

基于 Markov 过程的窄带地空信道建模与仿真

雷 磊¹, 李开明²

(1.空军工程大学训练部,西安,710051;2 空军工程大学信息与导航学院,西安,710077)

摘要 针对大范围地空通信信道无法采用传统信道模型确切描述的问题,根据空基平台高度,利用 Markov 过程对改进和修正后的 Rice 信道模型和 Loo 信道模型进行相互转换来尽可能精确地描述地空衰落信道。对每个模型都将其分为经历轻度遮蔽和严重遮蔽 2 种状态,根据特定地区环境,利用 Markov 过程对 2 种不同环境状态进行切换。去掉多径来波入射角在 $[0, 2\pi)$ 上均匀分布的理想化假设,采用 2 个相关的实高斯随机过程构成 Rice 过程的方法,完成对 Rice 信道模型和 Loo 信道模型的改进和修正,推导得到了改进和修正后两模型的多普勒功率谱和幅相概率密度函数表达式。仿真结果表明:改进和修正后模型的多普勒功率谱曲线呈非对称形状,模型的自由度和适应性得到扩展和提升,可以描述不同信道情形对信号传输的不同影响,能较好地反映实际情况。

关键词 Markov 过程;Rice 模型;Loo 模型;多普勒功率谱密度;幅相概率密度

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.01.006

中图分类号 V243.1;TN194 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)01-0029-06

Modeling and Simulation of Narrowband Ground-to-Air Channel Based on Markov Process

LEI Lei¹, LI Kaiming²

(1. Training Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Aimed at the problem that the channel of wide-range Air-to-Ground communication is hard to be exactly described by adopting traditional model of channel, according to the height of flight platform, the Markov Process is utilized as exactly as possible to describe Air-to-Ground fading channel from the switch of the improved Rice model and Loo model. In the meantime, every model is divided into slight and heavy occlusion states, and the Markov Process is used to switch for the two different environment states according to special local environment. Getting rid of the ideal assumption that incident angles of arrival wave from multi-path are submitted to uniform distribution in , then two relevant and real Gaussian models are constructed as a Rice process, the Rice model and Loo model are modified and optimized, the Doppler power spectrum and Amplitude-phase Probability Density Function of the two models after modification are deduced. The simulation results show that the curve of Doppler power spectrum should be the unsym-

收稿日期:2015-01-27

基金项目:国家自然科学基金(61271250)

作者简介:雷 磊(1981—),男,四川遂宁人,讲师,主要从事无线通信技术研究.E-mail:617596089@qq.com

引用格式:雷磊,李开明.基于 Markov 过程的窄带地空信道建模与仿真[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(1):29-34. LEI Lei, LI Kaiming. Modeling and Simulation of Narrowband Ground-to-Air Channel Based on Markov Process[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(1): 29-34.

metrical form after modification, the degree of freedom (DOF) and adaptability of the model are enhanced, the different influence to signal transmission in different channel states is distinctly depicted, and this can reflect the real conditions well.

Key words: Markov process; Rice model; Loo model; Doppler power spectral density; amplitude and phase probability density

地空通信属于超大区域通信,其实际的信道衰落过程是非平稳的,但通过理论分析所建立的地空信道模型都是具有恒定参数的平稳随机过程^[1]。由于对不同信道状态都可用一个特定的平稳随机过程表示,因此,如果理论分析建立的平稳模型适应性足够强,就基本能够反映出实际信道的动态变化。

对于高空平台,地空通信时的直射分量在大部分时间都是存在的,只是由于阴影效应而造成直射分量的慢速变化^[2-3],可用经典 Loo 信道模型来描述地空信道^[4-5]。对于中、低空平台,则要求地空信道模型能够描述的地域相对广泛。为此,可用 Rice 信道模型来描述^[6]。

本文针对窄带地空通信,提出了一种基于 Markov 过程的地空信道模型,根据平台高度对经典 Loo 模型和 Rice 模型进行切换。

1 地空 Markov 过程信道模型概述

地空通信双方会在较大的范围内移动,两者的相对位置和所处环境也会随之变化,很难用唯一确定的信道模型来对实际情况加以描述。

由于环境特性一般是缓变的,因而可将其近似划分为一些相对稳定的小区域环境,对于小区域环境的地空通信可大致分为经历轻度和严重遮蔽 2 种状态^[7]。

另外,在相同环境状态下,空基平台高度不同,适合的信道描述模型也有所不同。为此,贴近实际的地空信道建模可利用 Markov 过程的无后效性对高适应性的信道描述模型和经历的状态加以转换和切换^[8]。

