

卫星信道基带残留误码分布特性拟合与模拟

凌翔, 卓永宁, 胡剑浩

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

【摘要】 卫星通信信道的基带残留误码特性直接影响上层通信协议的性能。通过对卫星通信系统仿真, 提取基带误码图案, 将基带误码分布图案通过误码持续期发生概率密度分布、误码持续期长度概率密度分布来表征。在典型的卫星通信系统参数条件下, 拟合表明经过有噪莱斯衰落信道的误码持续期发生概率接近广义极值分布; 经过高斯噪声信道的误码持续期发生概率密度、误码持续期长度概率密度接近负二项式分布。在此基础上完成的卫星基带信道硬件模拟器能够为通信协议的测试提供方便、可信的信道基带特性模拟。

关键词 基带残留误码; 信道模拟器; 信道模型; 误码图案; 卫星通信

中图分类号 TN927.2

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.02.008

Fitting Distribution and Emulation of Residuary Bit Errors in Satellite Baseband Channels

LING Xiang, ZHUO Yong-ning, and HU Jian-hao

(National Key Laboratory of Science and Technology on Communication, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract The characteristic of residuary bit errors in satellite baseband channel affects the performance of communication protocol in upper layers significantly. By system simulation and analyzing the bit error patterns, the probability distribution function (PDF) of bit errors occurrence and PDF of bit errors length are obtained. In typical satellite communication systems against the Rician fading channel, the PDF of bit errors occurrence approximates generalized extreme value distribution. But in Gaussian noise channel, the PDFs of bit errors occurrence and bit errors length approximate negative binomial distributions. Base on these fitting distributions, the baseband channel emulator provides a convenient method for system testing, which imposes residuary bit errors pattern on data stream reasonably.

Key words baseband residuary bit error; channel emulator; channel model; error pattern; satellite communication

卫星通信系统近年来得到了稳步地发展。由于卫星通信信道恶劣的信号衰落, 通信存在严重的误码情况, 并直接影响上层通信协议的效率。在进行系统数字基带性能分析、通信协议性能分析时, 适合的卫星信道误码模型能有效地支持系统性能的仿真和研究^[1]。

卫星通信信道作为一种特殊的无线信道, 其衰落特性、误码特性与地面无线信道相比, 具有一些独特的性质^[2-3], 卫星通信信道模型可以从模拟信号特性和数字基带信号特性两个角度来考察。模拟信道模型着重描述接收到的模拟信号的幅度、相位、功率等分布特性, 常见的卫星信道射频、中频模拟信号模型有Lutz模型^[4]、Corraza模型^[5]、C.Loo模型^[6]、LMS模型^[7-9]。模拟信号在解调、解交织、信道解码后成为数字基带信号, 此时仍然存在不能纠正的基

带误码。数字基带信道模型则考察接收信号的残留误码分布特性, 地面无线信道的数字基带模型有Gilbert-Elliot模型^[10-11]、混沌映射模型^[12], 目前尚无针对卫星信道的数字基带信道模型。卫星通信链路根据收发双端所处空间位置关系的不同, 分为星地链路和星际链路。星际链路主要以自由空间传播损耗为主, 误码服从高斯分布; 星地链路的衰落环境较复杂, 尤其下行信道通常是系统的瓶颈。

本文将重点研究星地下行链路的基带信道残留误码模型。在仿真的基础上, 提取数字基带误码序列, 并拟合其概率分布函数, 然后在卫星信道模拟器中实现数字基带残留误码的模拟。

