

## 无线信道中一种新的瑞利波形仿真模型

张 晖<sup>①</sup> 董育宁<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(南京邮电大学通信与信息工程学院江苏省无线通信重点实验室 南京 210003)

<sup>②</sup>(苏州大学江苏省计算机信息处理技术重点实验室 苏州 215006)

**摘 要:** 该文提出了一种新的简单的产生满足任意自相关特性的瑞利波形的仿真模型,在此基础上得出无线信道中瑞利衰落波形的产生方法。该方法可以容易地产生多个相互独立的瑞利衰落波形,从而为研究各种频率分集无线通信系统提供了可能。仿真结果表明该模型能够有效地产生符合小尺度无线信道特征的瑞利衰落波形,满足自相关特性及平稳性的要求。

**关键词:** 无线信道; 瑞利波形; 仿真模型

**中图分类号:** TP391.9; TN92

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2008)12-2959-04

## A Novel Simulation Model for The Generation of Rayleigh Waveforms in Wireless Channels

Zhang Hui<sup>①</sup> Dong Yu-ning<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(*Jiangsu Provincial Key Lab of Wireless Communications, College of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China*)

<sup>②</sup>(*Jiangsu Provincial Key Lab of Computer Information Processing Technology, Suzhou University, Suzhou 215006, China*)

**Abstract:** In this paper, a novel and simple simulation model for the generation of Rayleigh waveforms with various autocorrelation properties is proposed. Based on this model, the method for generating the Rayleigh fading waveforms in wireless channels is given. By using the model, an arbitrary number of independent Rayleigh fading waveforms can be easily generated, which is of great importance for realistic performance assessments of the frequency-diversity wireless communication systems. Simulation results show that the model can effectively generate the Rayleigh waveforms with small-scale channel characteristics, which satisfy the autocorrelation property and stationary requirement.

**Key words:** Wireless channel; Rayleigh waveform; Simulation model

### 1 引言

由于信道中电磁波受到反射、绕射、散射、多径传播等因素的影响,接收端所接收到的信号是各个方向到达电磁波的叠加,使信号在小范围内引起剧烈的波动,称之为多径衰落,亦称为小尺度衰落。小尺度衰落直接体现了无线信道的复杂性和随机性,是决定无线通信系统性能的基本问题。一般而言,小尺度衰落信道响应的包络服从瑞利分布,而相位服从 $(0, 2\pi)$ 内均匀分布。因此,无线信道建模的核心与关键即是如何简单有效地产生瑞利衰落包络,这也是研究与分析各种移动通信系统的首要任务。

近年来,各种用于仿真小尺度瑞利衰落波形的模型不断涌现。这些模型可大致分为两类:统计类和确定类。统计类

模型<sup>[1-4]</sup>是基于对时域或者频域上的复高斯随机过程进行功率谱密度的滤波成形,该类模型宜于产生满足各种统计特性的瑞利衰落波形,但需要精心设计数字成形滤波器以及进行大数据量的逆离散傅里叶变换(IDFT),其实现复杂度高,不适于高速实时的仿真。而确定类模型是基于对时域上精心选择的有限个余弦波进行叠加。最经典的确定类模型是Jakes模型<sup>[5]</sup>,由于其简单性而得到广泛应用。但是Jakes模型本身存在着一些缺点,它是一个确定性函数,不能反映信道的随机性,不能产生多个相互独立的瑞利衰落波形,因此不能应用于频率分集无线通信系统的建模。甚至对于Jakes模型产生的一个瑞利衰落波形,其对应的同相分量与正交分量也不是完全独立的。为此,文献[6-11]提出许多改进模型以克服Jakes模型的缺点,它们或者引入随机相位或者引入不同的频移等等。但是这些改进模型的统计特性仍然存在一些固有的缺点。