具体而言,就是将针对中、低空平台地空通信的 Rice 信道模型与适合描述高空平台地空通信的经典 Loo 信道模型加以改进和修正,再分别将其赋予轻度和严重遮蔽 2 种状态,然后根据空基平台高度和特定区域环境,让描述模型与经历状态之间的转换和切换都服从 Markov 过程,建立的地空信道模型见图 1。

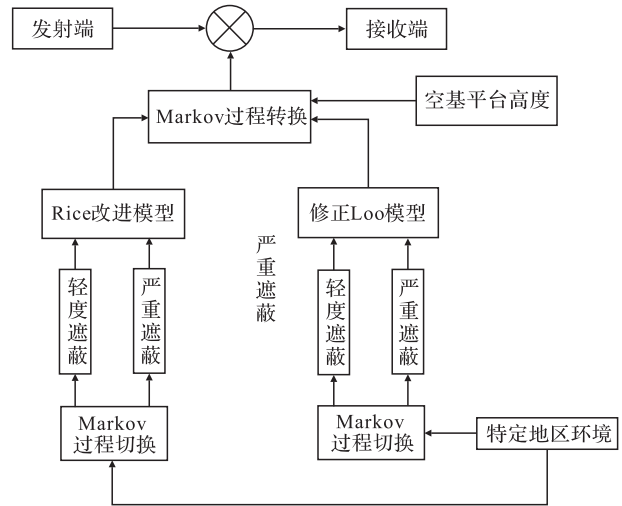


图1 地空 Markov 过程信道模型总体框图
Fig.1 The block diagram of ground-to-air channel model based on markov process

2 Rice 改进模型

改进的 Rice 模型见图 2。可以看出, $\mu_\rho(t)$ 中包含了 Rice 过程、Rayleigh 过程和单边高斯过程 3 种特例,即该模型具有通用性。2 个实高斯随机过程 $\mu_1(t)$ 和 $\mu_2(t)$ 是相关的。

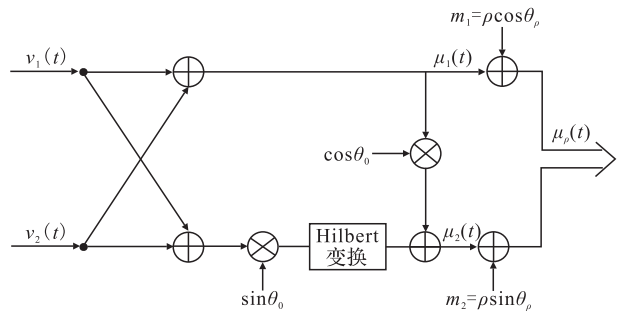


图2 Rice 改进模型框图
Fig.2 The block diagram of modified Rice model

图 2 中 $v_i(t)$ ($i = 1, 2$) 代表有色高斯过程,其对应的 Hilbert 变换用 $\hat{v}_i(t)$ 表示。参数 $\theta_0 \in [0, \pi)$ 用来控制 $\mu_1(t)$ 和 $\mu_2(t)$ 的相关性大小,当 $\theta_0 = 0^\circ$ 时,两者相同;当 $\theta_0 = 90^\circ$ 时,两者正交。

2.1 Rice 改进模型多普勒功率谱密度

文献[9]认为 $\mu_1(t)$ 和 $\mu_2(t)$ 互不相关的本质原因是理想化的假设多径来波入射角在 $[0, 2\pi)$ 上均匀分布,而实际地空通信中,空间障碍物数量往往

有限,且接收机一般多采用定向天线来提高通信距离。因此, $\mu_1(t)$ 和 $\mu_2(t)$ 互不相关的假设条件是不满足的。令 $\mu(t) = \mu_1(t) + j\mu_2(t)$, 则 $\mu(t)$ 的自相关函数和多普勒功率谱密度可表示为:

$$\begin{cases} r_{\mu\mu}(\tau) = 2[r_{v_1v_1}(\tau) + r_{v_2v_2}(\tau)] + \\ \quad j2[r_{v_1\dot{v}_1}(\tau) - r_{v_2\dot{v}_2}(\tau)]\sin\theta_0 \\ S_{\mu\mu}(f) = 2[1 + \text{sgn}(f)\sin\theta_0]S_{v_1v_1}(f) + \\ \quad 2[1 - \text{sgn}(f)\sin\theta_0]S_{v_2v_2}(f) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\text{sgn}(\cdot)$ 表示符号函数; $S_{v_i v_i}(f)$ 为 $v_i(t)$ 的多普勒功率谱密度,可由下式来表示:

$$S_{v_i v_i}(f) = \begin{cases} \frac{\sigma_i^2}{2\pi f_{\max} \sqrt{1-(f/f_{\max})^2}} |f| \leq \kappa_i f_{\max} \\ 0 |f| > \kappa_i f_{\max} \end{cases}, i = 1, 2 \quad (2)$$

$$\begin{cases} p_{\xi}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} p_{\xi\dot{\xi}\theta\dot{\theta}}(z, \dot{z}, \theta, \dot{\theta}) d\dot{\theta} d\theta dz = \\ \quad \frac{z}{2\pi\psi_0 |\sin\theta_0|} e^{-\frac{z^2 + \rho^2}{2\psi_0 \sin^2\theta_0}} \int_{-\pi}^{\pi} e^{\frac{z\rho\cos(\theta-\theta_0)}{\psi_0 \sin^2\theta_0}} e^{\frac{\cos(\theta_0)}{2\psi_0 \sin^2\theta_0} [z^2 \sin^2\theta + \rho^2 \sin^2\theta - 2z\rho\sin(\theta+\theta_0)]} d\theta, \quad z \geq 0 \\ p_{\theta}(\theta) = \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_{\xi\dot{\xi}\theta\dot{\theta}}(z, \dot{z}, \theta, \dot{\theta}) d\dot{\theta} dz dz = \\ \quad \frac{|\sin\theta_0|}{2\pi(1 - \cos\theta_0 \sin 2\theta)} e^{-\frac{\rho^2(1 - \cos\theta_0 \sin 2\theta)}{2\psi_0 \sin^2\theta_0}} \{1 + \sqrt{\pi} f(\theta) e^{f^2(\theta)} [1 + \text{erf}(f(\theta))]\}, \quad -\pi \leq \theta \leq \pi \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho_0 &= r_{\mu_1\mu_1}(0) = r_{\mu_2\mu_2}(0) = r_{v_1v_1}(0) + r_{v_2v_2}(0) = \\ & \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^2 \sigma_i^2 \arcsin(\kappa_i) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: ψ_0 表示 $\mu_1(t)$ 和 $\mu_2(t)$ 的平均功率(与文献[9]中的定义不同); $\text{erf}(\cdot)$ 表示误差函数; $f(\theta)$ 表示为:

$$f(\theta) = \frac{\rho[\cos(\theta - \theta_0) - \cos\theta_0 \sin(\theta + \theta_0)]}{|\sin\theta_0| \sqrt{2\psi_0(1 - \cos\theta_0 \sin 2\theta)}} \quad (5)$$

3 修正 Loo 模型

修正的 Loo 模型见图 3。直射分量幅度是随时间变化的变量 $\rho(t)$, 其多普勒频移为 f_{ρ} , 附加相移为 θ_{ρ} , 由于 Loo 信道模型不需要描述相对广泛的地域环境, 为了降低模型复杂度, 仅仅使 $\mu_1(t)$ 和 $\mu_2(t)$ 具有相关性, 而无需引入可灵活控制 $\mu_1(t)$ 和 $\mu_2(t)$ 相关性大小的参量 θ_0 。图 3 中其它参数含义与图 2 相同。

由图 3 可以看出, 修正的 Loo 模型包含 2 种特殊情况: ①当 $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_0^2$, $\kappa_1 = \kappa_2 = 1$ 和 $f_{\rho} = 0$ 时, 修正 Loo 模型可以化简为经典 Loo 模型^[5]; ②当 $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_0^2$, $\kappa_1, \kappa_2 \in [0, 1]$ 和 $\sigma_3^2 = 0$ 时, 修正 Loo 模型可以化简为基本高斯随机过程 $\mu_1(t)$ 和 $\mu_2(t)$ 相关的扩展 Rice 过程^[11]。

式中: σ_i^2 表示 $v_i(t)$ 的方差; f_{\max} 为最大多普勒频率; $\kappa_i \in [0, 1]$ 为截断常数(与多径分量到达角范围有关), 决定多普勒带宽。

