wireless channels based on stochastic bridge[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(2): 60-64.

基于随机桥理论的海面微波信道建模方法

曹小东, 汪小君, 姜弢

哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要: 针对典型海况下的海面无线电波传播及微波信道建模问题, 基于陆地多径传播环境下的随机桥过程建模理论, 提出一种二维海面微波无线随机信道建模方法。首先, 基于P-M海浪谱理论建立典型海况下的海浪电磁仿真模型; 然后, 采用不同的海况模型进行计算, 得到随机电波射线样本数据, 分析样本数据并确定随机信道模型参量的数字特征, 建立海面微波波段随机多径信道模型; 最后, 将仿真数据、实验室测试数据和外场测试数据进行对比。结果显示, 所建立的随机信道模型有效, 可为复杂电磁环境中船用电子设备接收波形的建模与仿真提供有效的理论手段和技术方案。

关键词: 随机桥; 信道建模; 随机射线; 海浪模型; 电磁仿真

中图分类号: U665.26; TN92

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2015.02.011

A modeling method of sea surface microwave wireless channels based on stochastic bridge

CAO Xiaodong, WANG Xiaojun, JIANG Tao

College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: According to the wireless wave propagation and microwave channel modeling in typical sea conditions, a microwave wireless channel model on two dimensional sea surface in a random environment is established in this paper based on the modeling theory of stochastic bridge for fixed communication environment simulation. Firstly, based on the P-M spectrum of the sea surface wave, electromagnetic simulation models in sea conditions ranging from 0 to 6 grade have been established. Then, by analyzing the random ray sample data collected under different sea conditions, the digital characteristics of key parameters of stochastic bridge processes are determined, and the microwave band stochastic multi-path channel model on sea surface is constructed. Finally, the analysis of radio wave propagation characteristics is conducted using the proposed channel model. The simulation and laboratory experimental data show that the characteristics of the proposed channel model are in agreement with tested results. In brief, this paper provides a valid theoretical method and technique proposal for the modeling and simulation of the received waveform of key electronic equipment on ship in complicated electromagnetic environment.

Key words: stochastic bridge; channel models; random rays; ocean wave model; electromagnetic simulation

收稿日期: 2014-11-10

网络出版时间: 2015-3-30 15:16:00

基金项目: 国家级重大基础研究项目; 国家部委基金资助项目; 哈尔滨市科技创新人才专项基金资助项目(2013RFXXJ083); 哈尔滨工程大学中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(HEUCF131602)

作者简介: 曹小东, 女, 1991年生, 硕士生。研究方向: 微波通信信道建模仿真。E-mail: caoxiaodong_1@hrbeu.edu.cn

汪小君, 女, 1988年生, 博士生。研究方向: 海面电磁散射建模仿真。E-mail: wangxiaojun@hrbeu.edu.cn

姜弢(通信作者), 男, 1973年生, 博士, 教授。研究方向: 电波传播及电磁环境建模与仿真。

E-mail: jiangtao@hrbeu.edu.cn

0 引言

针对海面杂波和舰船上层建筑影响条件下的舰船上层建筑及其周围电磁环境定量分析问题,特别是接收设备天线端的波形预测和估计,对海面电波传播的时域建模理论和技术提出了新要求。无线电波在海上传播时,由于海上通信环境较为复杂,且接收信号动态范围大,因而也就决定了海上通信系统对信道模型的依赖性较大,所以只有对通信信道进行有效的建模,才能设计出可靠、实用的通信系统。

传统超电大尺寸船舶目标电磁环境建模技术手段是基于电磁快速算法下的频域场强估计,以及后续有约束条件下的频域时域转换,难以直接给出设备天线端到达信号的波形信息。常见的无线信道建模方法可以分为2类:一类是统计模型,它总结了传输环境中的统计特性,包括无线电波传播场景,以及随机射线发生的反射、衍射及散射的次数等;另一类是确定性的射线跟踪模型,它利用从场景中各个传播“节点”处传到接收机的射线进行直接计算,然后在接收点分析到达的射线,从而得到接收信号的幅度和相位特性^[1]。相对于统计模型,确定性模型建模精确,能够可靠地预测系统特征,但运算复杂;统计模型可以捕获信道响应的瞬间变化且计算难度低,但实验条件要求很高。很显然,集成2种建模方式的新方法已成为无线系统信道建模的研究热点。

