

6-3-2020

## Research and Simulation of Satellite Channel Three-State Markov Model under Fog-and-Haze Weather

Yecai Guo

*1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; ;2. Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAEET), Nanjing 210044, China;*

Lijian Cai

*1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; ;*

Weijuan Zhao

*1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; ;*

Xiuzai Zhang

*1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; ;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Research and Simulation of Satellite Channel Three-State Markov Model under Fog-and-Haze Weather

## Abstract

**Abstract:** To accurately reflect the influence on the statistical characteristics of satellite channel under the fog-and-haze weather, *the fog-and-haze weather was divided into the fog state, mixed state, and haze state, respectively, and their statistical characteristics were described by Rice model, Corazza model, and Suzuki model. Based on analyzing the conversion relation between fog-and-haze weather states, the satellite channel three-state Markov model was proposed. The defined joint level pass rate, the average fading duration and its relative error were used as the performance index of the satellite channel model, and the simulation tests were carried out.* The simulation results show that compared with the single state and two-state model of the satellite channel in the fog-and-haze weather, the proposed model can describe the fading characteristics of the satellite signals better, and is more close to the actual.

## Keywords

fog-and-haze weather, satellite channel, Markov model, statistical characteristics parameters

## Recommended Citation

Guo Yecai, Cai Lijian, Zhao Weijuan, Zhang Xiuzai. Research and Simulation of Satellite Channel Three-State Markov Model under Fog-and-Haze Weather[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(5): 941-949.

# 雾霾天气下卫星信道三状态 Markov 模型研究

郭业才<sup>1,2</sup>, 蔡力坚<sup>1</sup>, 赵卫娟<sup>1</sup>, 张秀再<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044; 2. 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044)

**摘要:** 为准确反映雾霾天气对卫星信道统计特性的影响, 将雾霾天气划分为雾状态、雾霾混合状态和霾状态, 分别用 Rice 模型、Corazza 模型和 Suzuki 模型进行描述; 根据雾霾天气状态间的转换关系, 建立了雾霾天气下卫星信道三状态 Markov 模型; 以定义的联合电平通过率、平均衰落持续时间及联合电平通过率的相对误差为性能指标进行了仿真验证。仿真结果表明, 与雾霾天气下卫星信道单状态和两状态模型相比, 卫星信道三状态 Markov 模型能更好地描述卫星信号的衰落特性, 更加贴近实际。

**关键词:** 雾霾天气; 卫星信道; Markov 模型; 统计特性参量

中图分类号: TN927.23

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 05-0941-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201705002

## Research and Simulation of Satellite Channel Three-State Markov Model under Fog-and-Haze Weather

Guo Yecai<sup>1,2</sup>, Cai Lijian<sup>1</sup>, Zhao Weijuan<sup>1</sup>, Zhang Xiuzai<sup>1</sup>

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAET), Nanjing 210044, China)

**Abstract:** To accurately reflect the influence on the statistical characteristics of satellite channel under the fog-and-haze weather, the fog-and-haze weather was divided into the fog state, mixed state, and haze state, respectively, and their statistical characteristics were described by Rice model, Corazza model, and Suzuki model. Based on analyzing the conversion relation between fog-and-haze weather states, the satellite channel three-state Markov model was proposed. The defined joint level pass rate, the average fading duration and its relative error were used as the performance index of the satellite channel model, and the simulation tests were carried out. The simulation results show that compared with the single state and two-state model of the satellite channel in the fog-and-haze weather, the proposed model can describe the fading characteristics of the satellite signals better, and is more close to the actual.

**Keywords:** fog-and-haze weather; satellite channel; Markov model; statistical characteristics parameters

## 引言

随着卫星通信技术的不断发展, 人们对通信

质量的要求越来越高。在卫星通信系统中, 信道传播特性直接影响着系统的通信质量。因此, 在卫星通信系统研究中, 分析信道传播特性, 建立贴近实际的信道模型十分必要。目前, 在卫星信道建模研究中, 主要考虑卫星及接收终端不断移动导致信号在传播路径上受树木、建筑物或其他障碍物的影响, 造成电磁波(后文简称为信号)传输



收稿日期: 2015-05-22 修回日期: 2016-04-25;  
基金项目: 国家自然科学基金(61673222, 61371131),  
江苏省高校自然科学研究重大项目(13KJA510001),  
江苏高校品牌专业建设项目(PPZY2015B134);  
作者简介: 郭业才(1962-), 男, 安徽安庆, 博士,  
教授, 博导, 研究方向为水声信号处理、通信信号  
处理、自适应均衡技术。

<http://www.china-simulation.com>

时发生反射、折射(多径效应)以及吸收或阻挡(阴影效应)等<sup>[1-2]</sup>。对于工作在高频段的卫星通信系统而言, 还需考虑大气环境中气体、云雾、降雨、沙尘等对卫星通信的影响。文献[3]研究了云对气象卫星通信的影响并建立了气象卫星复合信道模型; 文献[4]提出了一种雨衰统计动态模型, 用以描述降雨造成的近地轨道卫星链路中的信号衰减情况; 文献[5]则研究了中尺度沙尘暴对量子卫星信道的影响, 并仿真了沙尘特性对量子卫星信道参数的影响。然而, 雾霾天气对卫星通信的影响研究并未见公开报道的成果。近年来, 雾霾天气的频繁出现, 不仅影响了人们的身体健康, 也对卫星传播的信号造成了衰减或损耗, 严重地影响着卫星通信质量<sup>[6-7]</sup>。因此, 研究雾霾天气下卫星信道的传播特性, 建立描述信道传播特性的卫星信道模型, 从而为改善卫星通信质量提供理论依据。

