

基于 AR 模型的无线衰落信道仿真

周晓兰¹, 王随平²

1. 湖南科技大学 计算机科学与工程学院, 湖南 湘潭, 411201;
2. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083)

摘要: 提出一种基于自回归(Autoregressive, AR)模型滤波的快速无线衰落信道仿真模型。对白噪声进行滤波, 产生 Rayleigh 无线衰落信道。仿真试验结果表明: 该信道具有与实际无线信道基本一致的统计特性, 可用于实验室无线系统仿真设计、算法选择与优化。所设计的 Rayleigh 衰落仿真模型与传统的正弦波叠加 SOS 方法相比, 更满足无线信道的统计规律, 具有复杂度低、易于软硬件实现的优点。

关键词: 信道模型; Rayleigh 衰落; 正弦波; AR 模型

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2010)03-1042-04

Simulation of wireless fading channels based on AR models

ZHOU Xiao-lan¹, WANG Sui-ping²

1. School of Computer Science and Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. School of Information Science & Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A fast novel simulator for wireless fading channels based on Autoregressive (AR) Mode was proposed. Rayleigh fading channels were generated by filtering independent identically distributed white Gaussian noise, and have the same statistical properties as the real wireless channel. The presented model can be used in assessing performances and system design of wireless communication systems. The results show that the new simulator is more coincident with the real channel statistic characteristics, and has lower complexity than that of SOS (Sum of Sinusoids) approaches. It can be easily achieved by software and hardware in laboratory.

Key words: channel model; rayleigh fading; sinusoids; AR model

任何一个新的无线通信系统都将工作于实际的无线传播环境, 因此, 建立与实际传播环境统计特性一致的信道模型是无线通信研究的基础和起点^[1]。在此基础上, 可以在实验室运用分析方法对给定的无线通信系统进行设计和性能评估, 并以此为基础对算法进行选择和优化, 避免为实现早期系统而搭建硬件造成的巨大花费。信道建模^[2]和仿真^[3]是现代无线通信系统设计的基础和起点。

1963年 Bello 用线性时变系统理论描述信道^[4], 成为所有信道模型的数学基础。随着无线通信系统的高速发展, 对信道仿真模型提出了更高的要求, 不仅要求各种相关统计特性达到一定的精度, 还要求满足广义平稳特性和各态历经特性^[5]。在原有的许多模型中, 这2个方面难以同时满足^[6-7], 因此, 高效的信道仿真模型一直是无线通信的研究热点^[8]。在众多的信道仿真模型中, 几乎所有的信道仿真模型都是建立在

收稿日期: 2009-09-28; 修回日期: 2009-12-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(2006AA04Z152)

通信作者: 周晓兰(1974-), 女, 湖南洞口人, 硕士, 讲师, 从事计算机科学技术及通信工程研究; 电话: 15898569801; E-mail: zhou_lanlan@163.com

Rayleigh 衰落信道的基础上。最早的 Rayleigh 衰落信道仿真模型是 Jakes 模型^[9]。这些模型都是源自 Clarke 的信道参考模型^[10]。无线衰落信道仿真方法主要有正弦波叠加法^[6]、离散傅里叶变换法^[11]和成型滤波器法^[12]。成型滤波器法根据采用的滤波器类型又分为 FIR 滤波器法^[11]和 IIR 滤波器法^[13]。近年来, 大量研究表明: 正弦波叠加法产生的衰落信道不能较好地满足实际的无线信道统计特性, 如 Jake 模型不具有广义平稳性^[6]; 改进方法的各态历经性和信道的相关性与实际信道统计特性相差较大^[12]。而离散傅里叶变换法所有的采样点都是由一个单独的快速傅里叶算法完成, 需要存储大量的数值^[11]。基于以上的问题, 本文作者提出一种基于 AR 模型快速高效的无线衰落信道仿真方法, 可以根据需要, 实时的产生统计特性准确的衰落信道。