1999年,Oestges等^[2]提出使用经典 Rician 模型对陆地的移动卫星信道进行建模,该模型融合了2种建模方式的优点,既能准确描述传播环境的特点,又可减低射线跟踪算法的计算时间。该类模型是基于陆地各种环境而建立的,是一种准动态传播环境,即障碍物(建筑物或地形)静止、接收设备移动。而对于海面上的传播环境,障碍物(海浪或上层建筑)和接收设备都是移动的,属于完全动态环境,故此模型并不能完全适用。在此基础上,无线通信的诸多研究领域已经使用随机桥信道建模方法,该方法是将电磁波的传播路径等效为一个随机过程,其随机过程的数学特性完全由传播环境决定,可建模成完全动态环境。

基于此,本文拟研究将随机桥过程理论引入海面微波信道建模领域,分析计算典型海况下的微波波段电波传播多径特性,建立多径信道传播环境的电磁仿真模型和统计分析模型,进而得到描述无线信道的海面随机多反射的冲激响应数学模型,以为海面信道空时特性分析提供支撑^[3]。

1 理论基础

海浪的反射、绕射和散射机理及其作用集中体现在研究过程中所采用海浪谱模型生成的数据,以及基于上述数据所建立的海浪电磁仿真模型上。在构建海面无线电多路径传输模型方面,海浪电磁模型及相关计算将起关键作用^[4]。

1.1 随机海浪理论

海面是一个自然形成的复杂动态粗糙表面,其形成与海面风速有关。随机海面生成方法大多是基于海浪功率谱模型,其中常用的方法是基于线性理论,即认为海浪是一系列正弦波的线性叠加,这些正弦波的振幅、频率、相位和方向均为随机量,进而在叠加之后生成随机海面^[5]。

一般采用能很好地表征真实风场及海面波的P-M谱来模拟随机海浪^[6]。P-M谱的功率谱密度可以表示为

$$s(\omega) = \alpha \frac{g^2}{\omega^5} \exp \left\{ -1.25 \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^4 \right\} \quad (1)$$

式中: α 为系数, $\alpha=0.0081$; g 为重力加速度, $g=9.8 \text{ m/s}^2$; ω 为P-M谱的频率; ω_0 为P-M谱的谱峰频率。

1.2 海面随机多径信道建模

在传播过程中,电磁波遇到障碍物会发生反射、折射和绕射,因而信号传播途径比较复杂。一般情况下,是用信号在传播路径上的反射点的空间坐标来近似表示信号在无线信道中的传播轨迹^[7]。而实际上,电磁波海面传播射线的真正传播路径并不确定。在移动通信研究领域,把无线信道中的多径当作是随机桥过程的一个样本已得到广泛应用。

随机桥过程的定义为:如果随机过程满足 $\forall 0 \leq t \leq T$,则有

$$Y_{0,r_0}^{T,r_1}(t, \omega) = r_0 + X(t, \omega) - \frac{t}{T} [X(T, \omega) - r_1 + r_0] \quad (2)$$

即随机桥过程 $Y(t, \omega)$ 满足限制条件 $Y_{0,\omega}^{T,\omega}(0, \omega) = r_0$, $Y_{0,\omega}^{T,\omega}(T, \omega) = r_1$ 。随机过程 $X(t, \omega), t \geq 0$ 可以由随机微分方程来描述,若上式中的 $X(t, \omega)$ 为布朗运动,则 $Y(t, \omega)$ 为布朗桥过程。

无线多径信道的随机桥过程建模方法如下:将发射机和接收机作为随机桥过程的起点和终点,多径分量的第 i 次反射点记为 $P_i(x, y, z)$,则 $P_i(x, y, z)$ 即为一个随机变量。每个 P_i 值所确定

的路径都可以当作是随机桥过程所产生的一个样本^[8]。从统计学的角度来说,将信号传播的多个路径作为随机桥过程产生的样本进行分析与理论相符。

图1所示为一个起点为(6,6,0),终点为(14,14,9)的低跳跃次数三维布朗随机桥样本,表示从起点(辐射源)分别经过1次、2次和3次反射后到达终点(接收天线)的过程。

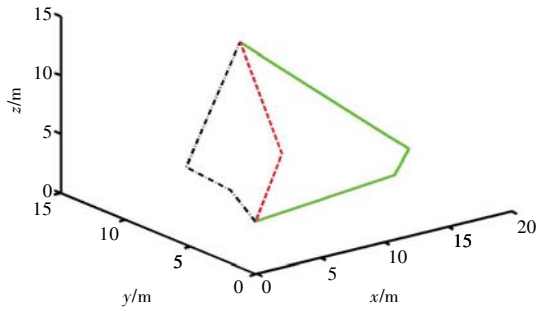


图1 布朗桥过程低跳跃次数样本
Fig.1 The samples of Brown bridge process with different number of reflection