本文提出了一种简单新颖的满足任意自相关特性的瑞利波形仿真模型,其核心为通过一种线性变换矩阵可以将蒙

2007-05-28 收到, 2008-07-24 改回

国家“973”计划项目(2007CB310607), 江苏省高校基金重大项目(07KJA51006), 教育部科学技术研究重点项目(N205060)和苏州大学江苏省计算机信息处理技术重点实验室开放课题(ZK207004)资助课题

特卡罗方法<sup>[12]</sup>产生的独立标准高斯随机序列转换为满足一定自相关特性的高斯随机过程。其中线性变换矩阵可通过简单的递推公式得到。在此基础上得出无线信道中瑞利衰落波形的产生方法。仿真结果表明本文模型能够有效地产生符合小尺度无线信道特征的瑞利衰落波形，满足自相关特性的要求。另外，实际仿真产生的均是离散有限的时间抽样(设抽样时间间隔为  $T_s$ )，因此本文提到的随机过程均指离散有限的随机序列。

本文第2节给出了满足任意自相关特性的瑞利波形的仿真模型；第3节提出了无线信道中瑞利衰落波形的产生方法；第4节给出了仿真验证；最后是结束语。

## 2 任意自相关特性的瑞利波形仿真模型

### 2.1 理论基础

设  $Z(n) = X(n) + jY(n)$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$  为复高斯随机过程。 $Z(n)$  可以写成随机向量形式  $\mathbf{Z} = [Z(1), Z(2), \dots, Z(N)]$ 。 $Z(n)$  必须满足如下条件：(1)实部分量(即同相分量)  $X(n)$  和虚部分量(即正交分量)  $Y(n)$  均为均值为0，方差为  $\sigma^2$  的高斯随机过程。(2)  $X(n)$  和  $Y(n)$  在任意时刻统计独立，即它们的互相关函数  $E(X(n) \cdot Y(n+m)) = 0$ 。(3)  $X(n)$ ,  $Y(n)$  是广义平稳随机过程，其自相关函数相等且为  $R(m) = E(X(n) \cdot X(n+m)) = E(Y(n) \cdot Y(n+m))$ ,  $0 \leq m \leq N-1$  为离散时间间隔。

设  $Z(n)$  的包络  $V(n) = |Z(n)| = \sqrt{X(n)^2 + Y(n)^2}$ 。条件(1)与条件(2)联合保证了  $V(n)$  在任意时刻服从均值为  $\sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma$  方差为  $\left(2 - \frac{\pi}{2}\right)\sigma^2$  的瑞利分布，其概率密度函数为： $f_V(v) = \frac{v}{\sigma^2} e^{-v^2/2\sigma^2}$  ( $v \geq 0$ )。(证明略，参见文献[5])。条件(3)进一步保证了包络  $V(n)$  的广义平稳性。在3个条件满足的前提下， $V(n)$  的自相关函数可表示为

$$R_{VV}(n, m) = E(V(n) \cdot V(n+m)) = E\left(\sqrt{X^2(n) + Y^2(n)} \cdot \sqrt{X^2(n+m) + Y^2(n+m)}\right) \\ = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{x_n^2 + y_n^2} \sqrt{x_{n+m}^2 + y_{n+m}^2} \\ \cdot f_{X(n)X(n+m)Y(n)Y(n+m)}(x_n, x_{n+m}, y_n, y_{n+m}) \\ \cdot dx_n dx_{n+m} dy_n dy_{n+m} \quad (1)$$

$f_{X(n)X(n+m)Y(n)Y(n+m)}(x_n, x_{n+m}, y_n, y_{n+m})$  为  $(X(n), X(n+m), Y(n), Y(n+m))$  的联合概率密度函数：

$$f_{X(n)X(n+m)Y(n)Y(n+m)}(x_n, x_{n+m}, y_n, y_{n+m}) \\ = f_{X(n)X(n+m)}(x_n, x_{n+m}) \cdot f_{Y(n)Y(n+m)}(y_n, y_{n+m}) \\ = \frac{1}{4\pi^2\sigma^4(1-\rho^2(m))} \\ \cdot e^{-\frac{x_n^2 + x_{n+m}^2 + y_n^2 + y_{n+m}^2 - 2\rho(m)(x_n x_{n+m} + y_n y_{n+m})}{2\sigma^2(1-\rho^2(m))}} \quad (2)$$