1 信道仿真与数据采集

无线信道数字基带特性的研究, 必须通过分析

收稿日期: 2008-06-24; 修回日期: 2010-01-18

基金项目: 部级预研项目

作者简介: 凌翔(1972-), 男, 博士, 副教授, 主要从事无线通信、通信集成电路方面的研究。

接收机解码后的基带数据，基带数据的采集一般通过实际系统测量或系统仿真获得。由于系统实测难

度很大，本文利用Simulink仿真工具搭建卫星通信链路，采集数字基带信号。卫星通信仿真环境如图1所示。

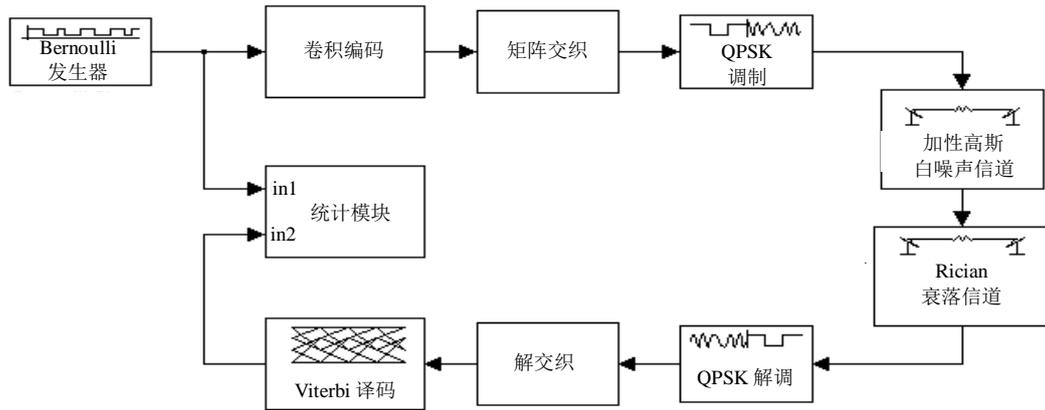


图1 卫星信道传输特性仿真结构图

仿真中假定信源为贝努利分布的二进制数据流，信号经过信道编码及交织处理以后，送到调制模块。调制信号在空间经历信道衰落和噪声干扰。对星地链路，传输信号除受到自由空间传播损耗、噪声等影响以外，还受到较强衰落的影响。衰落主要由多径衰落引起。本文采用有噪莱斯信道模型，接收信号经过解调、解交织、维特比译码后，与发送信号进行对比，从而获得残留误码图案。

仿真时，发送端连续发送数据。当接收序列第*i*个接收比特与发送比特相同时，无残留误码，误码图案中该位置标示为“0”；否则在误码图案的第*i*个位置记录发生一次误码，标示为“1”。误码图案序列包括误码持续期和误码间隔期，误码持续期是指连续为“1”的序列片段，误码间隔期则是连续为“0”的序列片段。图2中，误码持续期的长度分别为2、1、3；误码间隔期的长度分别为2、4。

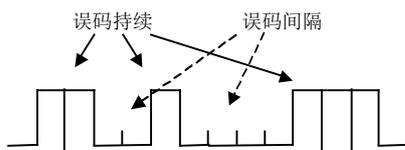


图2 残留误码图案序列构成示意图

如果在单位时间内考察误码持续期的发生概率，则对于不同的数据传输速率差异太大。因此本文在固定长度的统计窗口中考察误码持续期的发生概率分布，本文取统计窗口长度 $L=2\ 000$ ^[12]。如图3所示有重度误码、轻度误码、无误码3个统计窗口。数字基带信道误码模型可以通过误码持续期的长度、发生概率的统计特性来描述。本文没有对误码间隔期长度的分布进行统计，是由于误码间隔期长度在 $[1, L]$ 上每一点都有足够多的采样样本时才能得到可信的拟合结果，但这将导致仿真时间漫长而不能承受。

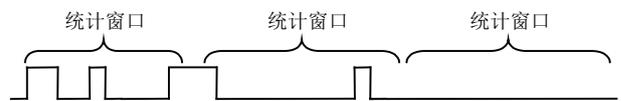


图3 残留误码图案统计窗口示意图

2 基带残留误码统计特性

用前面介绍的方法获得的大量误码图案序列的误码持续期发生次数的概率密度 p_{eo} 和误码持续期长度的概率密度 p_{el} 为：

$$p_{eo}(i) = \frac{\text{发生}i\text{次误码持续期的统计窗口数量}}{\text{统计窗口总数}} \quad (1)$$

$$p_{el}(j) = \frac{\text{误码持续期长度}=\textit{j}\text{的数量}}{\text{误码持续期的总数}} \quad (2)$$

在卫星通信系统中，信道编码方式、交织方式、调制方式都会对误码图案序列产生影响。如信道编码在其编码空间内存在码元距离，当信道误码大于码元距离时，信道编码不能纠错，产生残留误码。本文选取典型的卫星通信系统参数作为仿真环境参数，如表1所示。