1.3 海面随机信道冲激响应

布朗桥随机建模结合了确定性的射线追踪法和统计模型的一些特征。不同随机射线的路径长度会引起不同的时延以及相位的延迟。通过随机射线的路径长度及传播损耗,可以确定其幅度,进而可以得到无线电波传播过程中随机多反射模型的冲激响应,建立无线信道模型^[9]。

1.3.1 多径时延和相位延迟

将布朗桥样本在 L 维空间的欧几里得距离作为一个变量,记为 Z_i ,它是布朗桥样本的非线性映射,表示无线信道中传播路径的长度,是一个服从瑞利分布的随机变量。定义 Z_i 的表达式如下:

$$Z_i = \sum_{k=0}^i \left\{ \sum_{l=1}^L [Y_l(t_{k+1}, \omega) - Y_l(t_k, \omega)]^2 \right\}^{1/2} \quad (3)$$

式中, $Y(t_k, \omega)$ 是由布朗桥过程所产生的时间序列样本。根据不同的布朗桥方差及数量,可以生成不同的无线电波传播路径样本。当传播环境为海面时,所采用的方法是通过电磁模型仿真计算获取大量仿真数据,进而确定随机变量的数字特征及其概率分布。

参考文献[10],对于反射次数为 i 次的第 j 条多径分量的时延 τ_{ij} ,可以表示为

$$\tau_{ij} = (z_{ij} - z_{01})/c \quad (4)$$

式中: z_{ij} 为第 ij 条多径分量的轨迹长度; c 为电磁波传播速度。在微波信道情况下,电波传播的波长为 λ ,信道对多径分量的相位影响为 p_{ij} ,其

定义如下:

$$p_{ij} = \exp(j2\pi z_{ij}/\lambda) \quad (5)$$

1.3.2 多径分量的幅值

由于输入信号可能具有较宽的频率范围,因而可将输入信号理解为包含多个频率的一束电波。假设所有的多径分量都经历 d^n 的自由空间路径损失^[11],在全向天线条件下,信道中经历 i 次反射的第 j 条多径分量的幅值表达式为

$$|a_{ij}| = \left(\frac{z_{ij}}{z_0}\right)^{-n/2} 10^{-\frac{1}{20}[\sum_{k=0}^i L_{ijk} + L_a + L_r]} \quad (6)$$

式中, $i=(0,1,2,\dots)$,表示在信道中某个多径分量传播时的反射次数,其中 $i=0$ 表示直射路径; $j=(1,2,\dots)$,表示发生 i 次反射情况下第 j 条的多径; $k=(1,2,\dots,i)$,表示第 ij 条多径分量发生的第 k 次反射; n 为路径损耗指数,是发射天线与接收天线之间由于传播环境而引入的损耗量,信号在自由空间传播时,取 $n=2$; L_a 为大气吸收损耗,主要是电波通过大气时由氧气和水蒸气的吸收所致,它与温度、大气压强、电磁波频率和传播距离有关; L_r 为雨雾损耗,与降雨强度有关,通常由降雨量衡量,除此外,其还与电波频率及极化方式有关,通常对于 10 GHz 以上频率的电磁波而言,雨衰影响不可忽略; L_{ijk} 表示第 ij 条多径分量和障碍物发生第 k 次反射时的反射损耗。

要计算反射损耗 L_{ijk} ,首先需计算电磁波在海面上的反射系数。当无线电波从大气入射到海水中,且电波的波长比海浪的波长小很多时,就会发生镜面反射^[12]。反射系数 Γ 决定了反射波电场强度的大小,其与电波的入射角和极化方式以及海水的介电常数有关。

1.3.3 随机多反射模型的冲激响应

根据多径分量的时延以及幅度,由文献[5]可知,信道随机多反射模型的冲激响应 $h(t, \tau)$ 可以表示为

$$h(t, \tau) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^{M_i} p_{ij} |a_{ij}| \delta(\tau - \tau_{ij}(t)) \quad (7)$$