式中  $\rho(m)$  为  $X(n)$ ,  $Y(n)$  的自相关系数，定义如下：

$$\rho(m) = \frac{E(X(n)X(n+m)) - E(X(n))E(X(n+m))}{\sqrt{D(X(n))D(X(n+m))}} \\ = \frac{E(Y(n)Y(n+m)) - E(Y(n))E(Y(n+m))}{\sqrt{D(Y(n))D(Y(n+m))}} \\ = \frac{R(m)}{\sigma^2} \quad (3)$$

可以证明， $-1 \leq \rho(m) \leq 1$ 。将式(2)代入式(1)进行四重积分即可求得  $V(n)$  的自相关函数  $R_{VV}(n, m)$ 。可以看出，由于变量  $(x_n, x_{n+m}, y_n, y_{n+m})$  均被积分掉，通过四重积分得到的结果(即  $R_{VV}(n, m)$ )仅是  $\rho(m)$  的函数。因此， $R_{VV}(n, m)$  仅是时间间隔  $m$  的函数，与初始时刻  $n$  无关即  $R_{VV}(m) = R_{VV}(n, m)$ 。又由于  $V(n)$  的均值、方差均为常量，因此包络  $V(n)$  也是广义平稳的。

当然，该四重积分是相当复杂的，可以证明  $V(n)$  的自相关函数可表示为

$$R_{VV}(m) = \sigma^2(1 + |\rho(m)|)EL\left(\frac{2\sqrt{|\rho(m)|}}{(1 + |\rho(m)|)}\right) \\ = \frac{\pi}{2}\sigma^2 \cdot {}_2F_1(-0.5; -0.5; 1; \rho^2(m)) \quad (4)$$

其中  $EL(\bullet)$  表示第二类完全椭圆积分， ${}_2F_1(\bullet; \bullet; \bullet; \bullet)$  表示超几何函数。由式(4)可得  $V(n)$  的自相关系数：

$$\rho_{VV}(m) = \frac{R_{VV}(m) - \frac{\pi}{2}\sigma^2(1 + |\rho(m)|)EL\left(\frac{2\sqrt{|\rho(m)|}}{(1 + |\rho(m)|)}\right) - \frac{\pi}{2}\left(2 - \frac{\pi}{2}\right)\sigma^2}{\left(2 - \frac{\pi}{2}\right)\sigma^2} \\ = \frac{\frac{\pi}{2} {}_2F_1(-0.5; -0.5; 1; \rho^2(m)) - \frac{\pi}{2}\left(2 - \frac{\pi}{2}\right)}{\left(2 - \frac{\pi}{2}\right)} \quad (5)$$

可以看出  $\rho_{VV}(m)$  与  $\rho(m)$  之间的关系并不能表示为一个封闭形式的公式。因此采用如下式子近似它们的关系(证明参考泰勒展开式)：

$$\rho_{VV}(m) = \frac{16\rho^2(m) + \rho^4(m) + 64\Delta}{64 \cdot \left(\frac{4}{\pi} - 1\right)} \\ \cong \frac{16\rho^2(m) + \rho^4(m)}{64 \cdot \left(\frac{4}{\pi} - 1\right)}, \quad 0 \leq \rho_{VV}(m) \leq 1 \quad (6)$$

其中  $\Delta$  为泰勒展开式的高阶误差余项，由式(6)可得

$$|\rho(m)| \cong \sqrt{8\sqrt{\left(\frac{4}{\pi} - 1\right)}\rho_{VV}(m) + 1 - 8} \quad (7)$$