表1 仿真选取的典型卫星通信系统参数

信道编码方式	交织方式	调制方式
卷积, $k=7, r=1/2$	矩阵交织, 深度=40	QPSK

下面主要讨论莱斯信道中的莱斯因子*K*、信噪比SNR的变化对信道基带误码特性的影响，仿真中莱斯因子、信噪比变化范围如表2所示。

表2 仿真选取的信道参数

信道参数	取值范围
莱斯因子 <i>K</i>	10, 14, 16, 20
信噪比SNR/ dB	10, 12, 15

对各信道参数条件下的误码图案序列使用Matlab提供的dfitool工具进行统计拟合。通过统计拟合，发现虽然不同信道参数组合下对应的误码率

P_e 变化幅度很大(如 $K=10$ 、 $SNR=10$ dB时, $P_e = 8.9 \times 10^{-3}$; $K=20$ 、 $SNR=15$ dB时, $P_e = 1.1 \times 10^{-6}$), 但各种情况下误码持续期发生次数的概率密度 p_{eo} 、误码持续期长度的概率密度 p_{el} 的分布特性比较一致。

2.1 误码发生次数的概率密度分布

以 $K=16$ 、 $SNR=12$ dB为例, $P_e = 1.689 \times 10^{-4}$, 在统计窗口集里, 94%的统计窗口内不发生误码; 而有误码的统计窗口内, 误码持续期发生次数的概率密度接近逆高斯分布, 如图4a所示。逆高斯分布的概率密度函数为:

$$p(i) = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi i^2}} \exp\left(-\frac{\lambda(i-\mu)^2}{2\mu^2 i}\right) \quad (3)$$

图4a拟合得 $\mu=3.55$, $\lambda=12.8$ 。

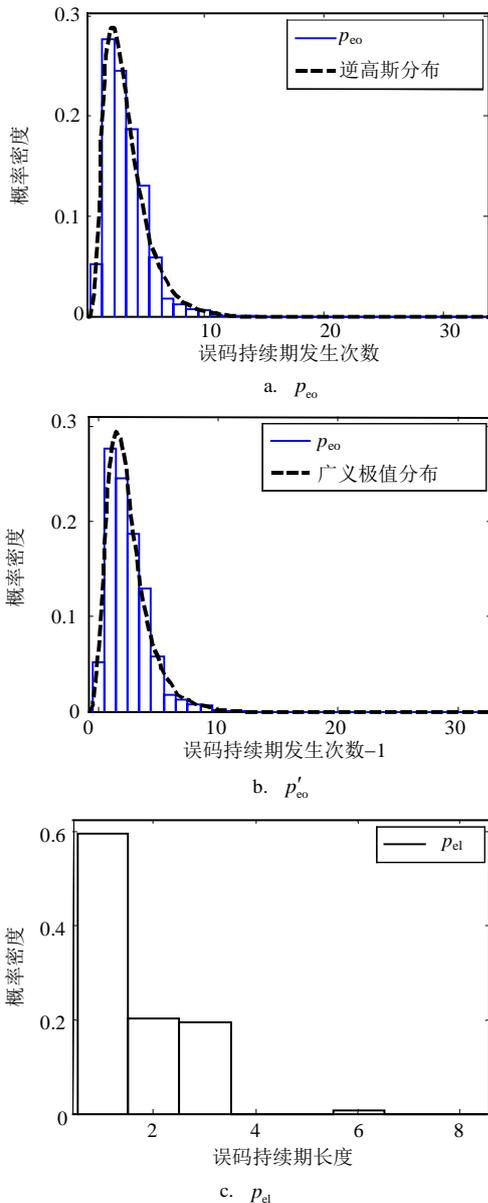


图4 $K=16$ 、 $SNR=12$ dB的莱斯信道条件下的误码持续期特性分布

在有噪莱斯信道中, 多数残留误码的发生概率密度满足逆高斯分布。在表2包含的12组信道参数组合条件下的仿真中, 有9组满足逆高斯分布。但并非所有仿真结果都一致, 如在 $K=10$ 、 $SNR=15$ dB的情况下, 仿真统计结果与逆高斯分布有一些差异。

2.2 误码持续期发生次数-1的概率密度分布

前面误码发生次数的取值范围是 $[1, \infty]$, 而许多概率密度分布函数需要取值范围为 $[0, \infty]$, 因此可以将误码持续期发生次数-1后再进行拟合。结果发现误码持续期发生次数-1的概率密度分布 p'_{eo} 与广义极值分布的一致性在各种有噪莱斯信道条件下满足得更好。在表2包含的12组信道参数组合条件下的仿真中, 有11组满足广义极值分布。广义极值分布的概率密度函数为:

$$p(j) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\left(1+k\frac{j-\mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}\right) \left(1+k\frac{j-\mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}-1} \quad (4)$$