## 1 雾霾天气下卫星信道传播特性

雾霾天气的主要物质是雾和霾, 根据中国气象局定义: 雾是指在接近地球表面、大气中悬浮的由小水滴或冰晶组成的水汽凝结物; 霾, 也称灰霾(烟霞), 是指因大量烟、尘等微粒悬浮而形成的浑浊现象, 其主要物质是空气中悬浮的灰尘颗粒, 气象学上称为气溶胶颗粒。雾与霾的区别主要在于能见度范围和相对湿度的不同, 雾的水平能见度 $<1$  km, 霾的水平能见度 $<10$  km; 雾的相对湿度 $>90\%$ , 霾的相对湿度 $<80\%$ , 相对湿度介于 $80\% \sim 90\%$ 是霾和雾的混合物, 其主要成分是霾<sup>[8]</sup>。雾霾天气发生范围往往较大, 漫天浑浊, 空气中所含物质主要包括雾、灰尘、硫酸、有机碳氢化合物等粒子, 甚至有的还含有重金属元素。所以在雾霾天气下卫星信道建模研究中, 必须考虑雾霾对信号传输的影响。由于雾霾中所含物质比较复杂, 所以本研究作简化处理, 假设: (1) 雾霾中仅含雾和灰尘两种物质; (2) 雾霾对卫星信号的传播影响和云雾相似。本节着重分析雾霾天气下卫星信道传播特性。

### 1.1 多径效应

信号在传播过程中由于反射、散射及绕射等引起的多径效应广泛存在于卫星通信的各个频段, 造成信号的衰减。研究表明, 多径效应对信道的影响可以用 Rice 分布来描述<sup>[1]</sup>, 其概率密度函数为

$$p_{\text{Rice}}(r) = \frac{r}{\sigma_1^2} \exp\left(-\frac{r^2 + \rho^2}{2\sigma_1^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{\rho r}{\sigma_1^2}\right) \quad (r \geq 0) \quad (1)$$

式中:  $I_0(\cdot)$ 是第一类修正的零阶 Bessel 函数;  $2\sigma_1^2$ 是散射功率;  $\rho$ 是直射分量的强度, 并且定义  $K = \rho^2/2\sigma_1^2$ 为 Rice 因子。

当直射波强度  $\rho$  逐渐变弱为 0 时, Rice 分布信号包络的概率密度函数转化为

$$p_{\text{Ray}}(r) = \frac{r}{\sigma_1^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_1^2}\right) \quad (r \geq 0) \quad (2)$$

此时, 信号包络服从 Rayleigh 分布, 也即用 Rayleigh 分布描述没有直射波成分的多径传播环境。

### 1.2 阴影效应

在星地链路中, 卫星通信受障碍物(如树木、建筑物、云雾)遮掩产生的阴影效应影响, 会削弱信号的强度。理论和大量实验研究表明, 阴影效应对信道的影响可以由 Lognormal 分布来描述<sup>[2]</sup>, 其概率密度函数为

$$p_{\text{LN}}(r) = \frac{20}{\sqrt{2\pi\sigma_u^2 r \ln(10)}} \times \exp\left(-\frac{(20 \lg r - m_u)^2}{2\sigma_u^2}\right) \quad (r \geq 0) \quad (3)$$

式中:  $\sigma_u$ 和  $m_u$ 分别为对数正态分布的标准差和均值, 单位为 dB。

### 1.3 云雾衰减

云和雾都是水悬体, 其中掺杂着灰尘颗粒, 直径不会超过 0.01 cm, 在 20 GHz 以上的卫星通信系统中, 水悬体引起的衰减很大, 且随着频率增加和仰角减小而增大<sup>[9]</sup>。ITU-R 给出了云雾衰减的计算公式为

$$A_c = \frac{LK_1}{\sin \theta} \quad (4)$$

式中:  $10^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ;  $L$  为总柱状液态水含量, 单位为  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;  $K_1$  为衰减率系数, 其表达式为

$$K_1 = \frac{0.819f}{\varepsilon''(1 + \eta^2)} \quad (5)$$

式中:  $f$  为频率。  $\eta$  的表达式为

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (6)$$

式中:  $\varepsilon'$  和  $\varepsilon''$  为水的复介电常数的实部和虚部。

基于本文的假设(1)和(2), 可用计算云雾衰减的方法来计算雾霾天气下信道对信号衰减的影响。

## 2 雾霾天气下卫星信道三状态 Markov 模型

本文主要根据雾与霾相对湿度不同, 将雾霾天气下卫星信道建模为三状态 Markov 模型, 如图 1 所示。图中 3 个状态分别为: 相对湿度达到 90% 以上的雾状态, 记为  $s_f$ ; 相对湿度低于 80% 的霾状态, 记为  $s_h$ ; 相对湿度在 80%~90% 之间的雾霾混合状态, 记为  $s_m$ 。随着气候环境的变化, 相对湿度会发生变化, 雾霾中雾与霾的比例也会发生变化, 雾霾混合状态为其过渡状态, 即雾和霾之间不可瞬间剧烈转换, 须通过一定的时间和过程才能实现由雾到霾或由霾到雾的转变。

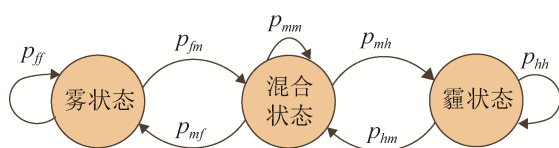


图 1 雾霾天气下三状态 Markov 模型  
Fig. 1 Three state Markov model under fog and haze weather