式中, M_i 为多径分量传播时反射次数为 i 次的路径数量。

2 信道建模及仿真分析

采用随机桥随机建模方法对无线信道进行建模,选择的仿真参数如下:海水盐度 35%,温度 15 °C,3级海况,入射波为平面波,入射余角为 2°,电波传播直射距离为 10 km,接收天线的海拔高度为 10 m。

2.1 建立海浪模型

根据海况级别查表确定风速,通过频谱数和角度数改变海浪特征,依据系统计算能力,设定海面仿真面积为 500 m×500 m。通过计算和处理,可得到局部海浪模型,如图2所示。

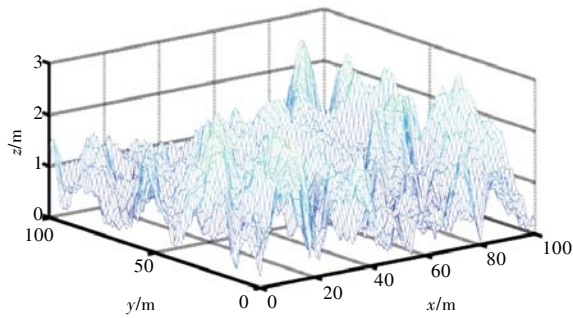


图2 3级海况下的二维海浪模型

Fig.2 The simulation diagram of two dimensional ocean wave model of sea state 3

2.2 随机桥信道建模结果分析

将二维海浪模型进行电磁模型简化和优化,并基于高频近似算法 GTD(Geometrical Theory of Diffraction)进行电磁仿真;然后,将电磁仿真无线电波在典型海况下的多径反射作为随机桥的样本,计算得到随机桥过程的方差及射线数量。

电磁仿真结果为:反射1次的随机路线有493条,反射2次的有355条,反射3次的有148条。

直射路径仅需考虑自由空间的传播损耗,而对于多径传输,在空间传播损耗的基础上还需考虑反射损耗。图3所示为不包括直射路径的多反射路径的随机冲激响应,图中的幅度为相对于直射信号的归一化幅度,时延为多反射路径相对直射路径(时延为0)的时延。多径分量通过直射以及反射到达接收点的信道的冲激响应,其幅度增益和时延完全随机,对直射路径的干扰较大。

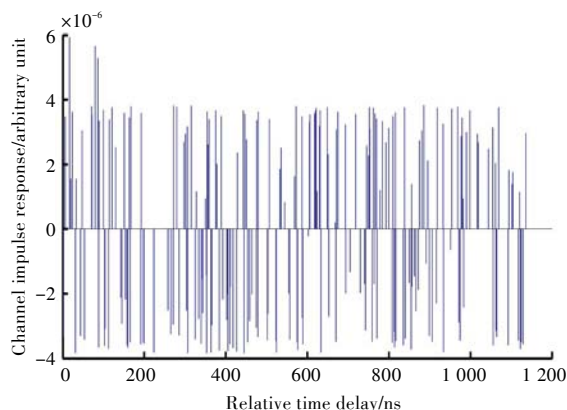


图3 多径分量的冲激响应

Fig.3 The impulse response of multipath components

为了验证所建立的模型,采用2种途径进行了实验验证。

途径1 计算信道输入信号与输出信号场的比值,并与现有文献中海面电磁散射特性中的RCS值及外场测试结果进行对比。入射波频率为14 GHz,通过随机桥信道建模计算的散射系数为-7.5 dB,外场测试结果为-5 dB^[13],计算结果与外场测试结果基本一致。表明随机桥模型可以描绘海面散射环境的信道特性。

途径2 实测验证。在某试验区进行了测试,选取了60个典型位置进行测量,部分数据如表1所示。

表1 典型位置场强的计算值与测试值对比

Tab.1 Comparison of the calculated values and test values of the typical location field

Location	Simulation values/dB	Measured values/dB	Error/dB
A20	25.970 774	26.411 234	-0.440 46
A30	29.693 967	23.064 098	6.629 869
A40	26.525 631	22.996 694	3.528 937
A50	18.142 367	27.189 12	-9.046 753
A60	27.580 596	26.689 075	0.891 521
B20	30.599 611	27.082 169	3.517 442
B30	15.845 522	21.598 089	-5.752 567
B40	21.276 534	27.640 341	-6.363 807
B50	31.834 278	24.619 191	7.215 087
B60	26.327 942	26.672 975	-0.345 033