$j=i-1$

图4b给出了 $K=16$ 、 $SNR=12$ dB情况下的拟合逼近, 此时, $k=0.0975$, $\sigma=1.25$, $\mu=1.69$ 。

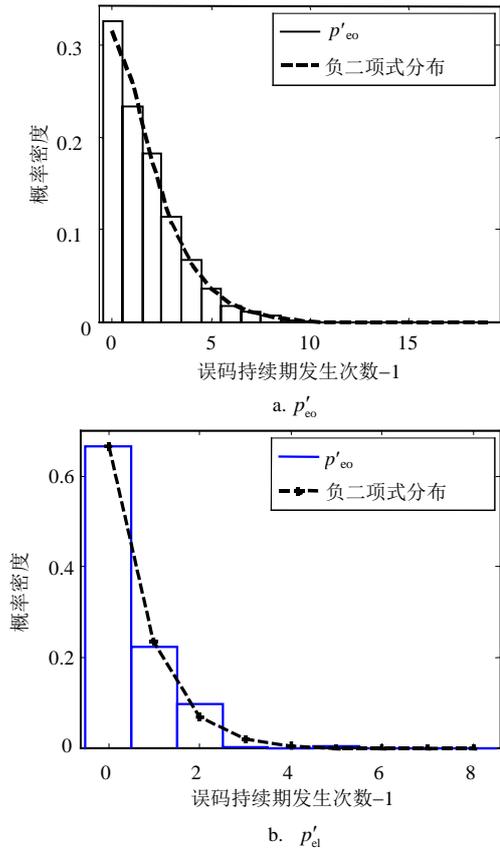


图5 $SNR=7$ dB的AWGN信道条件下的误码持续期特性分布

2.3 误码持续期长度的概率密度分布

在 $K=16$ 、 $SNR=12$ dB情况下, 误码持续期长度

在99%的情况下小于或等于3，且不同误码长度的概率密度分布规律不明显，如图4c所示。此外，由于误码持续期长度集中在{1,2,3}这3个样点上，样点太少，也不适合曲线拟合。对于表2包含的其他信道参数组合，也有相似分布现象。

2.4 其他信道类型的影响

为了与有噪莱斯信道作比较，在通信系统参数同表1的条件下，本文统计分析了加性高斯白噪声(AWGN)信道的残留误码特性。误码发生次数的概率密度在多数时候接近逆高斯分布。如果考察误码发生次数-1的概率密度分布，则几乎都满足负二项式分布。误码长度-1的概率密度也几乎都满足负二项式分布。图5给出了SNR=7dB的AWGN信道条件下，负二项式分布对 p'_{e0} 、 p'_{e1} 的拟合。在图5a中，负二项式分布参数 $r=1.61$ ， $p=0.49$ ；图5b中， $r=1.475$ ， $p=0.76$ 。

3 基带残留误码的半物理仿真

目前卫星信道模拟器都在中频实现^[13-14]，而在卫星通信系统上层通信协议设计过程中，底层的误码特性对于通信协议的效率、可靠性都会产生直接的影响。此外，在大量卫星组网形成的星座系统中，高误码条件下的网络路由协议的设计与优化，也受到底层误码率的严重影响。分析高层协议在误码环境中的性能时，传统的做法只有两种：一是只考虑误码率的数值，这种做法简单，但与实际复杂的卫星信道特性有一定差距；二是将高层协议数据与业务数据都经过信道编码、交织、调制，在模拟中频、射频引入卫星信道衰落特性和噪声特性时考察，这种做法更可信，但系统环境搭建繁杂，调试周期太长。因此为了方便卫星通信系统高层协议的设计、调制与测试，研制数字基带卫星信道模拟器的需求应运而生。

在用于测试星座系统路由协议的“星座网络仿真平台”中，数字基带卫星信道模拟单元是其重要组成部分。控制台上实时运行的星座软件将空间网络拓扑结构与卫星信道数字基带特性实时下载到星座网络仿真平台；多台计算机模拟地面站注入和注出数据业务；大量计算机模拟卫星转发数据和控制网络路由，如图6所示。数字基带卫星信道模拟单元的核心包括误码插入模块。