### 2.1 雾状态天气下的 Rice 模型

当雾霾天气下空气相对湿度高于 90% 时, 其主要的影晌物质为雾。由式(4)知, 雾对信号传播产生影响, 会造成信号衰减, 终端接收的信号存在直射信号。因此, 可将此种情形下的卫星信道建模成式(1)所示的 Rice 模型。模型中的参数可根据实际情况设定。

### 2.2 雾霾混合状态天气下的 Corazza 模型

当雾霾天气下空气相对湿度在 80%~90% 之间时, 为雾和霾的混合体。此时接收信号中既有直射信号分量又有多径分量, 同时信号在卫星信道传播时还受阴影效应影响, 将此种情况下的卫星信道建模为 Rice 分布和 Lognormal 分布组成的 Corazza 模型<sup>[10]</sup>, 其接收信号包络的概率密度函数为

$$p_{Cor}(r) = \frac{20r}{\sigma_2^2 \sigma_{u2} \sqrt{2\pi \ln(10)}} \int_0^\infty \frac{1}{z^3} \times \exp\left(-\frac{(r/z)^2 + \rho^2}{2\sigma_2^2}\right) \times I_0\left(\frac{r/z \cdot \rho}{\sigma_2^2}\right) \times \exp\left(-\frac{(20 \lg z - m_{u2})^2}{2\sigma_{u2}^2}\right) dz \quad (r \geq 0) \quad (7)$$

式中:  $\sigma_2$  是 Rice 分布中各高斯分量的标准差;  $\rho$  为直射分量的大小;  $\sigma_{u2}$  和  $m_{u2}$  分别为对数正态分布的标准差和均值, 单位为 dB。

### 2.3 霾状态天气下的 Suzuki 模型

当雾霾天气下空气相对湿度低于 80% 时, 其主要成分为灰霾。灰霾对信号传播的影响最为严重, 信号中直射分量会被完全遮挡且受阴影效应影响。将这种接收信号中只有阴影效应的多径信道建模为 Rayleigh 分布和 Lognormal 分布组成的 Suzuki 模型<sup>[11]</sup>, 其接收信号包络的概率密度函数为

$$p_{Suz}(r) = \frac{20r}{\sigma_3^2 \sigma_{u3} \sqrt{2\pi \ln(10)}} \int_0^\infty \frac{1}{z^3} \times \exp\left(-\frac{(r/z)^2}{2\sigma_3^2}\right) \times \exp\left(-\frac{(20 \lg z - m_{u3})^2}{2\sigma_{u3}^2}\right) dz \quad (r \geq 0) \quad (8)$$

式中:  $\sigma_3$  为 Rayleigh 分布中各高斯分量的标准差;  $\sigma_{u3}$  和  $m_{u3}$  分别为对数正态分布的标准差和均值, 单位为 dB。

### 2.4 雾霾天气下的三状态 Markov 模型

某一地区的雾霾天气常常会持续数日, 且随着温度、风向周期性等气象条件不断地改变, 空气相对湿度发生变化, 导致空气中雾和霾成分的改变。

这种变化表现为卫星通信中雾状态( $s_f$ )、混合状态( $s_m$ )和霾状态( $s_h$ )之间的转换,长期变化过程可用三状态 Markov 模型来描述,以较准确地反映雾霾天气下卫星信道的动态特性。Markov 模型可以用状态空间  $S$ 、状态转移矩阵  $P$  和状态概率矩阵  $A$  来表示<sup>[12]</sup>, 状态空间  $S$  为

$$S = (s_f, s_m, s_h) \quad (9)$$

由雾霾天气的实际情况可知, 三状态模型中  $s_m$  为中间状态, 即  $s_h$  和  $s_f$  状态之间不可直接转换, 只有通过  $s_m$  状态才能实现转换。不存在霾状态和雾状态之间直接转换的可能性, 所以状态转移矩阵中雾、霾之间的转移概率  $p_{fh}$  和  $p_{hf}$  均为 0。故状态转移矩阵可写为

$$P = \begin{bmatrix} p_{ff} & p_{fm} & 0 \\ p_{mf} & p_{mm} & p_{mh} \\ 0 & p_{hm} & p_{hh} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $p_{ff}$  表示保持雾状态不变的概率;  $p_{fm}$  表示由雾状态转移到混合状态的转移概率, 其余状态之间转移概率的表示以此类推。

状态概率矩阵  $A$  ( $A=[A_1 A_2 A_3]$ ) 表示各状态所占百分比, 且  $A_1 + A_2 + A_3 = 1$ 。此 Markov 链是非周期、不可约的, 所以其稳态概率分布存在, 且等于状态概率分布。在该 Markov 模型中,  $k$  次转移之后的状态概率分布  $A$  可表示为

$$A = AP^k \quad (11)$$

式中:  $P^k$  表示状态转移矩阵的  $k$  次相乘。

根据气象观测站对某一地区雾霾天气的观测数据进行统计分析<sup>[8,13]</sup>, 可得该地区某一时间段内雾霾天气的变化过程与受影响的天数, 即得各状态之间的转移概率和各状态所占比例。

### 3 信道仿真实现

信道理论模型是信道传播特性的数学反映, 应用在科研生产中的模型都需是硬件或软件可实现的模型, 否则理论模型将没有现实意义。因此, 理论模型实现方法研究是信道建模的关键环节。同时, 信道模型的统计特性参量是描述和衡量信道性

