

基于马尔科夫链的两状态卫星移动信道模型^①

杨明川^{②*} 张嘉铭* 王振永* 郭庆* 唐文彦^{**}

(* 哈尔滨工业大学通信技术研究所 哈尔滨 150001)

(** 哈尔滨工业大学精密仪器研究所 哈尔滨 150001)

摘要 针对卫星移动信道概率统计的单状态模型只能描述单一信道环境,而多状态模型随着状态数目的增多参数也越多、仿真也越复杂的问题,本着模型既要准确反映实际信道传播特性,同时又要相对简单、容易实现的原则,采用滤波器法和马尔科夫链实现了一个包含“理想状态”和“非理想状态”的广域环境两状态信道模型的动态仿真。通过在我国本土环境下得到的铱星系统信道特性实测数据,利用最小均方误差准则和线性最小二乘法拟合出了该模型在我国三种典型真实信道环境(开阔地轻阴影遮蔽环境、乡村中等阴影遮蔽环境以及城区重阴影遮蔽环境)下的参数,该模型的有效性得到了验证。

关键词 卫星移动信道,衰落特性,概率统计模型,多状态

0 引言

在卫星移动通信系统的研究过程中,一个首要的工作是关于信道特性的研究^[1,2]。因为要实现信息的可靠传输,在系统规划设计阶段必须针对信道特性选择各种通信技术,如调制方式、多址方式、信道/信元编码方式以及功率控制技术等,同时须通过信道模型方便地仿真、验证相应技术的实用性和有效性。卫星移动信道概率统计模型分为单状态模型与多状态模型两大类^[3]。单状态模型假定接收信号的包络或功率服从唯一确定的概率分布,适用于描述平稳信道^[4,5]。多状态模型具有多个状态,适用于描述非平稳信道,不同状态对应不同类型的概率密度分布或参数不同的同类型概率分布^[6-8]。

验证信道模型准确性的最有效的方法是将模型的统计特性与真实环境中的测试数据统计特性进行对比,在保证模型准确性的前提下同时还要考虑其实现复杂度^[9]。目前,国内关于卫星移动信道模型的研究主要是分析、消化、改进国外测试数据和信道模型。在这方面主要的技术差距在于实测数据上的分析、建模工作开展不足,未能提出一套针对我国真实信道环境的模型及参数^[10,11]。本文通过在我国本土环境下得到的铱星系统实测数据,同时兼顾单

状态模型只能描述单一信道环境,而多状态模型随着状态数目的增多参数也越多、仿真也越复杂的实际情况,采用滤波器法和马尔科夫链动态实现了一个广域环境下两状态信道模型的动态仿真,并根据实测数据拟合出了符合我国真实信道环境的该模型参数。

1 基于马尔科夫链的两状态卫星移动信道模型

通过分析哈尔滨工业大学通信技术研究所在我国本土环境下对铱星系统信道特性的测试数据^[12]得出:对卫星移动信道而言,地面的阴影遮蔽是其主要衰落机制。在轻微遮蔽环境,如路旁只有电线杆及偶见的树或不密的小树林地区,衰落大致与莱斯因子为 8dB 的 Rician 分布接近。而当移动终端行驶在树林较密的地区或小村庄、窄街道时,信号电平大大跌落,甚至衰落可达 20 ~ 40dB。通常情况下,移动终端不可避免地要经过城市、乡村和开阔地等地形地物各不相同的物理环境。因而,在传播路径上既有阴影遮蔽的情况,也有无阴影遮蔽的情况,只不过是各自所占比重不同而已。

由于单状态模型只能描述单一信道环境,多状态模型随着状态数目的增多参数也越多,且仿真也

① 国家自然科学基金(60532030,61101126)和中国博士后科学基金(2011M500664)资助项目。

② 男,1977 年生,博士;研究方向:卫星移动通信系统,高空平台通信系统;联系人,E-mail: meiyang@hit.edu.cn
(收稿日期:2010-05-11)

