

## Ka 频段移动卫星星地链路误码统计分析

潘成胜<sup>1,2</sup>, 李花芳<sup>1,2\*</sup>, 刘春玲<sup>1,2</sup>

(1. 辽宁省高校通信与信息处理重点实验室(大连大学), 辽宁 大连 116622; 2. 大连大学 信息工程学院, 辽宁 大连 116622)

(\* 通信作者电子邮箱 fanghua6835@126.com)

**摘要:**针对 Ka 频段移动卫星星地链路的特性, 全面考虑天气和移动终端周边环境的影响, 建立了 Ka 频段移动卫星星地信道模型。对二进制相移键控(BPSK)调制方式下的星地信道进行仿真和数字基带误码图案的统计分析, 并采用最小二乘法对误码发生次数的概率进行了拟合。研究表明: 信道误码发生次数服从泊松分布, 在 Ka 频段移动卫星星地信道的数字基带模拟中, BPSK 调制方式下的系统误码由突发误码和服从泊松分布的随机误码组成。

**关键词:**卫星信道模型; 基带误码; 误码图案; 泊松分布; 突发误码

**中图分类号:** TN927.2 **文献标志码:** A

### Statistical analysis of bit error in Ka band mobile satellite channel

PAN Cheng-sheng<sup>1,2</sup>, LI Hua-fang<sup>1,2\*</sup>, LIU Chun-ling<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Communications and Information Processing of Liaoning Province (Dalian University), Dalian Liaoning 116622, China;

2. Information and Engineering College, Dalian University, Dalian Liaoning 116622, China)

**Abstract:** In view of the characteristics of Ka-band mobile satellite channel, a model was built up with taking full consideration of the decline influenced by weather and surrounding environment in this paper. Then, the satellite channel with Bipolarity Phase Shift Keying (BPSK) modulation was simulated, and the probability model of baseband channel bit error distribution was established. Meanwhile, the probability of error occurrences was fitted by using the least-squares method. According to the results, the occurrence number of channel errors obeys Poisson distribution. Moreover, during the digital baseband simulation of Ka-band mobile satellite channels, it is found that the system error with BPSK modulation consists of the burst error and the random error that obeys the Poisson distribution.

**Key words:** satellite channel model; baseband bit error; error pattern; Poisson distribution; burst error

## 0 引言

毫米波的波长较短, 频谱资源十分丰富, 而且具有穿越电离层的透射性, 于是, 毫米波频谱的开发利用显得尤为重要, 成为卫星通信领域的研究热点。目前国外新一代卫星系统采用了 Ka 频段, 我国也积极开展了 Ka 频段卫星通信技术的研究, 其中对 Ka 频段移动卫星信道误码特性的研究, 可以有效地支持系统数字基带性能的分析, 以及通信协议性能的分析和研究<sup>[1-2]</sup>。

国外已经开展了很多关于卫星通信衰落信道的实验, 得出了适用于不同频段不同环境的信道模型及其参数, 如 C. Loo 模型<sup>[3-4]</sup>、Corraza 模型、Lutz 模型等<sup>[5-6]</sup>, 这些信道模型均是针对较低的 L 频段建立的数字中频信道模型。国内对 Ka 频段卫星信道的研究主要集中在雨衰预测模型和抗雨衰技术方面, 对 Ka 频段移动卫星信道数字基带模型的研究还比较少, 并没有针对卫星通信信道的数字基带信道模型<sup>[1,7]</sup>。目前在卫星通信研究中, 卫星信道模型一般都采用高斯信道、莱斯信道或者是瑞利信道, 而在数字基带误码模拟中只是简单地采用了高斯误码<sup>[8]</sup>。其中文献[1]在对卫星信道残留误码研究时, 提出了一种误码分析的方法, 但是仿真中采用的卫星信道模型为莱斯信道模型, 并不能准确地描述 Ka 频段卫星通信信道的特性<sup>[3]</sup>。文献[9]只是针对 Ka 频段固定卫星雨衰信

道的建模和应用, 并没有考虑地面移动终端周边环境引起的衰落, 而研究表明后者引入的衰落对卫星信号的影响很大<sup>[3-4,10]</sup>。本文对 Ka 频段移动卫星在二相相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制方式下的星地信道进行了仿真, 并对提取的数字基带误码图案进行了统计分析和概率拟合, 提出了适用于 Ka 频段移动卫星系统星地信道的数字基带信道模拟方法。