能的主要指标。本节采用成形滤波器法产生互不相关的色高斯过程, 再由互不相关的色高斯过程产生 Rice 分布、Rayleigh 分布、Lognormal 分布等随机过程, 进而建立三状态 Markov 仿真实现方法; 由单状态信道信号包络的电平通过率和平均衰落持续时间这 2 个二阶统计特性参量, 定义三状态信道信号包络的联合电平通过率和联合平均衰落持续时间等参数, 作为理论模型与仿真实现结果的吻合度评价指标, 以评价所建模型的准确性。下面研究雾霾天气下卫星信道三状态 Markov 模型的实现方法以及该模型的统计特性。

#### 3.1 卫星信道模型的仿真实现方法

所有信道模型均是建立在多个有色高斯过程基础之上, 因此对信道理论模型的仿真首先是实现有色高斯过程的仿真。本节采用成形滤波器法实现有色高斯过程的仿真, 如图 2 所示。

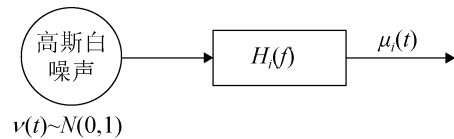


图 2 成形滤波器法实现有色高斯过程  
Fig. 2 Shaping filter method for colored Gauss process

该方法是在线性时不变滤波器  $H_i(f)$  的输入端输入高斯白噪声, 即  $v(t) \sim N(0,1)$ , 则输出有色高斯过程  $\mu_i(t)$  的功率谱密度满足  $S_{\mu_i, \mu_i}(f) = |H_i(f)|^2$ , 且  $S_{\mu_i, \mu_i}(f)$  为

$$S_{\mu_i, \mu_i}(f) = \frac{\sigma^2}{\pi f_m \sqrt{1 - (f/f_m)^2}} \quad |f| < f_m \quad (12)$$

式中:  $\sigma^2$  表示有色高斯过程的方差;  $f_m$  表示最大多普勒频率。

雾霾天气下卫星信道三状态 Markov 模型由 Rice 模型、Corazza 模型和 Suzuki 模型 3 种单状态模型实现, 这 3 种单状态模型分别对应于雾状态、雾霾混合状态以及霾状态天气。具体实现方法, 如图 3 所示。

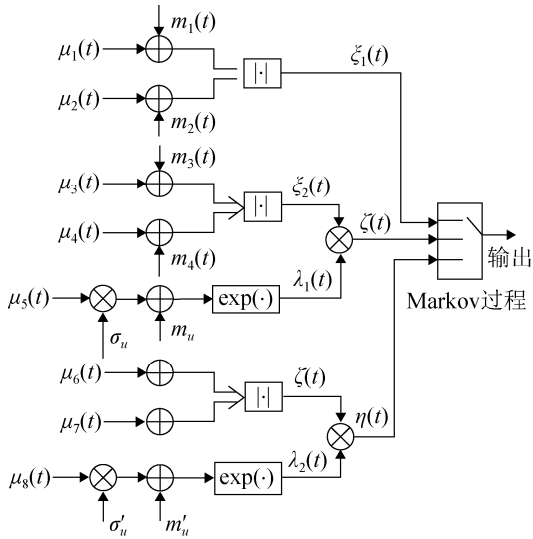


图 3 三状态信道模型仿真实现框图  
Fig. 3 Simulation block diagram of three state channel

图 3 中:  $\mu_i(t)(i=1, 2 \dots 8)$  为互不相关的有色高斯过程;  $m_i(t)(i=1, 2, 3, 4)$  为直射分量;  $\xi_i(t)(i=1, 2)$  是服从 Rice 分布的衰落信号;  $\zeta(t)$  是服从 Rayleigh 分布的衰落信号;  $\lambda_i(t)(i=1, 2)$  是服从对数正态分布的慢衰落信号;  $\sigma_{u2}, \sigma_{u3}$  为对数正态分布的标准差;  $m_{u2}, m_{u3}$  为对数正态分布的均值;  $|\cdot|$  表示复随机过程的模值;  $\exp(\cdot)$  表示进行指数运算。

### 3.2 三状态 Markov 模型仿真实现

图 1 所示的三状态 Markov 模型可以分为 3 个子模块实现。子模块实现方法, 如图 4 所示。图中  $U_1(0, 1), U_2(0, 1)$  和  $U_3(0, 1)$  为区间  $[0, 1]$  上服从均匀分布且相互独立的随机数发生器, 其产生随机数的频率由雾霾变化的快慢决定。开关 K1, K2 和 K3 的选择门限分别为  $p_{fm}, p_{mm}$  和  $p_{mf}, p_{hm}$ 。状态间转换的实现方法为如下:

- (1) 当前一状态为  $s_f$  时, 选择开关 K1 工作, 开关 K2, K3 悬空, 若  $U_1(0, 1)$  产生的随机数  $\geq p_{fm}$ , 则开关 K1 转向  $s_m$  状态, 否则继续保持  $s_f$  状态;
- (2) 当前一状态为  $s_m$  时, 选择开关 K2 工作, 开关 K1, K3 悬空, 若  $U_2(0, 1)$  产生的随机数  $> p_{mh}$ , 则开关 K2 转向  $s_h$  状态, 若  $U_2(0, 1)$  产生的随机数  $< p_{mf}$ , 则开关 K2 转向  $s_f$  状态, 否则继续保持  $s_m$  状态;
- (3) 当前一状态为  $s_h$  时, 选择开关 K3 工作,