2.2 Rice 改进模型幅相概率密度

推导 Rice 改进模型幅度 $\xi(t) = |\mu_{\rho}(t)|$ 和相位 $\vartheta(t) = \arg\{\mu_{\rho}(t)\}$ 统计特性的出发点是求出在时间 t 内同一时刻的关于 $(z, \dot{z}, \theta, \dot{\theta})$ 的联合概率密度(参数 (z, θ) 表示极坐标下的极径和极角, $(\dot{z}, \dot{\theta})$ 为其导数)。由图 2 可以看出, 直射分量由时不变的表达式 $\rho e^{j\theta_{\rho}}$ 来描述, 此种情况下可根据文献[10]对 $p_{\xi\dot{\xi}\theta\dot{\theta}}(z, \dot{z}, \theta, \dot{\theta})$ 的推导结果, 通过对其进行三重积分得到:

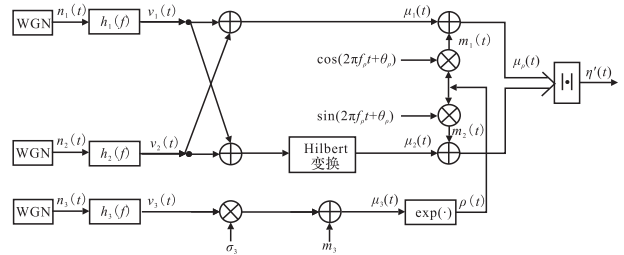


图 3 Loo 修正模型框图

Fig.3 The block diagram of correction Loo model

3.1 修正 Loo 模型多普勒功率谱密度

$\mu_{\rho}(t) = \mu_{\rho_1}(t) + j\mu_{\rho_2}(t)$ 的自相关函数可用 $\mu_{\rho_1}(t)$ 和 $\mu_{\rho_2}(t)$ 的自相关和互相关函数表示为:

$$\begin{aligned} r_{\mu_{\rho}\mu_{\rho}}(\tau) &= r_{\mu_{\rho_1}\mu_{\rho_1}}(\tau) + r_{\mu_{\rho_2}\mu_{\rho_2}}(\tau) + \\ & \quad j(r_{\mu_{\rho_1}\mu_{\rho_2}}(\tau) - r_{\mu_{\rho_2}\mu_{\rho_1}}(\tau)) \end{aligned} \quad (6)$$

由图 3 可得:

$$\begin{cases} r_{\mu_{\rho_1}\mu_{\rho_1}}(\tau) = r_{\mu_{\rho_2}\mu_{\rho_2}}(\tau) = \\ r_{v_1v_1}(\tau) + r_{v_2v_2}(\tau) + \frac{1}{2}r_{\rho\rho}(\tau)\cos(2\pi f_{\rho}\tau) \\ r_{\mu_{\rho_1}\mu_{\rho_2}}(\tau) = r_{\mu_{\rho_2}\mu_{\rho_1}}^*(-\tau) = \\ r_{v_1\dot{v}_1}(\tau) - r_{v_2\dot{v}_2}(\tau) + \frac{1}{2}r_{\rho\rho}(\tau)\sin(2\pi f_{\rho}\tau) \end{cases} \quad (7)$$

对数正态过程 $\rho(t)$ 的自相关函数 $r_{\rho\rho}(\tau)$ 和功率谱密度 $S_{\rho\rho}(f)$ 可表示为:

$$\begin{cases} r_{\rho\rho}(\tau) = e^{2m_3 + \sigma_3^2 [1 + r_{v_3 v_3}(\tau)]} \\ S_{\rho\rho}(f) = e^{2m_3 + \sigma_3^2} \left[\delta(f) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sigma_3^{2n}}{n!} \frac{S_{v_3 v_3}(\frac{f}{\sqrt{n}})}{\sqrt{n}} \right] \end{cases} \quad (8)$$

式中: $S_{v_3 v_3}(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \exp(-\frac{f^2}{2\sigma_c^2})$ 为高斯功率谱密度^[11] ($\sigma_c = f_c / \sqrt{2\ln 2}$, f_c 为 3 dB 截止频率), 其傅里叶反变换 $r_{v_3 v_3}(\tau) = \exp(-2(\pi\sigma_c\tau)^2)$; $\delta(\cdot)$ 为单位冲激函数。