1 衰落信道的参考模型

陆地移动无线信道的 Rayleigh 表示是从高斯分布广义平稳不相关散射衰落模型得出的^[4]。平坦衰落信道的仿真是设计一个复高斯广义平稳的随机过程 $u(t)=u_1(t)+ju_2(t)$, 要求其实部和虚部的功率谱(也称多普勒功率谱)与通信环境相对应。假设天线为全向天线, 处于二维的各向分布均匀的散射环境, 那么, 一种应用最为广泛的 U 型功率谱^[9], 可表示为:

$$S(f) = \frac{\sigma_0^2}{\pi f_m \sqrt{1-(f/f_m)^2}}, |f| < f_m \quad (1)$$

其中: f_m 为最大多普勒频移, σ_0^2 为 $u(t)$ 实部或虚部的方差。满足式(1) U 型功率谱的衰落信道就是 Jakes 提出的 Rayleigh 衰落信道。(1)式实部和虚部的自相关函数为:

$$R(\tau) = \sigma_0^2 J_0(2\pi f_m \tau) \quad (2)$$

其中: $J_0(\cdot)$ 表示第一类零阶 Bessel 函数, τ 是时间延迟。

实现(1)或(2)式是一个时间相关的 Rayleigh 过程, 最常用的实现方法是根据 Clarke 参考模型^[10], 采用正弦波叠加。正弦波叠加法是基于无数个加权谐波的叠加, 表达式为:

$$u(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} E_0 \sum_{n=1}^N C_n \exp j(2\pi f_m t \cos \alpha_n + \phi_n) \quad (3)$$

其中: E_0 是常数, C_n , α_n 和 ϕ_n 分别是第 n 个路径的增益, 传播角度和初相位。若 $\sum_{n=1}^N E\{C_n^2\} = 1$ 且

$E_0 = \sqrt{2\sigma_0^2}$, Clarke 的信道参考模型的均值和相关统计特性可表示为^[10]:

$$E\{u(t)\} = 0$$

$$R_{u_i u_i}(\tau) = \sigma_0^2 J_0(2\pi f_m \tau), i = 1, 2$$

$$R_{u_1 u_2}(\tau) = R_{u_2 u_1}(\tau) = 0$$

$$R_{uu}(\tau) = 2\sigma_0^2 J_0(2\pi f_m \tau) \quad (4)$$

$R_{u_i u_i}(\tau)$ 的傅里叶变换即为式(1), 所以, Clarke 的信道参考模型满足 U 型功率谱。Clarke 的信道参考模型包络 x 和相位 θ_u 的概率密度函数(PDF)分别服从 Rayleigh 分布与 $[0, 2\pi]$ 的均匀分布:

$$f_{|u|}(x) = \frac{x}{\sigma_0^2} \exp(-\frac{x^2}{2\sigma_0^2}), x > 0$$

$$f_{\theta_u}(\theta_u) = \frac{1}{2\pi}, \theta_u \in [0, 2\pi) \quad (5)$$

Clarke 信道参考模型认为: 到达的信号路径数无穷大时, 频率间隔接近为 0。因此, Clarke 模型不能用软件或硬件实现, 但是, 作为参考模型, 对仿真模型性能进行评价依然十分重要。评价各种类型仿真模型的性能主要包括两个方面, 一是看仿真模型的均值、自相关函数(ACF)和互相关函数(CCF)是否与参考模型相匹配; 二是看仿真模型是否满足广义平稳特性和各态历经特性。

2 基于 AR 模型的 Rayleigh 仿真模型

Jakes 模型是实现 Clarke 参考模型仿真应用最广泛的模型之一, 但近年来的大量研究表明: Jakes 信道模型不满足广义平稳性^[6]; 一些改进模型虽然解决了广义平稳性, 但在实现过程中, 模型实部或虚部的自相关不能满足 Clarke 的统计特性, 实部与虚部也具有相关性^[7]。为此, 有必要设计一种二阶统计特性和平稳性都符合实际参考信道统计特性的仿真模型^[14-15]。

要确定一个随机数序列, 使之具有给定自相关函数或等价地具有给定的功率谱密度, 可以对一组不相关的样本进行适当滤波, 从而使之具有目标功率谱密度^[14]。为此, 本文作者采用基于 AR 统计模型滤波来实现。通过使用 AR 模型的方法来产生相关瑞利衰落

过程,它的主要原理是利用 AR 模型参数设计的无限脉冲响应滤波器来产生不相关的高斯变量。在这种方法中 AR 模型参数可以通过求解 Yule-Walker 方程而得出。

使用 AR 模型模拟产生瑞利衰落的步骤如下:

(1) 利用 Bessel 自相关函数产生 AR 模型的自相关矩阵;

(2) 利用自相关矩阵构建 Yule-Walker 方程,通过求解 Yule-Walker 方程得到 AR 模型参数;

(3) 使用 AR 模型参数来构建无限脉冲响应滤波器(IIR),并使用该滤波器模拟产生瑞利衰落信道系数。

1 个阶数为 p 的 AR 过程(AR(p))可用时域自回归差分方程表示为:

$$x(n) = -\sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + w(n) \quad (6)$$

$w(n)$ 是输入方差为 σ_0^2 的零均值高斯白噪声,仿真器的输出 $x(n)$ 对应于生成的 Rayleigh 信道,AR 模型的参数为滤波器系数 $\{a_1, a_2, \dots, a_p\}$,相应的 AR(p)过程输出功率谱密度为:

$$S_{xx}(f) = \frac{\sigma_0^2}{\left|1 + \sum_{k=1}^p a_k \exp(-j2\pi kf)\right|^2} \quad (7)$$

对于给定的自相关函数 $R_{xx}(k)$ 与 AR(p)的关系,可以用 Yule-Walker 方程表示为:

$$R_{xx} a = v \quad (8)$$

其中:

$$R_{xx} = \begin{pmatrix} R_{xx}(0) & R_{xx}(1) & \dots & R_{xx}(p-1) \\ R_{xx}(1) & R_{xx}(0) & \dots & R_{xx}(p-2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{xx}(p-1) & R_{xx}(p-2) & \dots & R_{xx}(0) \end{pmatrix}$$

$$a = (a_1, a_2, \dots, a_p)^T, \quad v = (\sigma_0^2, 0, \dots, 0)^T \quad (9)$$

由式(2)可以得到符合实际传播环境统计特性的离散相关序列:

$$R(n) = \sigma_0^2 J_0(2\pi f_m T |n|) \quad (10)$$

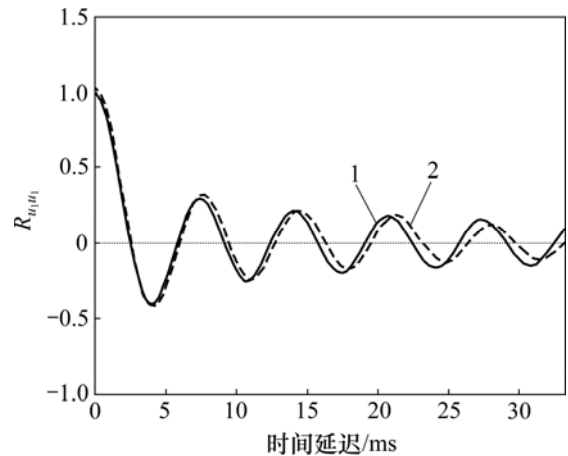
其中: T 为采样周期, n 表示采样时间的次数。由式(10)和(9),通过优化算法对 Yule-Walker 方程求解,即得到符合要求的 AR 模型。从前面分析可知,将统计独立的复高斯白噪声输入 AR 模型,可以得到统计特性与广义平稳性都符合实际传播环境统计特性的时间相

关 Rayleigh 过程。

3 仿真实现及其分析

对于已知的相关函数,通过衰落信道参考模型可以得到任意阶数的 AR 过程的自相关函数,并由 Yule-Walker 方程估算 AR 过程的系数参数,再以独立的复高斯噪声通过 AR 过程滤波,从而得到符合实际无线传播环境的具有时间相关统计性能的 Rayleigh 信道。

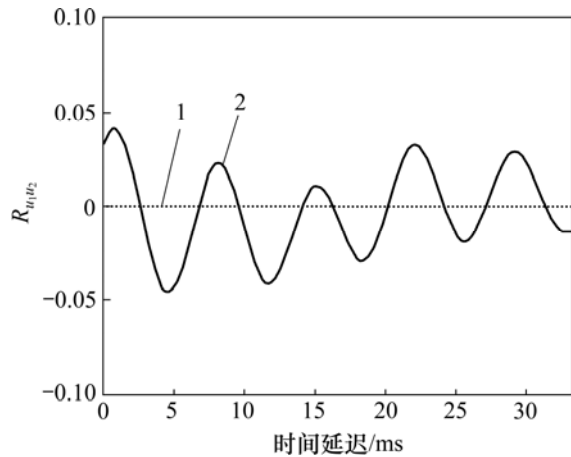
仿真参数 $\sigma_0^2 = 1, f_m = 150 \text{ Hz}$ 。对基于 AR 统计模型的 Rayleigh 衰落模型进行计算机仿真。图 1 和图 2 所示为得到的自相关统计特性曲线以及互相关统计特性曲线。仿真结果表明:本文作者提出的信道模型的自相关特性与参考模型基本一致,输出复高斯白噪声