根据测量数据统计分析,仿真计算值与测量值之间的误差约为3.3 dB,已基本达到建模精度要求。

3 结 语

本文将陆地移动信道随机桥建模的方法推广到二维海面微波信道建模,对二维海面无线信道电波传播的多径特性进行了研究。仿真和实测结果表明,所建立的信道模型能够以较高的精度反映信道的本质特性,可以有效仿真接收端信号波形,证明了采用随机桥理论建模二维海面微波信道的可行性和有效性,为复杂电磁环境中舰船电子设备接收波形的建模与仿真提供了有效的理论和技术手段。

参考文献:

[1] WANG Y, ZHANG N T, ZHANG Q Y, et al. Characterizing ultra-wide band indoor line-of-sight wireless channel[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2007, 18(4):673-678, 697.
 [2] OESTGES C, SAUNDERS S R, VANHOENACKER-

- JANVIER D. Physical statistical modelling of the land mobile satellite channel based on ray tracing [J]. IEE Proceedings Microwaves, Antennas and Propagation, 1999, 14(1):45-49.
- [3] 刘蕾蕾. 无线信道建模的研究方法简介[J]. 科技视界, 2011(23):61-62.
- [4] 扈罗全, 王正斌. 随机射线方法研究无线电波多径传播特性[J]. 微波学报, 2008, 24(4):80-86.
HU Luoquan, WANG Zhengbin. Multipath propagation properties of radio waves with stochastic ray methods [J]. Journal of Microwaves, 2008, 24(4):80-86.
- [5] 范波, 韩方景, 韩方剑. 多径衰落信道下的通信系统建模仿真[J]. 计算机仿真, 2009, 26(4):182-185.
FAN Bo, HAN Fangjing, HAN Fangjian. Modeling and simulation of communication system in multipath fading channel [J]. Computer Simulation, 2009, 26(4):182-185.
- [6] 叶文华. 不同海情海面与目标复合电磁散射理论与实验研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2012.
- [7] 杨晓维. 含泡沫层动态海面电磁散射修正双尺度研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2008.
- [8] 杜洋, 仇洪冰. 一种 Rician 衰落信道快速仿真模型[J]. 桂林电子科技大学学报, 2009, 29(5):377-380.
DU Yang, QIU Hongbing. A fast simulation model for Rician fading channels [J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2009, 29(5):377-380.
- [9] 杨伟. 三维复杂粗糙海面电磁散射建模研究与特性分析[D]. 成都:电子科技大学, 2012.
- [10] 刘坤, 刘国芳, 欧阳海波. 移动通信衰落信道的仿真分析[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(8):108-110.
LIU Kun, LIU Guofang, OUYANG Haibo. Simulation of mobile communication fading channel [J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 29(8):108-110.
- [11] 杨晓晨. 飞行器海上遥测接收时的电波传播特性研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010.
- [12] 罗伟. 时变海面与目标复合电磁散射研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011.
- [13] 赵亚明, 李就, 孟雷, 等. 不同环境下海杂波特征仿真与试验研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(8):1000-1006.
ZHAO Yaming, LI Jiu, MENG Lei, et al. Simulation and test research of sea clutter characteristics in different environments [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(8):1000-1006.

[责任编辑:卢圣芳]



(上接第59页)

- HU Jing, WEN Xishan, LAN Lei, et al. Simulation model of rod-plate gap positive discharge [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6):1392-1397.
- [11] 杨津基. 气体放电[M]. 北京:科学出版社, 1981.
- [12] 万浩江, 魏光辉, 陈强, 等. 雷电先导放电的三维数值模拟与应用[J]. 高电压技术, 2013, 39(2):430-436.
WAN Haojiang, WEI Guanghui, CHEN Qiang, et al. Three-dimensional numerical simulation of lightning discharge and its application [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2):430-436.
- [13] LALANDE P, BONDIOU C A, LAROCHE P, et al. Leader properties determined with triggered lightning techniques [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(12):14109-14115.
- [14] 苟学强, 张义军. 区域海拔高度对云地雷闪闪击距离影响的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2):88-91.
GOU Xueqiang, ZHANG Yijun. Numerical study on effect of the region's altitude above the sea level to the striking distance of the C-G lightning discharge [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2):88-91.
- [15] WILLIAMS E. Charge structure and geographical variation of thunderclouds [M]//COORAY V. The Lightning Flash. London: IEE Publications, 2003:1-16.
- [16] BAZELYAN E M, RAIZER Y P. Lightning physics and lightning protection (II) [M]. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2000.

[责任编辑:胡文莉]