由于 $r_{v_i v_i}(\tau)$ ($i=1, 2$) 和 $r_{\rho\rho}(\tau)$ 分别是实奇和实偶函数。因此, 式(6)可简化为:

$$\begin{aligned} r_{\mu\rho\mu\rho}(\tau) &= 2(r_{\mu\rho_1 \mu\rho_1}(\tau) + jr_{\mu\rho_1 \mu\rho_2}(\tau)) = \\ & 2(r_{v_1 v_1}(\tau) + jr_{v_1 v_2}(\tau)) + \\ & 2(r_{v_2 v_2}(\tau) - jr_{v_2 v_1}(\tau)) + r_{\rho\rho}(\tau) e^{j2\pi f_\rho \tau} \end{aligned} \quad (9)$$

对式(9)进行傅里叶变换可得多普勒功率谱密度为:

$$\begin{aligned} S_{\mu\rho\mu\rho}(f) &= 2(1 + \text{sgn}(f))S_{v_1 v_1}(f) + \\ & 2 \times (1 - \text{sgn}(f))S_{v_2 v_2}(f) + S_{\rho\rho}(f - f_\rho) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $S_{v_i v_i}(f)$ ($i=1, 2$) 和 $S_{\rho\rho}(f)$ 分别由式(2)和式(8)给出。

3.2 修正 Loo 模型幅相概率密度

由于 $\rho(t)$ 的时变性, 因此可用条件概率密度的计算方法来推导修正 Loo 模型幅度 $\eta'(t) = |\mu_\rho(t)|$ 和相位 $\vartheta'(t) = \arg\{\mu_\rho(t)\}$ 的统计特性。在 $\rho(t)$ 为常数的条件下 $\mu_\rho(t)$ 为扩展 Rice 过程^[11], 其幅度和相位条件概率密度函数可表示为:

$$\begin{cases} p_{\eta'}(z | \rho(t) = \rho) = \frac{z}{\psi_0} e^{-\frac{z^2 + \rho^2}{2\psi_0}} I_0\left(\frac{z\rho}{\psi_0}\right), \quad z \geq 0 \\ p_{\vartheta'}(\theta; t | \rho(t) = \rho) = \frac{e^{-\frac{\rho^2}{2\psi_0}}}{2\pi} \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\pi}{2\psi_0}} \rho \cos(\theta - 2\pi f_\rho t - \theta_\rho) e^{\frac{\rho^2 \cos^2(\theta - 2\pi f_\rho t - \theta_\rho)}{2\psi_0}} \left[1 + \text{erf}\left(\frac{\rho \cos(\theta - 2\pi f_\rho t - \theta_\rho)}{\sqrt{2\psi_0}}\right) \right] \right\}, \quad -\pi \leq \theta \leq \pi \end{cases} \quad (11)$$

式中: ψ_0 定义与式(4)相同; $I_0(\cdot)$ 表示第一类零阶修正贝塞尔函数。由式(11)可以看出, 当 $f_\rho \neq 0$ 时, 相位的条件概率密度永远是关于时间 t 的函数, 对其取关于时间 t 的平均, 可得到:

$$\begin{aligned} p'_{\vartheta'}(\theta; t | \rho(t) = \rho) &= \\ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T p_{\vartheta'}(\theta; t | \rho(t) = \rho) dt &= \frac{1}{2\pi}, \quad -\pi \leq \theta \leq \pi \end{aligned} \quad (12)$$

由于 $\rho(t)$ 为对数正态过程, 则修正 Loo 模型 $\mu_\rho(t)$ 的幅度和相位概率密度为:

$$\begin{cases} p_{\eta'}(z) = \int_0^\infty p_{\eta'}(z, y) dy = \\ \int_0^\infty p_{\eta'}(z | \rho(t) = y) p_\rho(y) dy = \\ \frac{z}{\sqrt{2\pi}\psi_0\sigma_3} \int_0^\infty \frac{1}{y} e^{-\frac{z^2 + y^2}{2\psi_0}} I_0\left(\frac{zy}{\psi_0}\right) e^{-\frac{(\ln y - m_3)^2}{2\sigma_3^2}} dy, \quad z \geq 0 \\ p_{\vartheta'}(\theta) = \int_0^\infty p_{\vartheta'}(\theta, y) dy = \\ \int_0^\infty p_{\vartheta'}(\theta | \rho(t) = y) p_\rho(y) dy = \frac{1}{2\pi}, \quad -\pi \leq \theta \leq \pi \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可以看出, $p_{\eta'}(z)$ 取决于 ψ_0 、 σ_3 和 m_3 3 个参量。如果直射分量的多普勒频移 $f_\rho \neq 0$, 则 $\vartheta'(t)$ 在 $[-\pi, \pi]$ 区间上是均匀分布的。