### 2.2 仿真模型

根据前面的理论基础，若要产生满足任意自相关特性( $\rho_{VV}(m)$  或  $R_{VV}(m)$ )瑞利波形，只需产生满足相应条件且具有一定自相关特性( $\rho(m)$  或  $R(m)$ )的高斯随机过程  $X(n)$  和  $Y(n)$ 。由于  $X(n)$  或  $Y(n)$  具有类似的性质，不失一般性，下面以  $X(n)$  为例介绍其产生过程。

首先，利用蒙特卡罗方法产生一组相互独立的标准(即均值为0，方差为1)高斯随机变量，记为  $\eta(n)$ ,  $1 \leq n \leq N$ 。蒙

特卡罗方法<sup>[12]</sup>是一种随机模拟或随机抽样方法。蒙特卡罗方法中的舍选法能够有效地产生满足独立性要求的标准高斯随机序列。假定  $\eta(n)$  的向量形式  $\boldsymbol{\eta} = [\eta(1), \eta(2), \dots, \eta(N)]$  经过一定线性变换可以得到  $\mathbf{X} = [X(1), X(2), \dots, X(N)]$  ( $X(n)$  的向量形式), 即

$$\mathbf{X}^T = \mathbf{A}\boldsymbol{\eta}^T \quad (8)$$

这里,  $[\cdot]^T$  表示取转置,  $\mathbf{A}$  为线性变换矩阵。若  $\mathbf{A}$  为下三角

$$\text{矩阵且所有元素均非负, 则 } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} A_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ A_{N1} & A_{N2} & \cdots & A_{NN} \end{pmatrix},$$

$$A_{ij} \geq 0, 1 \leq j \leq i \leq N.$$

转换矩阵  $\mathbf{A}$  必须满足下式:

$$\mathbf{A}\mathbf{A}^T = \mathbf{E}(\mathbf{X}^T\mathbf{X}) \quad (9)$$

其中  $\mathbf{E}(\cdot)$  表示对矩阵中的每个元素分别取数学期望。由前所述, 可得

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{X}^T\mathbf{X}) &= \begin{pmatrix} \sigma^2 & R(1) & \cdots & R(N-1) \\ R(1) & \sigma^2 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & R(1) \\ R(N-1) & R(N-2) & \cdots & \sigma^2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \sigma^2 & \sigma^2\rho(1) & \cdots & \sigma^2\rho(N-1) \\ \sigma^2\rho(1) & \sigma^2 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \sigma^2\rho(1) \\ \sigma^2\rho(N-1) & \sigma^2\rho(N-2) & \cdots & \sigma^2 \end{pmatrix} \quad (10) \end{aligned}$$

式(9)的简单证明如下: 由于  $\eta(n)$ ,  $1 \leq n \leq N$  为相互独立的标准高斯随机变量。因此  $\mathbf{E}(\boldsymbol{\eta}^T\boldsymbol{\eta})$  是一个单位矩阵。结合式(8)可证:  $\mathbf{E}(\mathbf{X}^T\mathbf{X}) = \mathbf{E}(\mathbf{A}\boldsymbol{\eta}^T\boldsymbol{\eta}\mathbf{A}^T) = \mathbf{A}\mathbf{E}(\boldsymbol{\eta}^T\boldsymbol{\eta})\mathbf{A}^T = \mathbf{A}\mathbf{A}^T$ 。根据式(9), 式(10), 可用如下递推公式求解转换矩阵  $\mathbf{A}$  (证明从略, 可参考数学归纳法):

$$A_{11} = \sigma^2\rho(i-1), \quad 1 \leq i \leq N \quad (11a)$$

$$A_{ij} = \frac{\sigma^2\rho(i-j) - \sum_{k=1}^{j-1} A_{ik}A_{jk}}{\sqrt{\sigma^2 - \sum_{k=1}^{j-1} A_{jk}^2}}, \quad 1 < j \leq i \leq N \quad (11b)$$

