

# 基于 SOS 模型和查表法的平坦 Rice 信道模拟器\*

杜洋<sup>1</sup>, 翁乾倩<sup>2</sup>, 文德钢<sup>1</sup>

(1. 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004;

2. 桂林电子科技大学 信息科技学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 平坦 Rice 信道是一种应用范围广泛的移动衰落信道。精度和运行速度间的矛盾是 SOS 模型难以解决的固有矛盾。基于 SOS 模型和查表法, 设计了一种平坦 Rice 衰落信道模拟器。理论和仿真分析结果表明, 该模拟器同时具备高精度和高速度的良好特性, 有较强的实用价值。

**关键词:** Rice 信道; 正弦波叠加法; 查表法; 模拟器

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)03-0049-03

## Simulator for flat Rice channels based on SOS model & table look-up method

Du Yang<sup>1</sup>, Weng Qianqian<sup>2</sup>, Wen Degang<sup>1</sup>

(1. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. School of Information Science and Technology, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Flat Rice fading channel is an widely used mobile fading channel. The contradiction between accuracy and speed is a problem difficult to solve. Based on the SOS model and table look-up method, a novel flat Rice fading channel simulator is presented. Corresponding theoretical analysis and simulation results reflect that the model has both high velocity and high precision.

**Key words:** Rice channel; sum-of-sinusoids method; table look-up method; simulator

无线通信技术研究本质是基于不同的信道特性开发与信道特性相适应的高可靠性、高有效通信技术。因此, 信道模拟器不可避免地成为了无线通信研究领域的一个研究热点。研究表明<sup>[1-3]</sup>, 较之目前多数人采用的 Rayleigh 衰落, Rice 衰落能更好地描述大多数现实中存在的无线信道。在不考虑多径或多径不可分辨时, Rice 衰落信道可用平坦 Rice 信道模拟器来模拟。当 Rice 因子为零时, Rice 信道模拟器退化为 Rayleigh 信道模拟器; 当 Rice 因子无穷大时, 等价于 Gaussian 信道。因此研究 Rice 信道模拟器更具实用性。衰落信道建模的主流方法有: 正弦波叠加法 SOS (Sum-of-Sinusoids) 和成型滤波器法<sup>[1-2]</sup>两种。SOS 法建立信道模拟器, 简称 SOS 模型, 与成型滤波器法相比, 其运算量小、设计灵活简便, 是目前被广泛采用的方法。前人<sup>[3-4]</sup>提出的 SOS Rician 信道模拟器均假设直射径 LOS (Line-of-Sight) 时不变或

为常数。而实际的 Rice 信道 LOS 径通常是时变的, 甚至具有随机性。因此, 这些模拟器并不能精准地反映 LOS 径的物理特性, 从而使整个模拟器的精度受到影响。Xiao Chengshan<sup>[5]</sup>提出了一种基于 SOS 模型的平坦 Rice 信道模拟器, 该模拟器在实现过程中对散射径和直射径均引入随机变量, 更切实地模拟还原了实际信道, 然而却以牺牲速度为代价。要达到其理论精度, 这种模拟器在运行时必须求取多次统计平均。

用 SOS 法设计信道模拟器存在一对不可调和的矛盾, 即精度与速度之间的矛盾。仿真器的随机性越好, 就越逼近理想的信道特性, 即精度越高。然而, 要得到高随机性的模拟器必须在生成信道时经过多次运算求取统计平均, 这势必加大运算量, 严重降低了仿真速度。单纯使用 SOS 法难以解决速度与精度的矛盾。SOS 法的运算量主要集中在谐波三角函数运算上, 为了提高速度, 可将查表法与 SOS 法相结合, 用查表法代替谐波三角函数运算。C S Xiao 模拟器是一种精度较高的 Rice 信道模

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61071088); 桂林市科学研究与技术开发项目(20120104-3); 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室基金(11105)

# 网络与通信

Network and Communication

拟器。本文在该模拟器的基础上融入查表法,设计了一种 Rice 信道模拟器。理论分析和对比仿真结果表明,该模拟器极大地提高了仿真速度,具有很强的实用性。

## 1 C S Xiao 模拟器概述

C S Xiao 平坦 Rice 信道模拟器的数学模型如式(1)~(4)<sup>[5]</sup>所示:

$$X(t) = X_c(t) + jX_s(t) \quad (1)$$

$$X_c(t) = \left[ \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \cos(\omega_d t \cos \alpha_n + \phi_n) + \sqrt{k} \cos(\omega_d t \cos \theta_0 + \phi_0) \right] / \sqrt{(1+k)} \quad (2)$$

$$X_s(t) = \left[ \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \sin(\omega_d t \cos \alpha_n + \phi_n) + \sqrt{k} \sin(\omega_d t \cos \theta_0 + \phi_0) \right] / \sqrt{(1+k)} \quad (3)$$

$$\alpha_n = \frac{2\pi n + \theta_n}{N}, n=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