4 仿真分析

4.1 两模型多普勒功率谱密度仿真

当 $f_{\max} = 91 \text{ Hz}$, $\kappa_1 = 0.8$, $\kappa_2 = 0.3$, $\theta_0 = 15^\circ$, $\sigma_1^2 = 0.25$, $\sigma_2^2 = 1$ 时, Rice 改进模型 $S_{\mu_\rho}(f)$ 形状见图 4。 $f_{\max} = 91 \text{ Hz}$, $\kappa_1 = 0.8$, $\kappa_2 = 0.3$, $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 1$, $m_3 = 0$, $\sigma_3^2 = 0.01$, $f_\rho = 22.5 \text{ Hz}$, $\sigma_c^2 = 100$ 时, 修正 Loo 模型 $S_{\mu\rho\mu\rho}(f)$ 形状见图 5。

由图 4 可见, $S_{\mu_\rho}(f)$ 曲线形状是非对称的, 当 $\theta_0 = 90^\circ$, $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 1$, $\kappa_1 = \kappa_2 = 1$ 时, $S_{\mu_\rho}(f)$ 曲线变为典型的 Jakes 形状。 κ_1 决定多普勒总带宽, κ_2 决定起伏带宽, θ_0 决定曲线的起伏变化, 这符合地空通信中障碍物有限且采用定向天线接收的实际情况。图 5 中 $S_{\mu\rho\mu\rho}(f)$ 曲线形状是在图 4 特例的基础上 ($\theta_0 = 90^\circ$, $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 1$) 加入 $S_{\rho\rho}(f - f_\rho)$ 而构成, 反映了高空平台地空通信中直射分量对多普勒功率谱的影响。

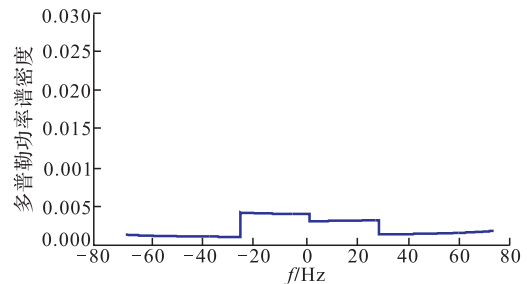


图 4 Rice 改进模型 $S_{\mu_\rho}(f)$ 曲线

Fig.4 Shape of the $S_{\mu_\rho}(f)$ curve of modified Rice model

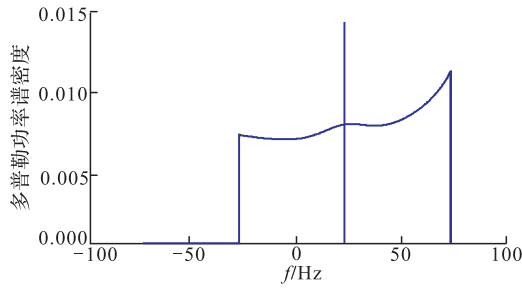


图 5 修正 Loo 模型 $S_{\rho\rho\rho}(f)$ 曲线

Fig.5 Shape of the $S_{\rho\rho\rho}(f)$ curve of correction Loo model

4.2 两模型幅相确定性仿真

用精确多普勒扩展法^[9,12]对理想高斯随机过程 $v_i(t)$ 进行模拟,所进行叠加的正弦波数量 $N_1 = N_2 = N_3 = 15$,最大多普勒频移 $f_{\max} = 91$ Hz,其它信道模型参数见表 1~2。

表 1 严重和轻度遮蔽区域的 Rice 改进信道模型基本参数

Tab.1 The parameters of modified Rice channel model in severe shadowing area and slight shadowing area

遮蔽区域	σ_1	σ_2	κ_1	κ_2	θ_0	ρ	θ_ρ	σ_3	m_3	f_{\max}/f_c
严重	0.089 4	0.746 8	1	0.165 1	0.398 8	0.262 6	30.3°	0.090 5	0.043 9	119.9
轻度	0.103 0	0.915 9	1	0.262 4	0.349 2	1.057	53.1°	0.006 2	-0.386 1	1.735

表 2 严重和轻度遮蔽区域的修正 Loo 信道模型基本参数

Tab.2 The parameters of correction Loo channel model in severe shadowing area and slight shadowing area