## 1 Ka 频段移动卫星信道特性

Ka 频段星地链路不同于较低频段(如 L 频段), 其信道特性主要是受对流层的影响较大。电波穿过对流层时, 由于对流层中的水汽最集中, 尘埃最多, 主要天气现象, 如风、雨、雷、电、雪等气象现象都发生在该层。无线电波的传播路径会发生变化, 产生电波的大气折射效应。对流层内的水汽分子具有电偶极矩, 氧分子具有磁偶极矩, 它们与毫米波相互作用, 在某型波长上产生谐振而吸收其能量, 造成电波的衰减<sup>[11]</sup>。在毫米波频段, 雨、雪和冰雹引起的衰减最为严重, 还会改变电磁波的极化, 增加系统的噪声温度。

同时, L 频段移动卫星信道模型中的地面移动终端周边环境造成的阴影衰落、多径衰落、多普勒频移等现象同样存在于 Ka 频段移动卫星星地链路。研究表明, L 频段移动卫星信道统计模型采用不同的参数, 同样适用于 Ka 频段星地信道,

收稿日期: 2012-01-20; 修回日期: 2012-03-01。 基金项目: 国家 863 计划项目(2011AAXX04); 辽宁省教育厅科研项目(L2011217)。

作者简介: 潘成胜(1962-), 男, 江苏宜兴人, 教授, 博士生导师, 博士, CCF 会员, 主要研究方向: 卫星通信、计算机网络; 李花芳(1987-), 女, 河南安阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 卫星通信网络; 刘春玲(1971-), 女, 辽宁营口人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 信号处理、卫星通信网络。

但是必须考虑天气引起的衰落<sup>[3]</sup>。

### 1.1 L 频段 C. Loo 模型

C. Loo 模型认为星地链路中接收信号由受到阴影作用的视距传输 (Line-Of-Sight, LOS) 信号分量和不受阴影作用的多径分量组成。接收信号可以表示为:

$$r \exp(j\theta) = z \exp(j\varphi_0) + \omega \exp(j\varphi) \quad (1)$$

其中:  $r$  是接收信号,  $z$  是受到阴影作用后服从 Lognormal 分布的 LOS 分量,  $\omega$  是服从 Rayleigh 分布的多径分量, 相位  $\varphi_0$  和  $\varphi$  均服从  $[0, 2\pi]$  的均匀分布。当  $z$  为常数  $A$  时, 接收信号由无阴影作用的 LOS 分量和多径分量组成, 包络的概率密度函数为式(2)的莱斯 (Rician) 分布; 当  $\omega = 0$  时, 即无多径分量, 只存在阴影作用下的 LOS 分量时, 接收信号包络的概率密度函数为式(3)的对数正态 (Lognormal) 分布。

$$f_r(r|z) = \frac{r}{b_0} \exp\left[-\frac{(r^2 + z^2)}{2b_0}\right] \cdot I_0\left(\frac{rz}{b_0}\right) \quad (2)$$

$$f_z(z) = \frac{r}{z \sqrt{2\pi d_0}} \exp\left[-\frac{(\ln z - \mu)^2}{2d_0}\right] \quad (3)$$

根据全概率公式, 可以由式(2)和(3)得到接收信号包络的概率密度函数:

$$p_m(r) = \int_0^\infty f_r(r|z) f_z(z) dz = \frac{r}{b_0 \sqrt{2\pi d_0}} \cdot \int_0^\infty \frac{1}{z} \exp\left[-\frac{(\ln z - \mu)^2}{2d_0} - \frac{(r^2 + z^2)}{2b_0}\right] \cdot I_0\left(\frac{rz}{b_0}\right) dz \quad (4)$$

其中:  $b_0$  是平均散射多径功率,  $\mu$  和  $d_0$  是  $\ln z$  的均值和方差,  $I_0(\cdot)$  是第一类零阶修正贝塞尔函数。同样, 根据测试数据可以得到接收信号相位的概率密度函数, 近似为高斯分布<sup>[7]</sup>:

$$p_m(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\varphi - m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5)$$

其中  $m$  和  $\sigma$  是高斯随机过程的均值和标准差。

### 1.2 Ka 频段固定卫星雨衰模型

在 Ka 频段卫星信道的研究方面, Loo 等在加拿大渥太华采用 18.935 GHz 频段, 仰角 14.2° 对 Olympus 进行了测量, 其

中移动终端以 10 km/h 速度与卫星同向移动。由实验数据可得, 天气影响下的 Ka 频段固定卫星接收信号的包络和相位均服从高斯分布。它们的概率密度函数如下所示:

$$p_\omega(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\omega'} \exp\left[-\frac{(r - m_\omega')^2}{2\sigma_\omega'^2}\right] \quad (6)$$

$$p_\omega(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\omega''} \exp\left[-\frac{(\varphi - m_\omega'')^2}{2\sigma_\omega''^2}\right] \quad (7)$$