式(11a)为初始值, 式(11b)为按列递推公式。根据这两个公式, 首先得到转换矩阵  $\mathbf{A}$  第1行各列元素  $A_{11}$ , 进而得到转换矩阵  $\mathbf{A}$  第2行各列元素  $[A_{21}, A_{22}]$ , 依次类推, 最后得到转换矩阵  $\mathbf{A}$  第  $N$  行各列元素  $[A_{N1}, A_{N2}, \dots, A_{NN}]$ , 从而求得整个转换矩阵  $\mathbf{A}$ 。

由式(8)可以看出,  $X(n)$  ( $1 \leq n \leq N$ ) 均由相互独立的标准高斯随机变量  $\eta(n)$  的线性组合得到。显然, 产生的  $X(n)$  仍然服从高斯分布且均值为零。而转换矩阵  $\mathbf{A}$  由上面递推公式得到, 因此保证了由式(8)产生的  $X(n)$  的方差及自相关特性不变。因此, 产生的  $X(n)$  仍然具有广义平稳性。同样地, 利用蒙特卡罗方法产生一组相互独立的标准高斯随机变量

$\kappa(n)$ ,  $1 \leq n \leq N$  ( $\boldsymbol{\kappa}$  为其向量形式), 由公式  $\mathbf{Y}^T = \mathbf{A}\boldsymbol{\kappa}^T$  可得高斯随机过程  $Y(n)$  ( $\mathbf{Y}$  为其向量形式)。由于  $\kappa(n)$  与  $\eta(n)$  在任意时刻相互独立(由蒙特卡罗方法所决定), 产生的  $X(n)$  与  $Y(n)$  在任意时刻统计独立。因此上述方法产生的  $X(n)$  与  $Y(n)$  满足2.1小节提到的3个条件。

至此, 可以得出满足任意自相关特性瑞利波形的产生方法:

(1)在给定瑞利波形自相关特性( $\rho_{VV}(m)$ )的前提下, 根据式(7), 计算得到高斯随机过程  $X(n)$  和  $Y(n)$  的自相关特性  $\rho(m)$ 。

(2)由式(11a)及式(11b), 递推得到转换矩阵  $\mathbf{A}$ 。

(3)利用蒙特卡罗方法产生两组相互独立随机变量序列  $\boldsymbol{\eta}$  和  $\boldsymbol{\kappa}$ 。

(4)根据式(8), 即  $\mathbf{X}^T = \mathbf{A}\boldsymbol{\eta}^T$  和  $\mathbf{Y}^T = \mathbf{A}\boldsymbol{\kappa}^T$ , 分别得到高斯随机变量序列  $\mathbf{X}$  和  $\mathbf{Y}$  以及复高斯随机变量序列  $\mathbf{Z}$ 。

(5)由  $V(n) = |Z(n)| = \sqrt{X(n)^2 + Y(n)^2}$ , 可得自相关特性为  $\rho_{VV}(m)$  的瑞利波形  $\mathbf{V} = [V(1), V(2), \dots, V(N)]$ 。

### 3 无线信道中瑞利衰落波形的产生方法

在前面论述的基础上, 现在提出瑞利衰落波形的实现模型。为获得符合小尺度无线信道特征的瑞利衰落波形, 复高斯随机过程  $Z(n)$  的同相分量  $X(n)$  和正交分量  $Y(n)$  除满足上节所述3个条件外, 其功率谱均应满足下式<sup>[5]</sup>:

$$S(f) = \begin{cases} \frac{\sigma^2}{\pi f_m \sqrt{1 - (f/f_m)^2}}, & |f| \leq f_m \\ 0, & |f| > f_m \end{cases} \quad (12)$$