其中,  $X(t)$  为信道输出, 是一个复随机变量, 当信道模拟器用于系统仿真时, 将该输出与系统送入信道的信号相乘;  $X_c(t)$  和  $X_s(t)$  分别为其同相分量和正交分量;  $k$  为 Rice 因子;  $N$  为谐波数;  $\omega_d$  为最大多普勒角频移;  $\phi_n, \theta_n, \phi_0$  相互独立, 均匀分布于  $[-\pi, \pi)$ ;  $\theta_0$  是直射波到达角, 根据实际情况取常数。

## 2 基于 SOS 模型和查表法的平坦 Rice 信道模拟器

由式(2)、式(3)可知, 模拟器在运行时, 每个时间点上都需要计算  $2N$  个谐波函数, 即  $N$  个  $\cos(\omega_d t \cos \alpha_n + \phi_n)$  和  $N$  个  $\sin(\omega_d t \cos \alpha_n + \phi_n)$ 。唯有从本质上减小  $N$ , 才能提高模拟器运行速度。而  $N$  越大模拟器精确度越高, 因此, 希望直接通过减少  $N$  来提高速度势必使精度降低。这就是单一地使用 SOS 法难以解决速度和精度之间矛盾的症结所在。通过融入查表法, 可以间接地化解这对矛盾。其思路是: 利用谐波函数周期性预先算出一个周期的正余弦值存放在查找表中, 仿真时, 通过查表得到所需的正余弦函数值。表长  $L$  可以表示为:

$$L = f_s \sum_{n=1}^N \frac{2\pi}{\omega_d \cos(\frac{2\pi n + \theta_n}{N})} = \frac{f_s}{f_m} \sum_{n=1}^N \frac{1}{\cos(\frac{2\pi n + \theta_n}{N})} \quad (5)$$

其中,  $f_s$  是采样频率,  $f_m$  是最大多普勒频移。观察该式可以发现一个问题: 由于  $\theta_n$  在  $[-\pi, \pi)$  均匀分布,  $\theta_n$  有可能取到使  $\cos \alpha_n$  接近或者等于 0 的值。在这种情况下, 查找表的表长将会很长或无限长。因此, C S Xiao 模拟器无法直接融入传统的查表法。通过一些设计可以避免出现  $\cos \alpha_n = 0$  的情况, 即可使用查表法。具体方法如下:

将多普勒频移设计为:

$$\omega_{ns} = \omega_d \cos \alpha_{ns} \quad (6)$$

$$\alpha_{ns} = \frac{2\pi n}{N} + \frac{2\pi s}{MN} + \alpha_{00}, n=0, 1, 2, \dots, N-1; s=0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (7)$$

$\alpha_{00}$  的取值满足如下条件:

$$0 < \alpha_{00} < \frac{2\pi}{MN} \text{ 且 } \alpha_{00} \neq \frac{\pi}{MN} \quad (8)$$

以该多普勒频移替换 C S Xiao 模拟器散射径的多普勒频移。根据式(8), 可取  $\alpha_{00} = \frac{2\pi}{MN}$ , 得到新模拟器的数学模型为:

$$Y(t) = Y_c(t) + jY_s(t) \quad (9)$$

$$Y_c(t) = \left[ \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \cos(\omega_d t \cos \alpha'_n + \phi_n) + \sqrt{k} \cos(\omega_d t \cos \theta_0 + \phi_0) \right] / \sqrt{(1+k)} \quad (10)$$

$$Y_s(t) = \left[ \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \sin(\omega_d t \cos \alpha'_n + \phi_n) + \sqrt{k} \sin(\omega_d t \cos \theta_0 + \phi_0) \right] / \sqrt{(1+k)} \quad (11)$$