开关 K2, K1 悬空, 若  $U_3(0, 1)$  产生的随机数  $\geq p_{hm}$ , 则开关 K3 转向  $s_m$  状态, 否则继续保持  $s_h$  状态;

(4) 参照(1)~(3), 即可实现雾霾天气下卫星信道状态间的相互转换。

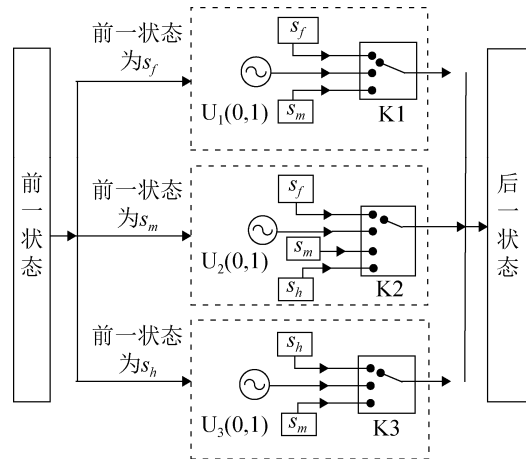


图 4 三状态 Markov 模型子模块实现框图  
Fig. 4 Submodule block diagram of three state Markov model

### 3.3 卫星信道模型的统计特性

信道模型的统计特性参量主要有<sup>[14]</sup>: 一阶统计特性——概率密度函数和累积分布函数, 反映接收信号包络(或功率)低于给定门限的总时间或总概率; 二阶统计特性——电平通过率和平均衰落持续时间, 则反映接收信号包络(或功率)低于给定门限的次数和平均持续时间。

累积分布函数是指信号包络  $\lambda(t)$  小于或等于给定电平  $r$  的概率, 即

$$F_{\lambda}(r) = p(\lambda(t) \leq r) = \int_0^r p_{\lambda}(x) dx \quad (13)$$

根据接收信号包络的概率密度函数和累积分布函数, 将该雾霾天气下卫星信道三状态 Markov 模型的联合累积分布函数定义为

$$F(r \leq r_0) = \int_0^{r_0} p(r) dr = \int_0^{r_0} (A_1 p_{\text{Rice}}(r) + A_2 p_{\text{Cor}}(r) + A_3 p_{\text{Suz}}(r)) dr \quad (14)$$

电平通过率是指单位时间内信号包络  $\lambda(t)$  从高到低(或从低到高)通过一个给定电平  $r$  的次数, 与信号包络和时间有关。电平通过率  $N_{\lambda}(r)$  为

$$N_{\lambda}(r) = \int_0^{\infty} x' f_{\lambda\lambda'}(r, x') dx' \quad (r \geq 0) \quad (15)$$

式中:  $f_{\lambda\lambda'}(r, x')$  表示信号包络  $\lambda(t)$  和同一时刻的时间导数  $\lambda'(t) = d\lambda(t)/dt$  的联合概率密度函数。此时, 将雾霾天气下卫星信道三状态 Markov 模型的联合电平通过率定义为

$$N(r) = \int_0^{\infty} (x' p_{\lambda_1\lambda_1}(r, x') + x' p_{\lambda_2\lambda_2}(r, x') + x' p_{\lambda_3\lambda_3}(r, x')) dx' = A_1 N_1(r) + A_2 N_2(r) + A_3 N_3(r) \quad (16)$$

$$\text{式中: } \begin{cases} N_1(r) = \sqrt{\frac{\beta_1}{2\pi}} p_{\text{Rice}}(r) \\ N_2(r) = \sqrt{\frac{\beta_2}{2\pi}} \int_0^{\infty} K_2(r, z) p_{LN}(z) p_{\text{Rice}}(r/z) dz \\ N_3(r) = \sqrt{\frac{\beta_3}{2\pi}} \int_0^{\infty} K_3(r, z) p_{LN}(z) p_{\text{Ray}}(r/z) dz \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $\gamma = (2\pi f_c / \sqrt{2 \ln 2})^2$ ,  $f_c$  为 3 dB 截止频率,  $\beta_i = 2\sigma_i^2 (\pi f_{\text{max}})^2$  ( $i=1,2,3$ ),  $K_j(r, z) = \sqrt{1 + \frac{\gamma}{\beta_j} \left( \frac{r\sigma_{ij}}{z} \right)^2}$  ( $j=2,3$ )。

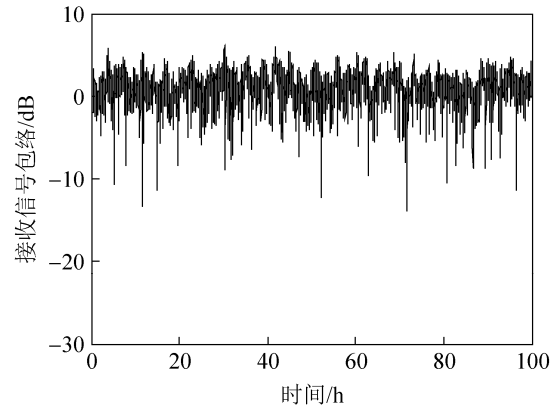
平均衰落持续时间是指信号包络  $\lambda(t)$  低于给定电平  $r$  的平均持续时间, 该模型的联合平均衰落持续时间  $T(r)$  为