其中:  $p_\omega(r)$  和  $p_\omega(\varphi)$  分别为接收信号包络和相位的概率密度函数,  $m_\omega'$  和  $\sigma_\omega'^2$  则分别为接收信号包络的均值和方差,  $m_\omega''$  和  $\sigma_\omega''^2$  分别为信号相位的均值和方差。

### 1.3 Ka 频段移动卫星 C. Loo 模型

在文献[3]中, Loo 将其测量所得的 L 频段移动卫星通信系统信道模型扩展到了 Ka 频段。扩展的 Loo 模型假设天气引起的衰落和移动终端周边环境引起的衰落是相互独立的。所以 Ka 频段移动卫星接收信号的包络和相位可以表示为:

$$p_r(r) = p_m(r) \cdot p_\omega(r) \quad (8)$$

$$p_r(\varphi) = p(\varphi_m + \varphi_\omega) \quad (9)$$

其中:  $p_m(r)$  和  $p_\omega(r)$  由式(4)和(6)给出;  $\varphi_m$  和  $\varphi_\omega$  分别是式(5)和(7)中所指相位。仿真中 Ka 频段 C. Loo 模型所采用的参数为参考文献[3]提供的实测参数。

## 2 Ka 频段移动卫星通信系统的仿真

### 2.1 仿真模型的建立

根据 Ka 频段移动卫星信道特性, 本文提出了 Ka 频段移动卫星通信的信道仿真模型如图 1 所示, 模型中添加了天气影响引入的乘性衰落模块、移动终端环境引入的乘性衰落模块和误码统计单元。数据源产生二进制数据流, 经调制进入信道中, 在信道内根据 Ka 频段移动卫星信道模型分别添加由天气和移动终端环境引入的乘性衰落因子以及加性高斯白噪声, 之后衰落信号经相干解调输出给误码统计单元。误码统计单元产生误码图案, 并对误码图案进行统计分析和拟合。

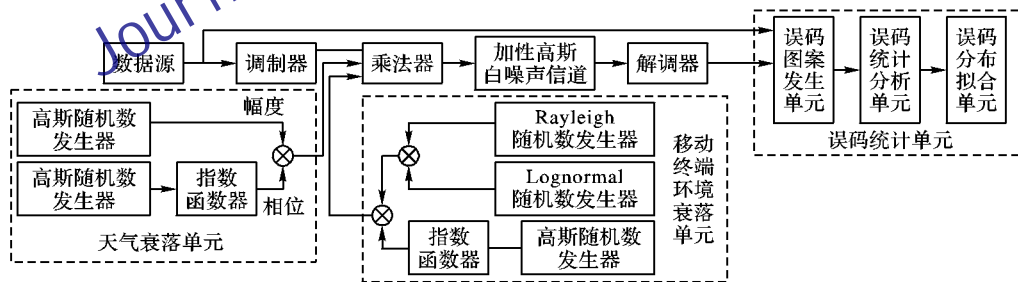


图1 Ka 频段移动卫星通信系统仿真模型

### 2.2 误码统计模型的建立

数据源连续发送数据流, 误码统计模块比较接收比特和发送比特, 得到的误码图案由接收端收到的连续正确或者错误的比特流来表示。当传输比特正确时, 误码图案标示为“0”(称为误码间隔, 用 run 表示); 传输错误时, 误码图案标示为“1”(称为误码, 用 burst 表示)。如果得到的误码图案序列的构成为 0、0、0、1、1、1、0、0、0、0、1、0、0、1、1、0。可得 run 和 burst 发生次数分别为 4 和 3, 误码持续期长度 (burst\_length) 为 4、1、2, 相应的误码间隔长度 (run\_length) 为 3、4、2、1。

仿真一定时间后获得大量的误码图案序列, 在固定长度的统计窗口中统计 run 和 burst 发生次数的概率。run 发生次数的概率密度  $p_m$  和 run\_length 的概率密度  $p_d$  分别由式(10)

和式(11)计算:

$$p_m(i) = N_r(i) / N_w \quad (10)$$

$$p_d(j) = M_d(j) / M_d \quad (11)$$

其中:  $N_r(i)$  是发生  $i$  次 run 的统计窗口数量,  $N_w$  是统计窗口总数量;  $M_d(j)$  是 run\_length 为  $j$  的数量,  $M_d$  是 run\_length 的总数量。使用相同的方法可以获得 burst 发生次数的概率密度  $p_{bm}$  和 burst\_length 的概率密度  $p_{bd}$ 。

### 2.3 仿真结果

对仿真获得的基带误码图案序列进行统计, 本设计中统计窗口长度  $L = 4000$ , 并用最小二乘法对得到误码发生次数概率密度函数  $p_{bm}$  进行拟合, 可以得到不同信噪比、不同阴影、不同天气条件下信号在 Ka 频段传输的链路误码率性能, 以及链路误码的分布特性。