越复杂,因而本文认为,本着模型既要能够准确反映我国实际信道传播特性同时又要相对简单、容易实现这一原则,一个包含“理想状态”和“非理想状态”的广域环境两状态信道模型则是一个较好的折中。“理想状态”表示移动终端和卫星之间的通信链路没有阴影遮蔽或受到轻阴影遮蔽,此时通信不会中断的信道状态;“非理想状态”表示通信链路受到重阴影遮蔽,通信时会出现中断的信道状态。总的接收信号幅度的概率密度函数 $f(r)$ 可表示为

$$f(r) = p_g f_g(r) + p_b f_b(r) \quad (1)$$

式中, p_g 为信道处于“理想状态”的概率; p_b 为信道处于“非理想状态”的概率; $f_g(r)$ 为“理想状态”下信号幅度的概率密度函数; $f_b(r)$ 为“非理想状态”下信号幅度的概率密度函数。

1.1 “理想状态”时的信道统计特性

当信道处于“理想状态”时,接收信号没有受到阴影遮蔽或者只有直射分量受到轻阴影遮蔽,不会出现通信中断。此时的信道特性可用 Loo 模型^[4]来描述,其接收信号幅度 r 的概率密度函数为

$$f_g(r) = \frac{r}{b_0 \sqrt{2\pi d_0}} \int_0^\infty \frac{1}{z} \exp\left[-\frac{(\ln z - \mu)^2}{2d_0} - \frac{(r^2 + z^2)}{2b_0}\right] \cdot I_0\left(\frac{rz}{b_0}\right) dz \quad (2)$$

式中, b_0 为平均多径散射功率; μ 为直射分量 $\ln z$ 的均值; d_0 为直射分量 $\ln z$ 的方差。

“理想状态”时接收信号包络 r 的累积分布函数为

$$\begin{aligned} F_g(R) &= \Pr(r < R) = \int_0^R f(r) dr \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi d_0} b_0} \cdot \int_0^R \int_0^\infty \frac{r}{y} \\ &\quad \cdot \exp\left(-\frac{r^2 + y^2}{2b_0} - \frac{(\ln y - \mu)^2}{2d_0}\right) \cdot I_0\left(\frac{ry}{b_0}\right) dy dr \\ &= 1 - \int_0^\infty Q_1\left(\frac{y}{\sqrt{b_0}}, \frac{R}{\sqrt{b_0}}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi d_0} y} \\ &\quad \cdot \exp\left(-\frac{(\ln y - \mu)^2}{2d_0}\right) dy \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $Q_1(a, b) = \int_b^\infty z \cdot \exp\left(-\frac{z^2 + a^2}{2}\right) \cdot I_0(az) dz$ 表示一阶 Marquon 函数。

1.2 “非理想状态”时的信道统计特性

当信道处于“非理想状态”时表示通信链路受到重阴影遮蔽(或全阴影遮蔽)衰落,通信时会出现中断的信道状态。此时的信道特性可以用 Corazza 模型来描述^[5]。Corazza 模型认为接收信号的多径分量和直射分量同时受到阴影遮蔽,接收信号幅度

r 的概率密度函数为

$$\begin{aligned} f_b(r) &= \frac{r}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2\sigma_3}} \cdot \int_0^\infty \frac{1}{y^3} \\ &\quad \cdot \exp\left(-\frac{(r/y)^2 + \rho^2}{2\sigma_0^2} - \frac{(\ln y - m_3)^2}{2\sigma_3^2}\right) \\ &\quad \cdot I_0\left(\frac{\rho r}{y\sigma_0^2}\right) dy \end{aligned} \quad (4)$$