$$T(r) = \frac{F(r \leq r_0)}{N(r)} \quad (18)$$

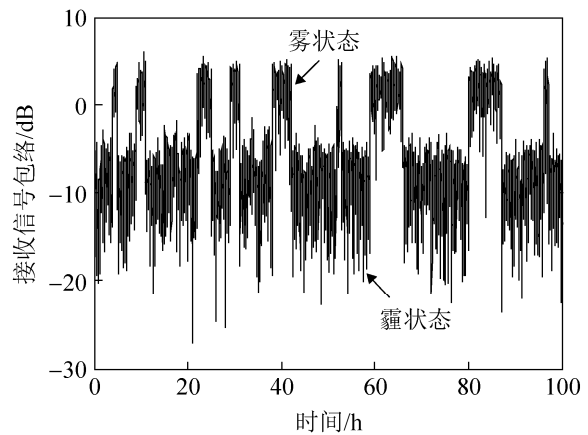
### 3.4 仿真分析

为了验证所建模型的有效性, 本文选取雾霾天气下某地区观测站获得的相关数据<sup>[8,13,15]</sup>进行仿真实验研究。以雾霾天气下卫星信道单状态模型(雾霾混合状态下的 Corazza 模型)、两状态 Markov 模型(雾状态下 Rich 模型和霾状态下 Suzuki 模型)为比较对象, 进行仿真实验。在雾霾天气下卫星信道三状态 Markov 模型中, 信道状态的转移频率由文献[8]记录的实际天气情况的天数统计获得。根据雾霾天气下信道理论分析可知, 不同天气情况下接收终端接收到的信号包络应明显存在不同程度的衰落。为准确地描述信号衰落程度的不同, 区分信道的不同状态, 故将信道仿真参数设置如下: Rice 信道仿真模型中, 方差为 0.5, 直射分量强度为 1.5; Corazza 信道仿真模型中, Rice

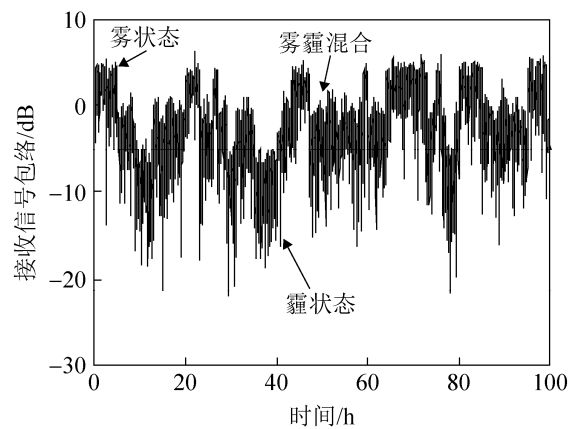
分布的方差为 0.5, 直射分量强度为 1, 对数正态分布的标准差为 1.5 dB, 均值为 -8 dB; Suzuki 信道仿真模型中, Rayleigh 分布的方差为 0.05, 对数正态分布的标准差为 1 dB, 均值为 -5 dB。各状态下接收终端的信号包络, 如图 5 所示。



(a) 单状态模型



(b) 两状态模型



(c) 三状态模型

图 5 接收信号包络

Fig. 5 Envelope of received signals



图 5 给出了信道模型的接收信号包络图, 图 5(a)~(c)分别是利用单状态模型、两状态模型以及三状态模型模拟了雾霾天气下的卫星信道传播特性。图 5(a)表明, 接收信号的衰减程度没有明显的区分, 无法模拟实际对信道传播特性的影响。图 5(b)显示, 接收信号只有 2 种明显的不同程度衰落, 但在实际环境下, 雾霾之间的转换过程是无法瞬间完成的, 因此利用两状态模型描述雾霾天气下信道特性是不尽合理的。从图 5(c)可以看出, 接收信号明显存在 3 种不同程度的衰落, 分别对应于雾状态、混合状态和霾状态, 且状态转移相对频繁, 有利于进行长期预测; 同时, 在雾天气下信号衰减较小, 有霾时信号的衰减程度逐渐变大, 随着气候环境的不断变化空气中雾霾含量发生改变从而导致信道状态间的相互转换。

图 6~7 分别为 3 种信道模型的归一化电平通过率和归一化平均衰落持续时间。图 6 表明, 在低电平时本文所建三状态信道模型的联合电平通过率最大, 接收信号衰落最严重, 而单状态模型的信号衰落最小; 高电平时, 3 种信道模型的电平通过率差别较小, 接收信号衰减基本相同。图 7 表明, 在低电平门限时, 本文所建三状态信道模型的衰减持续时间比两状态和单状态信道模型的值大, 即信号发生严重衰落并且持续时间较长, 而单状态模型的信号衰落最小且持续时间最短; 在高电平门限下, 3 种信道模型的衰减持续时间基本一致, 此时信号的衰减较小, 通信质量也较好。