在本文项目中，通过仿真得到各种通信系统参数组合在各种莱斯信道条件下，其误码发生概率的广义极值分布参数 k 、 σ 、 μ 等。但误码发生概率密

度分布不能直接使用，因为误码发生概率密度分布是在长度为 L 的统计窗口中统计的，而硬件模拟器的数据流是连续不断地到达，不论从硬件资源、还是处理延时的角度，都不允许进行 L 比特的数据暂存。因此，需要将误码持续期长度概率分布、误码持续期发生概率分布构造成误码间隔累积分布表和误码长度累积分布表。误码间隔长度累积分布曲线如图7所示，如果在Y轴随机均匀采样，则等效于其对应的误码间隔长度也是随机取得，其概率服从与累积分布曲线相对应的密度分布，即将Y轴作为查表随机地址，表的长度为256。

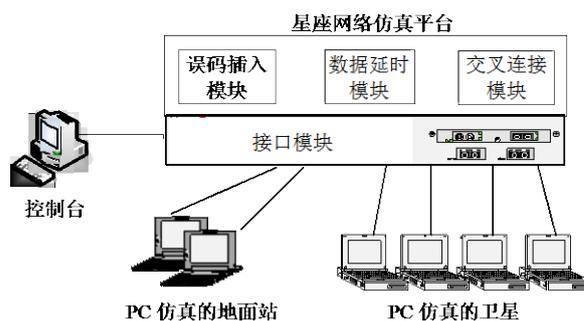


图6 星座网络仿真平台结构

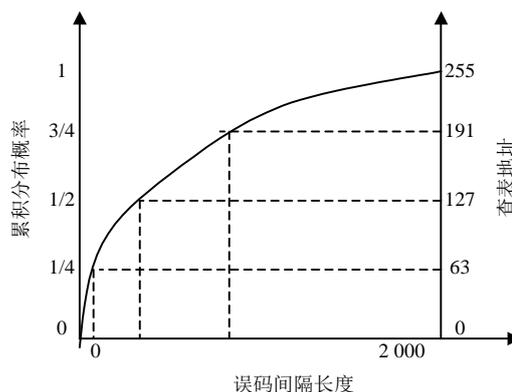


图7 误码间隔长度累积分布曲线

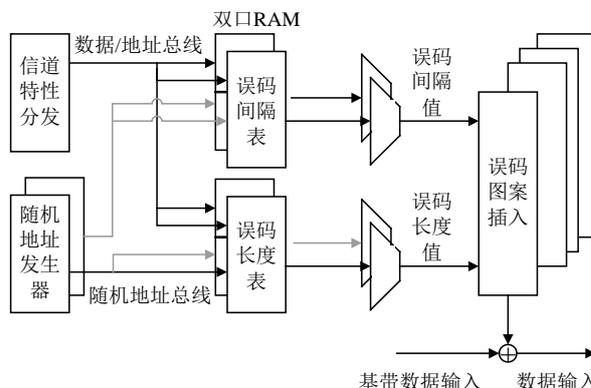


图8 误码插入模块实现框图

误码插入模块的硬件实现结构如图8所示。多个卫星信道的误码间隔累积分布表、误码长度累积分布表首先被连接PC控制台的信道特性分发单元写

入双口BRAM。随机数发生单元采用和同余法产生随机地址,从各个BRAM中随机取出各个信道的误码间隔和误码长度值。各个信道特性值经分路器送到不同的误码图案插入单元,产生误码图案叠加进实时基带数据流。

图9为 $K=16$ 、 $SNR=12$ dB的有噪莱斯信道情况下,通信系统参数如表1时,误码插入模块模拟的基带残留误码的发生概率统计结果与Simulink仿真统计结果 p_{eo} 的比较。Simulink仿真的误码率 $P_e=1.689 \times 10^{-4}$,硬件模拟的结果 $P_e=1.703 \times 10^{-4}$ 。由图可见,硬件模拟结果与Simulink仿真结果有一定的误差,这主要是由于从误码持续期发生概率分布推导到误码间隔期累积分布时,误码间隔期累积分布呈现明显的阶梯状,而非理想光滑的曲线,导致一定的误差。