式中, σ_0^2 为平均散射多径功率; ρ 为直射分量的幅度; m_3 为直射分量的均值; σ_3 为直射分量的标准偏差。

“非理想状态”时接收信号包络 r 的累积分布函数为

$$\begin{aligned} F_b(R) &= \int_0^R f_b(r) dr = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2\sigma_3}} \cdot \int_0^R \frac{r}{y^3} \\ &\quad \cdot \int_0^\infty \exp\left(-\frac{(r/y)^2 + \rho^2}{2\sigma_0^2} - \frac{(\ln y - m_3)^2}{2\sigma_3^2}\right) \\ &\quad \cdot I_0\left(\frac{\rho r}{y\sigma_0^2}\right) dy dr \end{aligned} \quad (5)$$

当采用 Rician 因子 $K = \rho^2/(2\sigma_0^2)$, 并对接收信号功率进行归一化处理,即令 $\rho^2 + 2\sigma_0^2 = 1$ 时,“非理想状态”时模型的累积分布函数为

$$\begin{aligned} F_b(r) &= \frac{2(K+1)}{\sigma_3 \sqrt{2\pi}} \cdot \exp(-K) \cdot \int_0^R \int_0^\infty \frac{1}{y^3} \\ &\quad \cdot \exp\left(-\frac{(K+1)r^2}{y^2} - \frac{(\ln y - m_3)^2}{2\sigma_3^2}\right) \\ &\quad \cdot I_0\left(\frac{2r \sqrt{K(K+1)}}{y}\right) dy dr \end{aligned} \quad (6)$$

通过前面的分析可见,该两状态信道模型的概率密度函数、累积分布函数都是 $b_0, \mu, d_0, K, m_3, \sigma_3$ 的函数。因此,通过调整上述参数的值可以使该模型用于表征不同信道环境下的卫星移动信道的衰落特性。

1.3 两状态之间的转换

由于上述广域环境两状态信道模型需要动态地在“理想状态”和“非理想状态”之间来回随机地切换,这就需要一种能够较好地模拟实际情况的切换方法。这里采用数学上经过抽象形成的马尔科夫链模型来实现这一随机切换过程。

马尔科夫链有两个重要的矩阵,一个是状态概率矩阵 W ,表示在一定环境下,每种状态可能发生的概率的集合。另一个是状态转移矩阵 P ,由状态转移概率组成。条件概率 $p\{X_{n+1} = j | X_n = i\}$ 的直观含义为系统在时刻 n 处于状态 i 的条件下,在时刻 $n+1$ 系统处于状态 j 的概率,记为 $p_{ij}(n)$ 。此条件

概率为马尔科夫链 $\{X_n, n \in T\}$ 在时刻 n 的一步转移概率,简称为转移概率。这样,卫星移动信道的两状态马尔科夫模型只要确定了马尔科夫链的状态概率矩阵 W 与一步转移概率矩阵 P 便可描述信道状态的变化。

图1为“理想状态”和“非理想状态”之间的状态转换图。如果当前处在某种状态,那么信道的下一个状态要么保持原状态不变,要么切换到另一个状态。图中的 p_{gg} 和 p_{bb} 分别为信道维持“理想状态”和“非理想状态”的概率,而 p_{gb} 和 p_{bg} 分别为信道由“理想状态”切换到“非理想状态”和“非理想状态”切换到“理想状态”的概率,由式

$$p_{gb} = 1 - p_{gg} \quad p_{bg} = 1 - p_{bb} \quad (7)$$

表示。

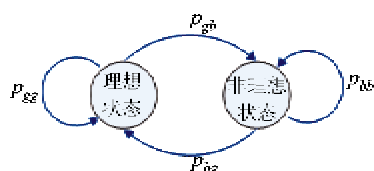


图1 两状态之间的马尔科夫转换

2 信道模型的仿真实现

卫星移动信道特性研究的另一个重要方面是信道仿真,研究信道的仿真实现模型与理论模型的差异。仿真模型将理论模型采用软件仿真或者硬件实现的方法转化为计算机能够模拟实现的模型,用于系统性能的分析、优化与评估测试。在基于马尔科夫链的两状态信道模型中,“理想状态”的信道特性可以由一个 Rayleigh 随机过程和一个 Lognormal 随机过程相叠加而成。“非理想状态”时的信道特性可由一个 Rician 随机过程和一个 Lognormal 随机过程相乘而成。因此,要仿真该两状态信道模型首先就得仿真实现 Rayleigh、Rician、以及 Lognormal 三个随机过程。在无线衰落信道特性的研究中,这三个随机过程可由色高斯过程来实现。这里采用滤波器法来实现色高斯随机过程。