取  $M=1$ , 经计算可得:

$$\alpha'_n = \frac{2\pi n + 2\pi}{N} + \frac{\pi}{2N} \quad (12)$$

其余各参数与 C S Xiao 模拟器相同。本文中暂且称该模拟器为新模拟器。新模拟器  $\alpha'_n$  对任意  $N$  值都有多普勒频移非零。根据查表法原理, 仿真前, 根据  $n(1 \leq n \leq N)$  计算出各个周期内  $\cos(\omega_d t \cos \alpha'_n + \phi_n)$  和  $\sin(\omega_d t \cos \alpha'_n + \phi_n)$  的值并存放在一张查找表中, 执行仿真时,  $n, t$  的值查表可得。LOS 径  $\sqrt{k}/(1+k) \cos(\omega_d t \cos \theta_0 + \phi_0)$  和  $\sqrt{k}/(1+k) \sin(\omega_d t \cos \theta_0 + \phi_0)$  的值与  $N$  无关, 仿真前预先产生存放在表中即可。为了避免谐波函数自变量间的乘法运算, 可以使用归一化多普勒频移  $\Omega = \omega_d T_s, T_s$  为采样周期。综上所述可以看出, 新模拟器工作时不再再有三角运算, 作为代价仅仅是增添了对速度影响甚小的加法运算和状态控制语句, 因而运行速度得到了极大的提高。运行速度可用运算量衡量, 表 1 详细列出了新模拟器和 C S Xiao 模拟器运算量上的对比。可以看出, 与 C S Xiao 模拟器相比, 新模拟器的运算中没有乘法, 没有三角运算, 仅多了  $2N$  次对速度影响甚小的流程控制运算, 其他不变。速度方面的改善显而易见。

表 1 新模拟器和 C S Xiao 模拟器运算量

运算类型	运算量	
	新模拟器	C S Xiao 模拟器
乘法运算	0	4N
加法运算	4N-2	4N-2
三角运算	0	2N
流程控制运算	2N	0

新模拟器实部自相关函数(虚部的与其相同)、实虚部互相关函数和包络自相关函数如下:

$$R_{Y_c}(\tau) = R_{Y_s}(\tau) = \left\{ \frac{1}{2N} \left[ \sum_{n=1}^N \cos(\omega_d \tau \cos \alpha'_n) \right] + \right.$$

《微型机与应用》2013 年第 32 卷第 3 期

## 网络与通信 Network and Communication

$$k \cos(\omega_d \tau \cos \theta_0) / (2+2k) \quad (13)$$

$$R_{Y,Y_c}(\tau) = -R_{Y,Y_s}(\tau) = k \sin(\omega_d \tau \cos \theta_0) / (2+2k) \quad (14)$$

$$R_{YY}(\tau) = \left\{ \frac{1}{N} \left[ \sum_{n=1}^N \cos(\omega_d \tau \cos \alpha'_n) \right] + k \cos(\omega_d \tau \cos \theta_0) \right\} + jk \sin(\omega_d \tau \cos \theta_0) / (1+k) \quad (15)$$

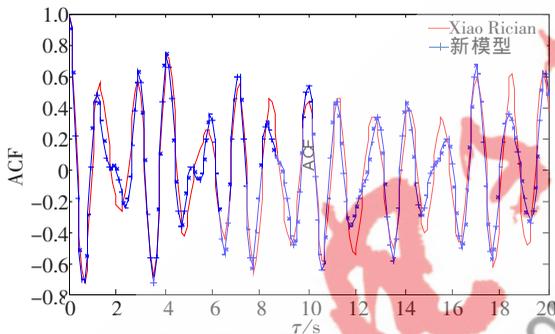
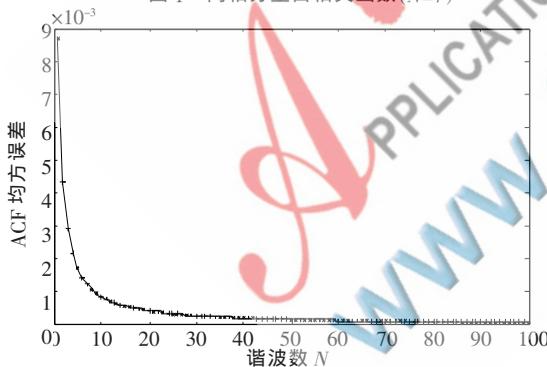
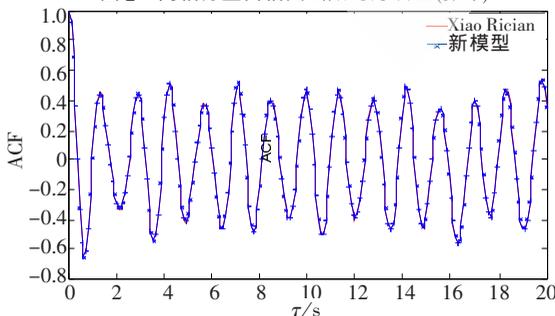
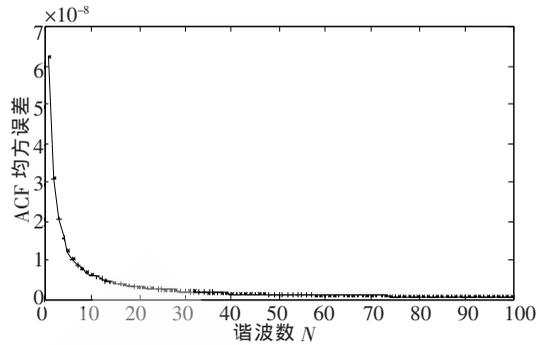
相关函数仅与时间间隔  $\tau$  有关,与时间  $t$  无关,模型广义平稳。包络概率密度函数(PDF)为:

$$f_{|Y|}(y) = 2(1+k)y \cdot \exp[-k - (1+k)y^2] \cdot I_0[2y\sqrt{k(1+k)}] \quad (16)$$