其中  $f$  为频率,  $f_m$  为最大多普勒频移。  $f_m = v/\lambda = vf_0/c$  ( $v$  表示移动台的移动速度,  $\lambda$  表示载波波长,  $f_0$  为载波频率,  $c$  为光速  $3 \times 10^8 \text{m/s}$ )。公式(12)就是Jakes的U型功率谱, 满足该功率谱的信道就是通常所说的瑞利衰落信道。通过对公式  $S(f)$  傅里叶反变换并离散化(离散抽样)可得  $X(n)$  和  $Y(n)$  自相关系数<sup>[5]</sup>

$$\rho(m) = J_0(2\pi f_m m T_s) \quad (13)$$

$T_s$  为抽样时间间隔,  $J_0(\cdot)$  为第一类零阶贝塞尔函数。

在第2节提出方法的基础上, 令  $X(n)$  和  $Y(n)$  自相关系数满足式(13)即得到符合小尺度无线信道特征的瑞利衰落波形。因此, 只需将上节方法的步骤(1)去掉即可得到产生无线信道中瑞利衰落波形的产生方法。若要产生  $L \geq 1$  个独立的瑞利衰落波形  $V_l(n)$ ,  $1 \leq l \leq L$ , 只需将上节方法步骤(3)、步骤(4)及步骤(5)重复  $L-1$  次即可。由于每次利用蒙特卡罗方法产生的标准高斯随机变量序列与其它各次均是相互独立的, 从而保证了产生的  $L$  个瑞利衰落波形的独立性。

### 4 仿真与分析

利用本文模型产生两个相互独立的符合小尺度无线信道特征的瑞利衰落波形  $V_1(n)$  和  $V_2(n)$ 。仿真参数如下: 同相与正交分量的方差  $\sigma^2 = 1$ , 最大多普勒频移  $f_m = 50 \text{Hz}$  (对应

于载波频率  $f_0 = 900\text{MHz}$  和移动台的移动速度  $v = 60\text{km/h}$ 。抽样时间间隔  $T_s = 0.001\text{s}$  (对应于抽样频率为  $1000\text{Hz}$ )，样本总数  $N = 10000$ 。每个仿真结果均为10次仿真的平均值。

图1给出了仿真得到的两个瑞利衰落波形概率密度分布。可以看出它们均与理论值(瑞利概率密度分布参见2.1小节)吻合很好。图2分别给出了仿真得到两个瑞利衰落波形对应的同相分量与正交分量的自相关系数。从图2可以看出, 仿真得到的(两个瑞利衰落波形对应的)同相分量与正交分量的自相关系数与理论值(参见式(13))可以很好地匹配。换言之, 本文模型产生的瑞利衰落波形满足相应的自相关特性要求, 符合小尺度无线信道特征。图3给出了仿真得到两个瑞利衰落波形的互相关函数。由于产生的两个瑞利衰落波形相互独立, 因此理论上其互相关函数  $R_{V_1V_2}(m) = E(V_1(n) \cdot V_2(n+m)) = E(V_1(n))E(V_2(n+m)) = \pi/2$ 。从图3可以看出, 仿真得到的两个瑞利衰落波形的互相关函数约为理论值  $\pi/2$  即产生的  $V_1(n)$  和  $V_2(n)$  相互间具有较好的独立性。需要注意的, 图2和图3中采用的是连续时间间隔  $\tau$  ( $\tau = mT_s$ )。