滤波器法如图2所示,两个相互独立的低通高斯白噪声源产生同相和正交分量后先在频域进行整

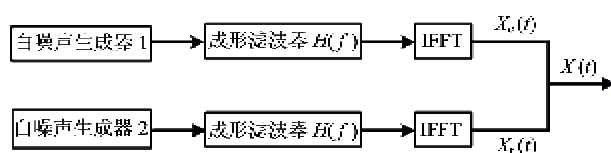


图2 低通滤波器信道仿真器

形滤波,整形滤波器的传递函数等于衰落过程的多普勒功率谱密度的平方根。接着通过快速傅里叶反变换(IFFT)将生成的色高斯随机过程变换到时域上,生成符合特定多普勒衰落的准确的时域波形。

图3是基于马尔科夫链的两状态卫星移动信道概率统计模型的动态仿真实现框图。图中上面部分是采用滤波器法产生的与实际信道特性相符的包含“理想状态”的 Loo 随机过程和“非理想状态”的 Corazza 随机过程。左下部分是马尔科夫链仿真实现模块。2个均匀分布的随机数产生器产生0~1之间的小数,Switch1为“理想状态”的保持与转换开关,其门限为 p_{gb} , Switch2为“非理想状态”的保持与转换开关,其门限为 p_{bg} 。两个开关独立地不停切换,但真正实现马尔科夫转换的是由 Switch 开关来完成的,它根据前一状态来选择上面的开关输出信号或下面的开关输出信号。最后的输出就是用来控制“理想状态信道”和“非理想状态信道”之间的切换。如果输出为“1”,就选择“理想状态信道”,否则如果为“0”就选择“非理想状态信道”。通过马尔科夫链的控制,信道特性动态在“理想状态”和“非理想状态”之间不停跳变,从而实现对信道衰落特性的动态模拟。通过对接收信号的统计特性进行分析,提取出幅度包络,以及概率密度函数、累积分布函数等,分别与开阔地、郊区和城区三种典型信道环境下的铱星系统实测数据的统计特性进行比较,用于验证模型的准确性。