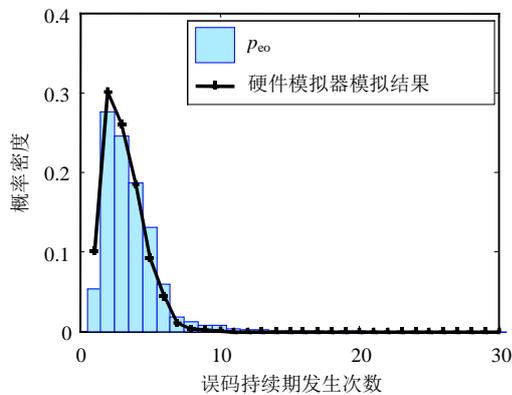


图9 仿真结果与信道模拟器模拟结果比较

4 结论

卫星通信信道是一个高误码率的恶劣信道环境,即使使用了信道纠错编码、交织等技术手段,仍然存在残留误码。研究基带残留误码的统计特性可以为上层通信性能分析、通信协议设计提供物理层的性能描述。不同的通信系统参数、不同的信道类型条件下,残留误码呈现出不同的统计特性。对于卫星通信中常见的有噪莱斯衰落信道,在固定长度统计窗口内,误码持续期的发生次数较好地服从广义极值分布;同时,误码持续期的长度在绝大多数时候不超过3。完成的信道硬件模拟器可以将基带误码图案按照上述统计所得的分布特性叠加到数据流上。

目前对不同信道纠错编码方式、不同交织方式、不同调制方式和不同信道类型对残留误码的影响的分析仍在继续进行。

参考文献

- [1] WU W W, WU M U. Simple digital satellite channel modeling with bandwidth, capacity and efficiency evaluations [C]//IWSSC' 07. Salzburg: IEEE Press, 2007: 11-14.
- [2] MILOJEVIC M, HAARDT M, EBERLEIN E, et al. Channel modeling for multiple satellite broadcasting systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2009, 55(4): 705-718.
- [3] BERBINEAU M, MASSON E, CHENNAOUI M, et al. Satellite channel modelling using a Ray-tracing Tool for train communication[C]//ITST 2006. Chengdu: IEEE Press, 2006: 452-456.
- [4] LUTZ E, CYGAN D, DIPPOLD M, et al. The land mobile satellite communication channel—recording, statistics, and channel model[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1991, 40(2): 375-385.
- [5] CORAZZA G E, VATALARO F. A statistical model for land mobile satellite channels and its application to nongeostationary orbit systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1994, 43(3): 738-742.
- [6] LOO C. A statistical model for a land mobile satellite link[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1985, 34(3): 122-127.
- [7] FONTAN F P, V-CASTRO M, CABADO C E, et al. Statistical modeling of the LMS channel[J]. IEEE transactions on Vehicular Technology, 2001, 50(6): 1549-1567.
- [8] FONTAN F P, LAGO I S, CERDEIRA R P, et al. Consolidation of a multi-state narrowband land mobile satellite channel model[C]//EuCAP 2007. Edinburgh: IET, 2007: 1-6.
- [9] BURZIGOTTI P, PRIETO-CERDEIRA R, BOLEA-ALANANAC A, et al. DVB-SH analysis using a multi-state land mobile satellite channel model[C]//ASMS 2008. Bologna: IEEE Press, 2008: 149-155.
- [10] GILBERT E. N. Capacity of a Burst-noise channel[J]. Bell Systems Technical Journal, 1960, 39: 1253-1265.
- [11] ELLIOT E O. Estimates of error rates for codes on Burst-noise channels [J]. Bell Systems Technical Journal, 1963, 42: 1977-1997.
- [12] KOPKE A, WILLIG A, KARL H. Chaotic maps as parsimonious bit error models of wireless channels[C]//IEEE INFOCOM 2003. San Francisco: IEEE Press, 2003: 513-523.
- [13] 马 上, 胡剑浩, 王 剑. 基于三状态Markov链的卫星信道模拟器设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(17): 3961-3965.
MA Shang, HU Jian-hao, WANG Jian. Design and implementation of satellite channel simulator based on three-state markov chain[J]. Journal of System Simulation. 2007, 19(17): 3961-3965.
- [14] HANT J, LIN V, ANDERSON P. Verification of satellite-channel simulators with scintillation, terrestrial multipath, and shadowing effects[C]//IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE Press, 2005: 1750-1763.