## 5 结束语

本文提出了一种简单新颖的满足任意自相关特性的瑞利衰落仿真模型, 在此基础上得出无线信道中瑞利衰落波形

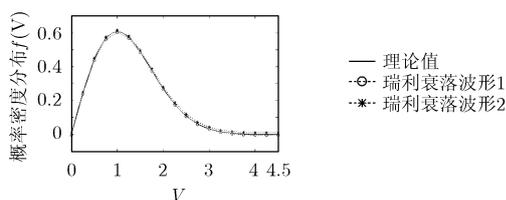


图1 瑞利衰落波形的概率密度分布

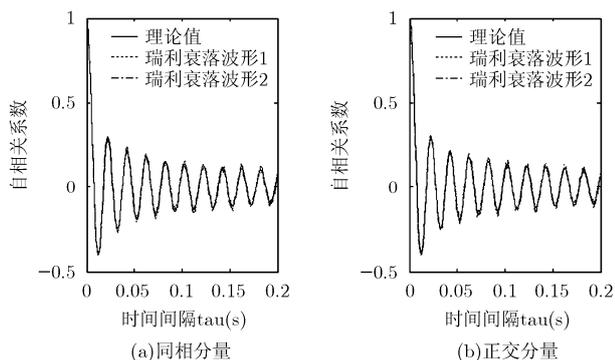


图2 瑞利衰落波形对应的同相分量与正交分量的自相关系数

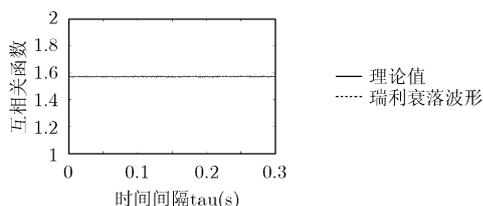


图3 瑞利衰落波形  $V_1(n)$  和  $V_2(n)$  的互相关函数

的产生方法。仿真结果表明本文模型能够有效地产生无线信道中的瑞利衰落波形。由于本文模型可以容易地产生多个相互独立的瑞利衰落波形, 本文模型与文献[2]提出的方法相结合可以产生多个满足任意互相关特性的瑞利衰落波形, 从而可以为频率分集系统(如跳频(FH)系统、多载波码分多址(MC-CDMA)系统, 正交频分复用(OFDM)系统等)中的频率相关信道建模。

## 参考文献

- [1] Young D J and Beaulieu N C. The generation of correlated Rayleigh random variates by inverse discrete Fourier transform [J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2000, 48(7): 1114-1127.
- [2] Tran L C, Wysocki T A, Seberry J, and Mertins A. A generalized algorithm for the generation of correlated Rayleigh fading envelopes [C]. Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, Taormina, Italy, 2005: 213-218.
- [3] Tran L C, Wysocki T A, Seberry J, and Mertins A. A generalized algorithm for the generation of correlated Rayleigh fading envelopes in radio channels [C]. 19th IEEE International on Parallel and Distributed Processing Symposium, Denver, USA, 2005: 238-245.
- [4] Sorooshiyari S and Daut D G. On the generation of correlated Rayleigh fading envelopes for accurate simulation of diversity channels [J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2006, 54(8): 1381-1386.
- [5] Jakes W. *Microwave Mobile Communications* [M]. First Edition, New York: John Wiley & Sons, 1974: 1-73.
- [6] Pop M F and Beaulieu N C. Limitations of sum-of-sinusoids fading channel simulators [J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2001, 49(4): 699-708.
- [7] Zheng Y R and Xiao C S. Simulation models with correct statistical properties for Rayleigh fading channels [J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2003, 51(6): 920-928.
- [8] Wang C X and Patzold M. Methods of generating multiple uncorrelated Rayleigh fading processes [C]. 57th IEEE Vehicular Technology Conference, Jeju, Korea, 2003, 1: 510-514.
- [9] Patzold M and Hogstad B O. Two new methods for the generation of multiple uncorrelated Rayleigh fading waveforms [C]. 63rd Vehicular Technology Conference, Melbourne, Australia, 2006, 6: 2782-2786.
- [10] Wang Y and Ge L D. A new simulation model of multipath independent Rayleigh fading channels [C]. 2006 International Conference on Communication Technology, Guilin, China, 2006: 1-4.
- [11] Xiao C S, Zheng Y R, and Beaulieu N C. Novel sum-of-sinusoids simulation models for Rayleigh and Rician fading channels [J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2006, 5(12): 3667-3679.
- [12] Robert C P and Casella G. *Monte Carlo Statistical Methods* [M]. Second Edition, New York: Springer, 2004: 35-69.

张 晖: 男, 1982年生, 博士, 讲师, 研究方向为认知无线 Mesh 网络研究。

董育宁: 男, 1955年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为多媒体通信与图像处理。