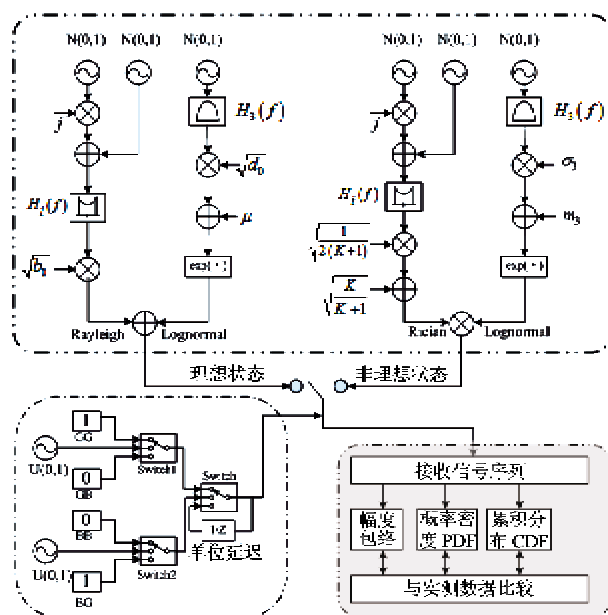


图3 两状态马尔科夫信道模型的仿真实现框图

3 信道模型的参数拟合

信道模型准确性的最有效的验证方法就是将模型的统计特性与真实信道环境实测数据的统计特性进行对比。目前,国内已有的信道模型都是利用国外的测试数据来验证模型的统计特性。这些数据都是在外国环境中获得的,因此用于我国的卫星移动通信特性模拟时具有一定的局限性。本文利用哈尔滨工业大学通信技术研究所 1999 年 4 月至 2000 年 1 月在哈尔滨到牡丹江的一段高等级公路(时速 100km/h)开阔地环境(图 4)、牡丹江乡村公路(时速 60km/h)两旁有稀疏树木,树高约 3~4m 环境(图 5)以及哈尔滨工业大学校园(时速 20km/h)环境(图 6)下对铱星系统信道特性的实测数据来提取出我国上述三种典型真实信道环境下的信道参数。



图 4 开阔地



图 5 郊区环境



图 6 城市环境

图 7 是哈尔滨工业大学通信技术研究所建立的铱星系统信道特性测试系统,包括接收天线、高增益低噪声放大器、频谱分析仪、高速 GPIB 接口卡、采集控制计算机、手持式 GPS 接收仪和场景及其它辅助参数记录模块等。GPS 接收仪用来确定测试点的具体位置,使得记录的测试数据和位置信息一一对应。

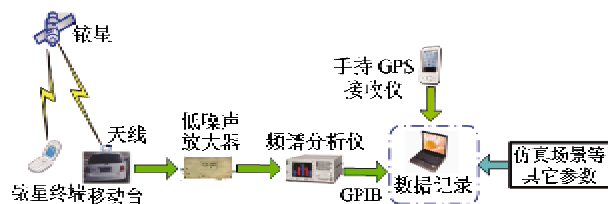


图 7 铱星系统信道特性测试系统组成

两状态信道模型除了马尔科夫链的状态概率矩阵 W 与状态转移概率矩阵 P 外,还有 6 个参数需要确定,就是“理想状态”的 b_0, μ, d_0 和“非理想状态”的 K, m_3, σ_3 。这 6 个参数在不同的物理环境中是不一样的,但无论在何种地理环境中,它们总是和卫星仰角有关。因此,参数拟合时,首先采用数值积分法提取出实测数据的一阶、二阶原点矩,然后利用最小均方误差准则和最小二乘拟合法给出不同环境不同仰角下的信道模型拟合参数值。表 1 和表 2 是拟合得出的三种典型环境下不同仰角的模型参数。表 3 是三种环境下的信道状态概率矩阵 W 和状态转移概率矩阵 P 。

表 1 理想状态信道模型拟合参数

环境	仰角 (°)	理想状态信道模型参数		
		b_0	μ	d_0
开阔地	20	0.0050	0.0115	0.0016
	40	0.0020	0.0102	0.0002
	60	0.0035	-0.0115	0.0010
	80	0.0026	0.0121	0.0008
乡村	20	0.0190	-0.0456	0.0061
	40	0.0151	-0.0312	0.0075
	60	0.0090	-0.0839	0.0083
	80	0.0067	-0.0576	0.0415
城区	20	0.0079	-0.0432	0.0105
	40	0.0056	-0.0403	0.0058
	60	0.0039	-0.0525	0.0194
	80	0.0038	-0.0258	0.0112

表 2 非理想状态信道模型拟合参数

环境	仰角 (°)	非理想状态信道模型参数		
		K	m_3	σ_3
开阔地	20	0.6495	-0.3011	0.0173
	40	1.3089	-0.1532	0.0368
	60	3.1623	-0.0652	0.0518
	80	7.9433	-0.0827	0.0656
乡村	20	0.4995	-0.3572	0.2590
	40	0.8943	-0.4326	0.2072
	60	2.8733	-0.8456	0.2878
	80	6.9051	-0.6396	0.2303
城区	20	0.3451	-1.8962	0.4260
	40	0.8638	-1.7960	0.4835
	60	2.1276	-1.3585	0.5411
	80	4.8794	-1.1743	0.9026