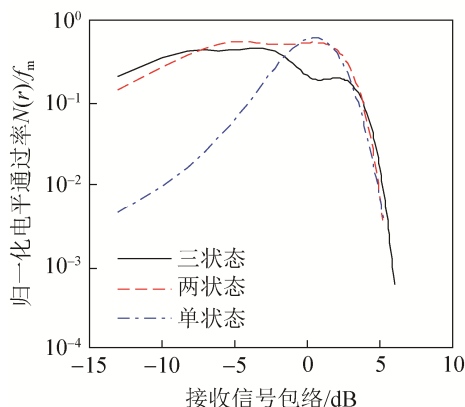


图 6 归一化联合电平通过率  
Fig. 6 Normalized joint level pass rate

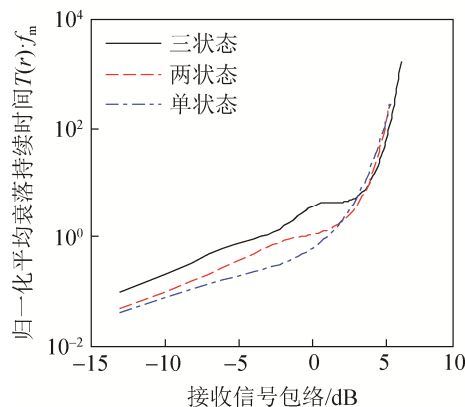


图 7 归一化平均衰落持续时间  
Fig. 7 Normalized average fading duration

以上分析可知, 与单状态和两状态信道模型相比, 本文所建卫星信道三状态 Markov 模型能更为准确地描述雾霾天气下卫星信道的传播特性。

图 8~9 分别为所建卫星信道三状态 Markov 模型的统计特性仿真结果与理论值的比较。从图 8~9 中可直观看出理论模型与仿真实现的统计特性曲线具有较高的吻合度, 只有在较高或较低电平时, 两统计特性参数的结果才存在细微偏差。图 10 为选取部分实验参数给出的归一化联合电平通过率仿真结果与理论值的相对误差结果, 从图中可看出仿真结果与理论值的相对误差基本控制在 10%以内, 只有在较高或较低电平时存在一定的偏差。表明本文所采用的信道仿真方法可较为准确地模拟卫星信道三状态 Markov 模型, 为研究雾霾天气对卫星通信的影响提供一定的理论基础与技术支持。

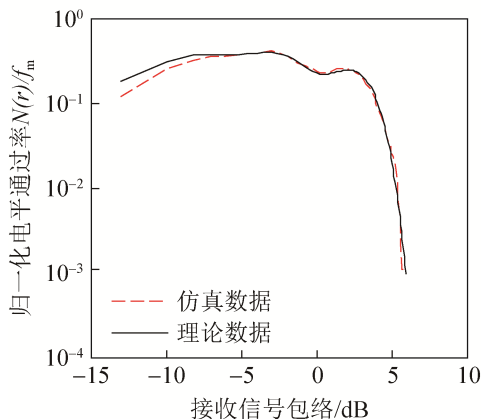


图 8 归一化联合电平通过率  
Fig. 8 Normalized joint level pass rate

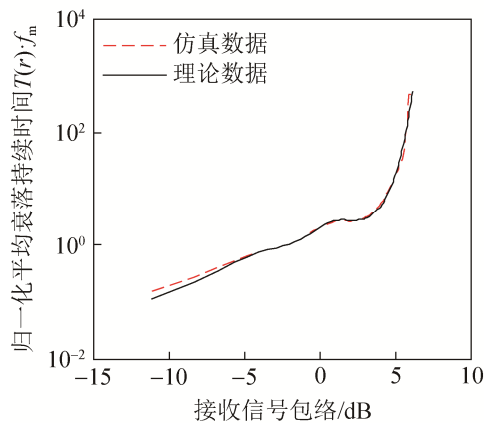


图9 归一化联合平均衰落持续时间  
Fig. 9 Normalized average fading duration

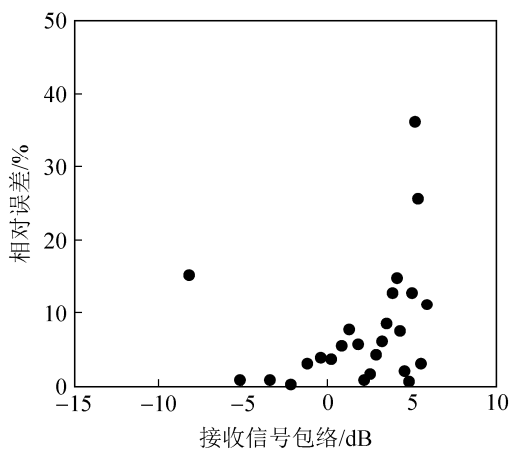


图10 归一化联合电平通过率的相对误差  
Fig. 10 Relative error of normalized joint level pass rate

## 4 结论

本文建立了雾霾天气卫星信道三状态 Markov 模型及其实现方法的研究。研究表明：在雾霾天气下，可根据实际空气的相对湿度，将卫星信道建模为雾状态、雾霾混合状态和霾状态间能够实现转换的三状态 Markov 模型，实现雾霾天气下卫星信道状态变化的周期性预测。本文的研究仅根据空气的相对湿度进行天气状态划分的，这从一个侧面反映了所建卫星信道模型贴近实际的情况，还缺乏全面性。因此在今后的研究中，可结合雾霾天气中颗粒物大小、风速大小及风向等因素，对雾霾天气状态进行划分，并建立卫星信道多状态模型，使卫星信道建模研究更加全面完善，为如何改善卫星通信系统的性能提供理论依据。