遮蔽区域	σ_1	σ_2	κ_1	κ_2	σ_3	m_3	θ_ρ	f_ρ/f_{\max}	f_{\max}/f_c
严重	0.000	0.385 6	0.000 1	0.499	0.534 9	-1.593	30°	0.185 7	20
轻度	0.404	0.478 5	0.622 3	0.400 7	0.262 8	-0.058 4	30°	0.079 5	20

对严重和轻度遮蔽 2 种环境状态下,Rice 改进模型和修正 Loo 模型的幅度衰落确定性仿真结果见图 6、图 7。

衰落较小,均值维持在 -5 dB 左右,且幅度波动范围不大;在严重遮蔽区域,信道幅度经历大的衰落,均值维持在 -17 dB 左右,且幅度上下波动剧烈。图 7 在严重和轻度遮蔽区域下得到的结论与图 6 类似,只不过对同一区域状态,修正 Loo 模型要比 Rice 改进模型对地空通信的影响更大一些,这是由于修正 Loo 模型主要描述的是高空平台,通信距离较远的缘故。图 7 中黑线为直射分量确定性幅度的缓慢变化,在轻度遮蔽区域的幅度变化较小,而在严重遮蔽区域的幅度变化较大,这也与高空平台地空通信的实际情况相符。

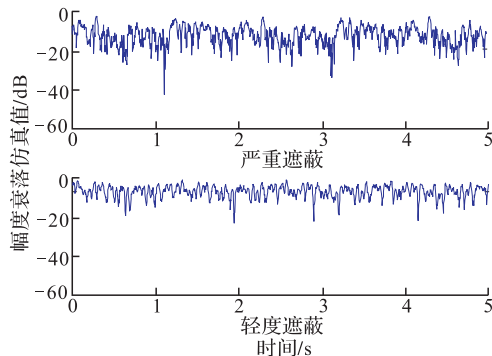


图 6 Rice 改进模型幅度衰落确定性仿真

Fig.6 Deterministic simulation results of amplitude fading of modified Rice model

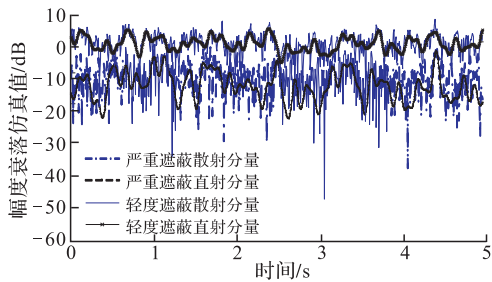


图 7 修正 Loo 模型幅度衰落确定性仿真

Fig.7 Deterministic simulation results of amplitude fading of correction Loo model

从图 6 中可以看出,在轻度遮蔽区域,信道幅度

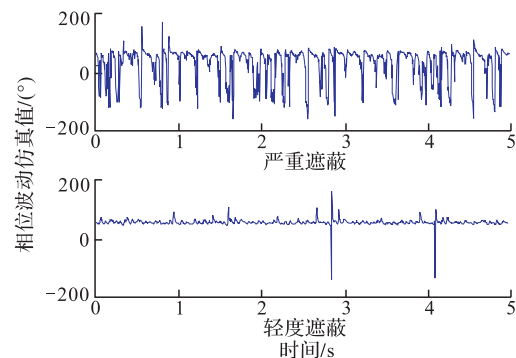


图 8 Rice 改进模型相位波动确定性仿真

Fig.8 Deterministic simulation results of phase fluctuating of modified Rice model

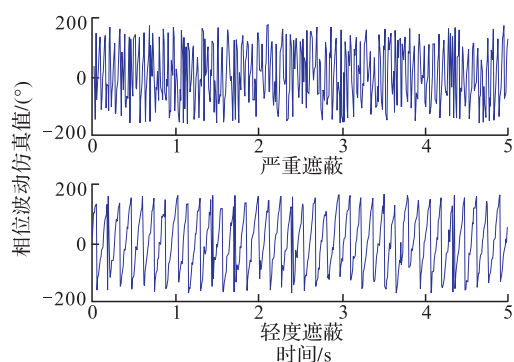


图9 修正 Loo 模型相位波动确定性仿真

Fig.9 Deterministic simulation results of phase fluctuating of correction Loo model