表 3 状态概率矩阵 W 和状态转移概率矩阵 P

环境	状态概率矩阵		状态转移概率矩阵	
	p_e	p_b	P_{ee}	P_{eb}
			P_{bb}	P_{be}
开阔地	0.892	0.108	0.956	0.044
			0.109	0.891
乡村	0.624	0.376	0.832	0.168
			0.253	0.747
城区	0.297	0.703	0.382	0.618
			0.821	0.179

4 信道模型的仿真验证

图 8 - 图 13 所示为不同的信号幅度。图 8、图 10、图 12 分别为轻阴影遮蔽、中等阴影遮蔽和重阴影遮蔽三种环境下的一段实测信号幅度。通过对比可以看出,信号的包络随着阴影程度的变化而变化,衰落深度随着阴影程度的增加而增大。接收信

号包络的均值随着阴影程度的增加而减小。开阔地环境的接收信号基本都是直射分量,偶尔几次深衰落主要由道路两边的电线杆遮挡引起。图 9、图 11、图 13 分别为对应三种环境下通过仿真模型得到的接收信号幅度。通过比较可以看出仿真模型得出的信号幅度和测试数据幅度基本吻合。

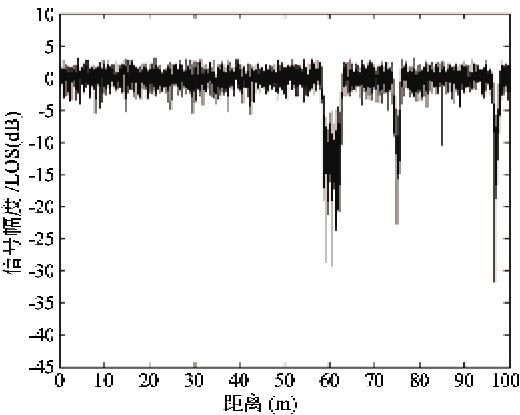