## 参考文献：

- [1] Lutz E. Modeling of the Land Mobile Satellite Communications Channel [C]// IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, Torino, Italy. USA: IEEE, 2013: 199-202.
- [2] Cheffena M, Fontan F P. Channel Simulator for Land Mobile Satellite Channel Along Roadside Trees [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation (S0018-926X), 2011, 59(5): 1699-1706.
- [3] Zhang X Z, Guo Y C, Yang C J. The Meteorological Satellite Composite Channel Model under Cloudy Weather Conditions [J]. Journal of Computational Information Systems (S1552-9105), 2013, 9(13): 5337-5344.
- [4] Kourogioras C, Panagopoulos A D. A Rain Attenuation Stochastic Dynamic Model for LEO Satellite Systems Above 10GHz [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology (S0018-9545), 2014, 64(2): 829-834.
- [5] 聂敏, 尚鹏钢, 杨光, 等. 中尺度沙尘暴对量子卫星通信信道的影响及性能仿真 [J]. 物理学报, 2014, 63(24): 240303. (Nie Min, Shang Peng-Gang, Yang Guang, et al. Influences of mesoscale sandstorm on the quantum satellite communication channel and performance simulation [J]. Acta Phys. Sin. 2014, 63(24): 240303.)
- [6] Awan M S, Leitgeb E, Marzuki, et al. Evaluation of Fog Attenuation Results for Optical Wireless Links in Free Space [C]// IEEE International Workshop on Satellite and Space Communications, Toulouse, France. USA: IEEE, 2008: 112-116.
- [7] 王秦, 陈曦, 何公理, 等. 北京市城区冬季雾霾天气 PM2.5 中元素特征研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1441-1445. (Wang Qin, Chen Xi, He Gong-li, et al. Study on characteristics of elements in PM2.5 during haze-fog weather in winter in urban Beijing [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(6): 1441-1445.)
- [8] 杨志彪, 陈冬冬, 徐向明. 霾观测判别标准量化对雾霾观测记录的影响 [J]. 气象科技, 2014, 42(2): 198-203. (Yang Zhibiao, Chen Dongdong, Xu Xiang ming. Influence of Identifying Index quantification on fog and haze observation records [J]. Meteorological Science and Technology, 2014, 42(2): 198-203.)
- [9] Louis J Ippolito Jr. 卫星通信系统工程 [M]. 孙宝升译. 北京: 国防工业出版社, 2012: 109-111. (Louis J Ippolito Jr. Satellite communication system engineering

- [M]. Sun Baosheng translated. Beijing, China: National Defence Industry Press, 2012: 109-111.)
- [10] Yang M C, Meng F Y, Shi S, et al. Markov Chain based Two-state Satellite Mobile Channel Model [C]// IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (S1550-2252), Yokohama, Japan. USA: IEEE, 2011: 1-5.
- [11] Rafi G, Patzold M. The Impact of Shadowing on the Capacity of Mobile Fading Channels [C]// 4th International Symposium on Wireless Communication Systems, Trondheim. Piscataway USA: IEEE Press, 2007: 209-214.
- [12] Hui M, Shen D Y, Cui Y N, et al. A New Five-state Markov Model for Land Mobile Satellite Channels [C]// 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Kunming, China. Piscataway USA: IEEE Press, 2008: 1512-1515.
- [13] 丁一汇, 柳艳菊. 近50年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系 [J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 37-48. (Ding Yihui, Liu Yanju. Long term variation of fog and haze in China in recent 50 years and its relationship with atmospheric humidity [J]. Chinese Science: Earth Science, 2014, 44(1): 37-48.)
- [14] 陈伟. 移动衰落信道 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 20-22. (Chen Wei. Mobile Fading Channel [M]. Beijing, China: Pub-lishing House of Electronics Industry, 2009: 20-22.)
- [15] 张人禾, 李强, 张若楠. 2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 27-36. (Zhang Renhe, Li Qiang, Zhang Ruonan. Analysis of meteorological conditions of persistent strong fog and haze in eastern China in January 2013 [J]. Chinese Science: Earth Science, 2014, 44(1): 27-36.)

(上接第 940 页)

- [9] 孟秀艳, 王志良, 许鸣珠. 一种非线性状态模糊情感模型的研究与仿真 [J]. 系统仿真学报. 2009, 21(19):6232-6238. (Meng Xiuyan, Wang Zhiliang, Xu Mingzhu. Research on Nonlinear Emotion-model Based on Fuzzy Theory [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(19): 6232-6238.)
- [10] Lazarus R S. Emotion and adaptation [M]. UK: Oxford University Press, 1991.
- [11] Picard R W, Minka T P. Vision texture for annotation [J]. Multimedia Systems (S0942-4962), 1995, 3(1): 3-14.
- [12] 刘翠娟, 刘箴, 刘婷婷. 虚拟现实在焦虑症和自闭症治疗中的应用研究 [J]. 系统仿真学报, 2015, 27(10): 2233-2238. (Liu Cuijuan, Liu Zhen, Liu Tingting. Research of Virtual Reality Technology in the Treatment of Anxiety Disorders and Autism [J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(10): 2233-2238.)
- [13] 秦继伟, 郑庆华, 田锋, 等. 一种采用偏最小二乘回归的情绪调节策略预测模型 [J]. 西安交通大学学报. 2011, 45(6): 46-49. (Qin J W, Zheng Q H, Tian F. A Predictive Model for Emotion Regulation Strategies Using Partial Least Squares Regression [J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2011, 45(6): 46-49.)
- [14] Lauritzen S L. Graphical models [M]. UK: Oxford University Press, 1996.
- [15] Edwards D. Introduction to graphical modeling [M]. Germany: Springer Verlag, 2000.
- [16] Chow C, Liu C. Approximating discrete probability distributions with dependence trees [J]. Information Theory, IEEE Transactions on (S0018-9448), 1968, 14(3): 462-467.
- [17] Edwards D, de Abreu G C, Labouriau R. Selecting high-dimensional mixed graphical models using minimal AIC or BIC forests [J]. BMC Bioinformatics (S1471-2105), 2010, 11(1): 18.