1—理论值; 2—AR 模型

图 1 实部自相关

Fig.1 Autocorrelations of real part



1—理论值; 2—AR 模型

图 2 实部与虚部互相关

Fig.2 Cross correlation between real and imaginary part

的实部与虚部互相关值小于 0.05,并保持正交;自相关特性误差的产生主要来源于仿真样本长度的限制,消除了正弦波叠加方法的二阶统计特性不能满足实际信道统计特性的问题。本方法是一种高效精确的 Rayleigh 仿真模型。

4 结论

(1) 提出了一种基于 AR 模型的 Rayleigh 衰落信道仿真模型,得到具有精确设计的与实际无线信道统计特性一致的时间相关 Rayleigh 过程。

(2) 该方法通过控制 AR 模型参数来调整信道的参数如功率等,比流行的正弦叠加方法更灵活,同时,消除了正弦叠加方法模型的二阶统计特性与平稳性的缺陷,是一种高效精确的 Rayleigh 仿真模型,为设计新的高效信道仿真模型提供了一种新的思路。

(3) 该方法比正弦波叠加法更适合硬件实现。只要产生符合要求的白噪声序列,通过所设计的滤波器就可以产生实时的无线信道,适合在实验室条件下设计与优化无线信道算法。

参考文献:

- [1] XIA Qing. Discussion on handover technology in heterogeneous wireless network for the third generation wireless network[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2008, 2(11): 16-18.
- [2] SUN Hua-li, MENG Wei-xiao, ZHANG Nai-tong. Modeling and implementation of space-time-frequency MIMO channel[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(9): 2279-2282.
- [3] LI Jian. Wireless channel simulation facing new challenges of MIMO[J]. Electronic Engineering & Product World, 2008, 8(12): 70-72.
- [4] Bello P A. Characterization of randomly time-variant linear channels[J]. IEEE Trans Communications Systems, 1963, 11(4): 360-393.
- [5] LI Zi, CAI Yue-ming. Simulation models for Rayleigh fading channels[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science, 2004, 5(2): 1-8.
- [6] Pop M F, Beaulieu N C. Limitations of sum-of-sinusoids fading channel simulators[J]. IEEE Trans Commun, 2001, 149(4): 699-708.
- [7] Zheng Y R, Xiao C. Improved models for generation of multiple uncorrelated Rayleigh fading waveforms[J]. IEEE Commun Letter, 2002, 6(6): 256-258.
- [8] Atzold M P. On the stationarity and ergodicity of fading channel simulators basing on Rice's sum-of-sinusoids[C]//14th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Proceedings. Beijing: IEEE, 2003: 1521-1525.
- [9] Jakes W C. Microwave mobile communications[M]. New York: Wiley-Interscience, 1974: 1-35.
- [10] Clarke R H. A statistical theory of mobile-radio reception[J]. Bell Syst Tech J, 1968, 47(6): 957-1000.
- [11] Young D J, Beaulieu N C. On the generation of correlated Rayleigh random variates by inverse discrete Fourier transform[C]//The 5th International Conference on Universal Personal Communications (ICUPC). Massachusetts: IEEE, 1996: 231-235.
- [12] Patel C S, Stuber G L. Comparative analysis of statistical models for the simulation of Rayleigh faded cellular channels[J]. IEEE Transactions on Communication, 2005, 53(6): 1017-1026
- [13] Komninakis C, Kirshman J F. Fast Rayleigh fading simulation with an IIR filter and polyphase interpolation[J]. RF Design Magazine, 2004: 24-34.
- [14] William H. Principles of communication systems simulation with wireless applications[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2004.
- [15] Atzold M P. Mobile fading channels[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2002: 289-319.

(编辑 刘华森)