图 9 模型仿真的开阔地信号幅度

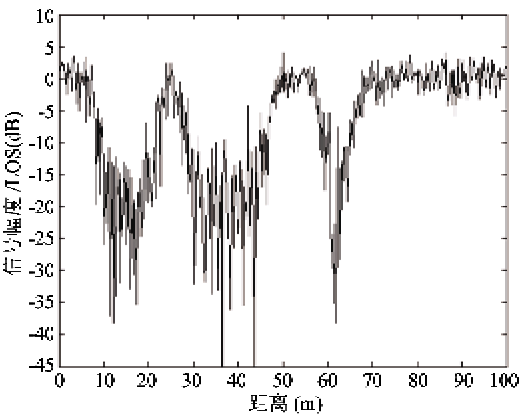


图 10 乡村环境实测信号幅度

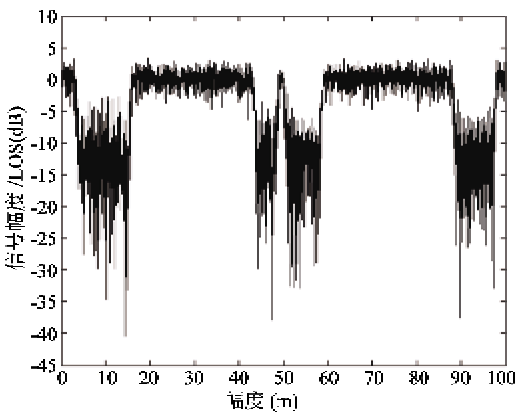


图 11 模型仿真的郊区信号幅度

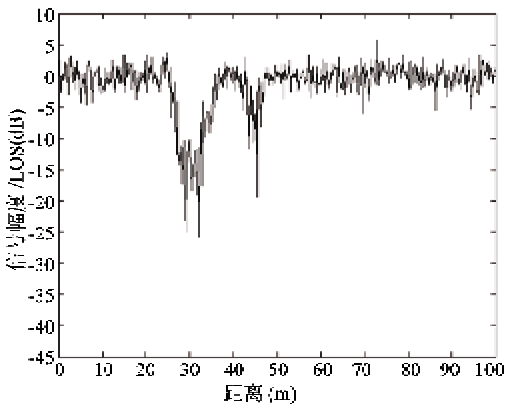


图 8 开阔地实测信号幅度

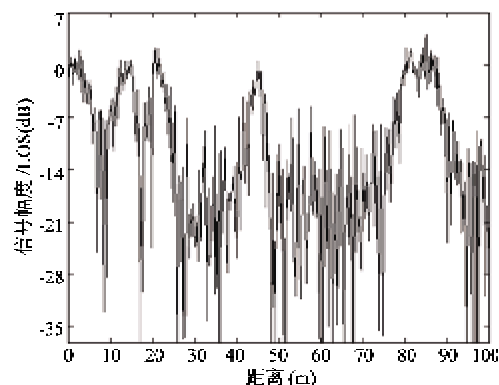


图 12 城区环境实测信号幅度

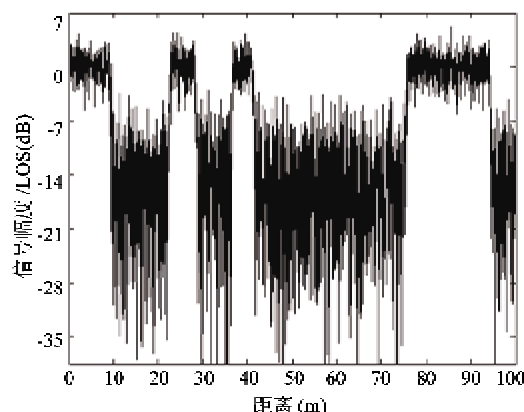


图 13 模型仿真的城区信号幅度

图 14 和图 15 分别为三种典型环境下通过仿真模型得到的接收信号包络的概率密度函数、概率分布函数与实测数据统计得到的相应统计特性的比较。从图可以看出仿真模型得出的信道统计特性与实际测试数据基本吻合。这证明所仿真的信道模型及其拟合参数可以描述我国典型环境下的卫星移动通信特性,可用于我国卫星移动通信系统及其地面仿真验证系统的研究。