从图8中可以看出,在轻度遮蔽区域,信道相位基本保持在直射分量的相位 53.1° 附近;在严重遮蔽区域,信道相位严重偏离 30.3° 的直射分量相位,且出现较大的波动,最大几乎偏离了 180° 。图9中轻度和严重遮蔽区域环境状态对修正 Loo 模型信道相位的影响仅仅体现在相位值波动快慢上,而波动的幅度差别不大,这是因为 $\mathcal{D}'(t)$ 在 $[-\pi, \pi]$ 区间上是均匀分布的。

综合图6~9的仿真分析结论可以看出,根据区域所处环境状态和实际空基平台高度信息,采用 Markov 过程对模型和参数加以转换和切换就可应用于描述不同情况,满足大区域地空通信对信道模型的需求。

5 结语

采用2个相关的实高斯随机过程构成莱斯过程的方法对 Rice 和经典 Loo 信道模型进行改进和修正,模型描述的自由度得到扩展。通过改变推导出的改进和修正后的两模型多普勒功率谱密度和幅相概率密度表达式中的特定参数,即可得到参考的 Jakes 多普勒功率谱密度形状和扩展 Rice 过程、一般 Rice 过程、Rayleigh 过程、单边高斯过程等一系列特例。在实际中通过监测空基平台高度信息和校验区域环境状态,利用 Markov 过程对改进修正后模型和环境特性加以转换和切换,进而设置相应参数,可方便得到某一时段内信道对地空通信质量的影响程度,以便提高通信效率。

参考文献(References):

[1] C Pimentel, T H Falk, L Lisboa. Finite-state Markov Modeling of Correlated Rician-Fading Channels[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2004, 53(5):1491-1501.
 [2] 朱子行,梁俊.基于高空平台站通信的三状态马尔科夫信道模型[J].通信技术,2009,42(6):174-176.

ZHU Zihang, LIANG Jun. Three-State Markov Channel Model Based on High Altitude Platform Stations [J]. Communications Technology, 2009, 42(6): 174-176. (in Chinese)
 [3] 杨红卫,何晨,诸鸿文,等.平流层通信衰落信道的统计模型[J].上海交通大学学报,2002,36(3):331-336.
 YANG Hongwei, HE Chen, ZHU Hongwen, et al. Statistical Model for the Fading Channel of the Stratospheric Communication[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002, 36(3):331-336. (in Chinese)
 [4] C Loo. A Statistical Model for a Land Mobile Satellite Link[J]. IEEE Trans Veh Technol, 1985, 34(3):122-127.
 [5] C Loo, J S. Butterworth. Land Mobile Satellite Channel Measurements and Modeling [J]. Proceedings of IEEE, 1998, 86(7): 1442-1463.
 [6] 杨明川,姜义成,郭庆,等.低仰角动态环境下高空平台站通信信道的衰落特性[J].华南理工大学学报:自然科学版,2009,31(1):27-32.
 YANG Mingchuan, JIANG Yicheng, GUO Qing, et al. Fading Characteristics of HAPS Communication Channel in Dynamic Environment with Low Elevation Angle[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 31(1): 27-32. (in Chinese)
 [7] M Pätzold, U Killat, F Laue. An Extended Suzuki Model for Land Mobile Satellite Channel and Its Statistical Properties [J]. IEEE Trans Veh Technol, 1998, 47(2): 617-630.
 [8] P Sadeghi, R A Kennedy, P B Rapajic, et al. Finite-State Markov Modeling of Fading Channels—a survey of Principles and Applications [J]. IEEE Signal Processing, 2008, 25(5): 57-80.
 [9] Erik Haas. Aeronautical Channel Modeling [J]. IEEE Trans Veh Technol, 2002, 51(2): 254-264.
 [10] M Pätzold, U Killat, Y Li, et al. Laue. Modeling, Analysis, and Simulation of Non-frequency-selective Mobile Radio Channels with Asymmetrical Doppler Power Spectral Density Shapes [J]. IEEE Trans Veh Technol, 1997, 46(2): 494-507.
 [11] 李迎春.移动衰落信道的模型与模拟[D].上海:上海大学,2008:26-48.
 LI Yingchun. Modeling and Simulation of Mobile Fading Channels [D]. Shanghai: Shanghai University, 2008:26-48. (in Chinese)
 [12] M Pätzold, U Killat, F Laue, et al. A New and Optimal Method for the Derivation of Deterministic Simulation Models for Mobile Radio Channel [C] // Proc of IEEE 46th Veh Technol Conf, 1996: 1423-1427.

(编辑:姚树峰)