为了融入查表法,新模拟器弱化了 C S Xiao 模拟器中参数的随机性,必然在精度上有一定损失,下一小节即将通过仿真分析该问题。精度以自相关函数的均方误差衡量。在随后的仿真中可以看出,这个损失并不大,且随谐波数  $N$  增加,新模拟器将迅速逼近 C S Xiao 模拟器。

## 3 性能仿真

本节通过仿真,分析多普勒频移随机性减弱对模拟器精度的影响,以实部自相关函数为对象分析。仿真条件如下:采样周期  $T_s=1$  ms, Rice 因子为 1,最大多普勒频移为 91 Hz,直射波到达角为  $\pi/4$ 。仿真结果如图 1~图 4 所示。

图 1 同相分量自相关函数 ( $N=7$ )图 2 同相分量自相关函数均方误差 ( $N=7$ )图 3 同相分量自相关函数 ( $N=100$ )图 4 同相分量自相关函数均方误差 ( $N=100$ )

当取  $N=7$  时,新模拟器与 C S Xiao 模拟器统计特性曲线单从自相关函数曲线即可看出差异很明显,曲线重合度非常不好,均方误差为  $10^{-3}$  数量级。从理论上说,这是由于  $\alpha'_n$  的分布并不是真正的均匀分布,事实上,它随  $N$  的增大而逼近  $[-\pi, \pi]$  上  $\alpha'_n$  的均匀分布。可见,当  $N$  较小时的均匀分布特性不理想,导致多普勒频移随机性较差,因此新模拟器统计特性与 C S Xiao 模拟器吻合程度很差,也就是说新模拟器精度较差。经多次仿真,随着  $N$  增大,新模拟器统计特性迅速逼近 C S Xiao 模拟器。图 3、图 4 为  $N=100$  时新模拟器与 C S Xiao 模拟器统计特性对比。可以看到,当  $N=100$  时,新模拟器与 C S Xiao 模拟器统计特性重合度已很好,均方误差从  $10^{-3}$  数量级降到了  $10^{-8}$ ,这个数量级的误差在信道模拟中是可接受的。因此,当  $N \geq 100$  时即可认为新模拟器与 C S Xiao 模拟器具有同样良好的统计特性。

本文将查表法引入 Rice 信道模拟器的建模中,基于 SOS 模型和查表法设计了一种平坦 Rice 信道模拟器。该模拟器用查表法代替谐波运算,极大地减小了核心运算量,提高了模拟器的运行速度。为了避免查找表无限长,通过对模拟器数学模型的设计,适当弱化参量的随机性,使得查表法和 SOS 模型可以相容使用。最后通过仿真实证,虽然弱化了模拟器参量的随机性,但精度并未受到大的影响。均方误差表明新模拟器在精度上与未修改之前的模拟器相差甚小。在兼顾精度与速度的应用场合,新模拟器具有显著优势。

## 参考文献

- [1] MATTHIAS P. Mobile fading channels [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [2] AULIN T. A modified model for the fading signal at a mobile radio channel [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1979, 28(3):182-203.
- [3] YIP K W, NG T S. Discrete-time model for digital communications over a frequency-selective Rician fading WSSUS channel [J]. IEEE Proceedings Communications, 1996, 143(1):37-42.
- [4] MATTHIAS P, KILLAT U, LAVERGNE F, et al. On the statistical properties of deterministic simulation models for

- mobile fading channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1998, 47(1):254-269.
- [5] Xiao Chengshan, ZHENG R Y, BEAULIEU N C. Novel sum-of-sinusoids simulation models for Rayleigh and Rician fading channels [J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2006, 5(12):3667-3679.

(收稿日期:2012-02-17)

作者简介:

杜洋,男,1983年生,硕士,讲师,主要研究方向:移动通信、网络技术。

翁乾倩,女,1979年生,本科,助教,主要研究方向:计算机仿真技术。

文德钢,男,1988年生,硕士研究生,主要研究方向:无线通信。