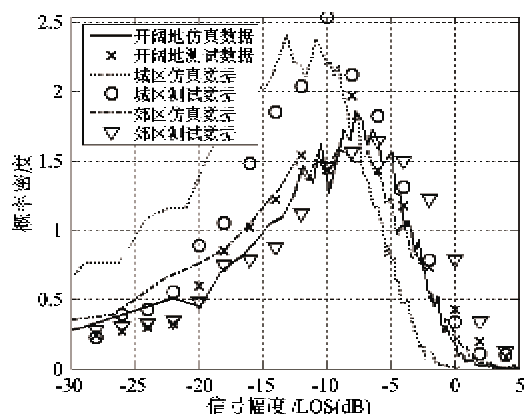


图 14 仿真的概率密度与实测数据比较

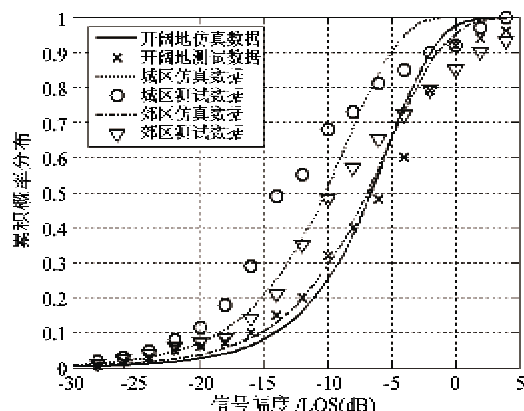


图 15 仿真的累积分布与实测数据比较

5 结论

信道模型准确性的最有效的验证方法就是将模型的统计特性与真实环境中的测试数据统计特性进行对比,在保证模型准确性的前提下同时还要考虑其实现复杂度。国内关于卫星移动通信模型的研究主要是分析、消化、改进国外测试数据和信道模型,未能提出一套适合我国真实信道环境的模型及参数。针对窄带概率统计模型中单状态模型只能描述单一信道环境,而多状态模型随着状态数目的增多参数也越多,致使仿真也越复杂的问题,本着模型既要准确反映真实信道传播特性,同时又要相对简单、容易实现这一原则,采用滤波器法和马尔科夫链实现了一个包含“理想状态”和“非理想状态”的广域环境两状态窄带卫星移动通信概率统计模型的动态仿真。通过在我国本土环境下得到的铱星系统信道特性实测数据,利用最小均方误差准则和线性最小二乘法拟合出了该模型在我国三种典型真实信道环境下的参数。

参考文献

- [1] Ippolito L J. Satellite Communications Systems Engineering, Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance. Singapore: A John Wiley and Sons, Ltd, Publication, 2008. 332-334
- [2] Erik X, Jong J H, Ravishanker C. Channel modeling for a land mobile satellite system. In: Global Telecommunications Conference, Washington, D. C., USA, 2007. 4596-4600
- [3] Farhan F P, Mayo A, Marote D, et al. Review of generative models for the narrowband land mobile satellite propagation channel. *International Journal of Satellite Communications*, 2008, 26: 291-316

- [4] Loo C, Butterworth J S. Land mobile satellite channel measurements and modeling. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86(7): 1442-1463
- [5] Corazza G E, Vatalaro F. A statistical model for land mobile satellite channels and its application to nongeostationary orbit systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1994, 43(3): 738-742
- [6] Lutz E, Cygan D, Dippold M, et al. The land mobile satellite communications channel recording, statistics, and channel model. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1991, 40(2): 375-386
- [7] Fontan F P, Castro M V, Cabado C E, et al. Statistical modeling of the LMS channel. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2001, 50(6): 1549-1567
- [8] Vucetic B, Jun Du. Channel modeling and simulation in satellite mobile communication systems. *IEEE Journal on Selected Area in Communications*, 1992, 10(8): 1209-1218
- [9] Milojevic M, Haardt M, Heuberger A. Measurement Based Satellite to Outdoor Channel Modeling for Multiple Satellite Systems. In: *Proceedings of the 14th European Wireless Conference, Prague, Czech*, 2008. 1-7
- [10] 李兴, 吴诗其. 卫星移动信道 LR^2 模型及其系统性能分析. *电波科学学报*, 2003, 18(3): 305-310
- [11] 郭道省, 甘仲民, 张邦宁等. 卫星移动通信的信道特点及仿真模型. *系统仿真学报*, 2001, 13(4): 505-507
- [12] 谭晖, 张乃通, 张中兆. 低轨道卫星移动通信系统传播特性的测试与分析. *通信学报*, 2003, 24(7): 86-92

Markov chain based two-state satellite mobile channel model

Yang Mingchuan*, Zhang Jiaming*, Wang Zhenyong*, Guo Qing*, Tang Wenyan**

(* Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(** Institute of Precision Instrument, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract

Considering that a single-state probability statistical model for satellite mobile channels can only describe a single channel environment, while a multiple-state model brings more parameters and more complicated simulation work, the dynamic simulation of a two-state (both the “ideal state” and the “non-ideal state”) channel model under a wide-area environment was implemented with the filter method and the Markov chain method, according to the principle that the model should accurately depict the real transmission characteristics of the channel with the relative simplicity and feasibility. Based on the experimental data of the iridium system measured by the Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, the modeling parameters under three kinds of typical channel environments were fitted by using the least squares error criterion and the method of linear least squares, and the effectiveness of the model was verified.

Key words: satellite mobile channel, fading characteristic, probability statistical model, multiple states