图2是Ka频段移动卫星通信系统在不同阴影状况、不同天气条件下,相干BPSK信号的误码率性能。将本文仿真结果与图2(a)所示的Ka频段固定卫星通信系统误码率性能进行比较<sup>[12-13]</sup>。在图2(b)所示的轻度阴影条件下,链路误码率没有较大幅度的升高,同样是雷雨天气下衰落最严重;而在图2(c)所示的中度阴影条件和图2(d)所示的重度阴影条件

下,移动卫星信道的衰落比固定卫星系统明显增大,雷雨和中雨天气下的衰落最为严重。由仿真图可以看出,当信噪比达到一定值之后,雷雨和中雨天气的误码率曲线趋于水平直线,表明通过传统的链路功率控制(当信道衰落增大时,通过增大发射功率来提高信噪比,从而降低误码率)已经无法抵抗这两种天气带来的信号衰落,应采用其他的抗雨衰技术。

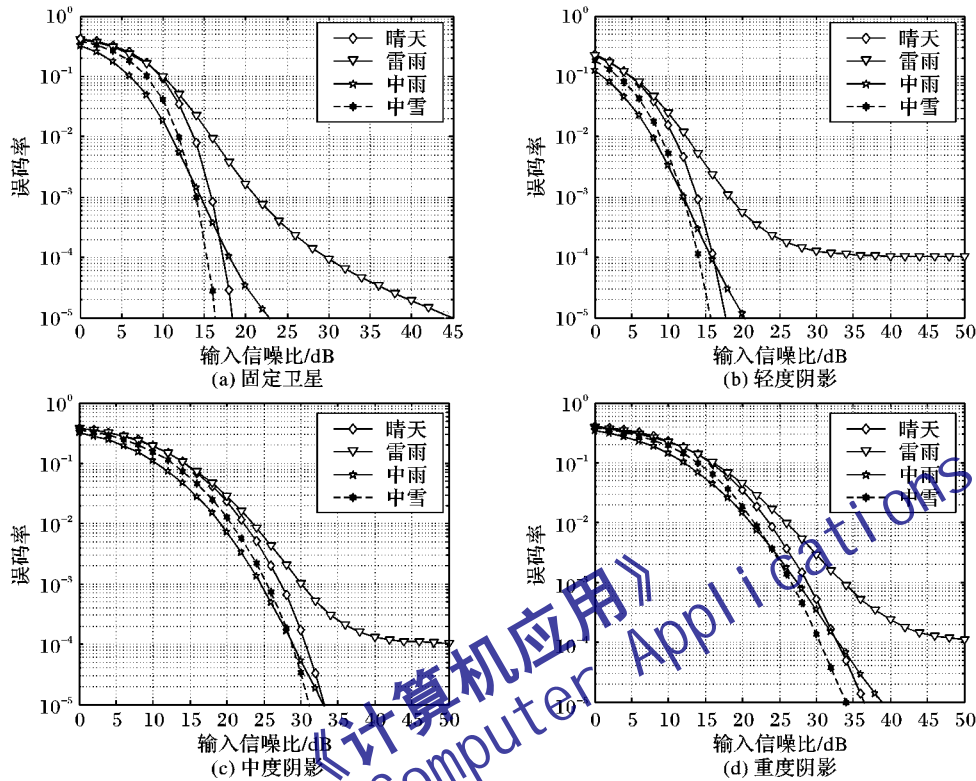


图2 固定卫星与不同阴影下移动卫星通信系统误码率性能仿真

在误码率仿真结果的分析基础之上,本文进行进一步研究,对基带误码的分布类型进行分析和拟合,得到Ka频段移动卫星通信系统星地链路的基带误码模型。图3结果是对误码发生次数概率密度 $P_{\text{err}}$ 的最小二乘拟合。图中圆圈代表误码统计得到的样本点,虚线为最小二乘拟合结果。其中图3(a)是轻度阴影条件下,信噪比为24 dB时,对四种天气的误码发生次数概率密度分布的拟合。拟合结果表明这四种天气下的误码发生次数概率密度分布均服从泊松分布,而且雷雨

天气下的均值最大,说明误码率最高,与图2仿真结果一致。图3(b)是重度阴影条件下,信噪比为24 dB时的拟合情况。除雷雨天气外,其他三种天气均服从不同均值的泊松分布。但是在轻度阴影条件下,信噪比为24 dB时,只有雷雨天气造成的误码发生较多,可以进行误码的拟合,其误码发生次数概率密度分布同样服从泊松分布,泊松分布的概率密度函数为:

$$p_k = P(\xi = k) = \frac{\lambda^k}{k!} \exp(-\lambda); k = 0, 1, 2, \dots \quad (12)$$

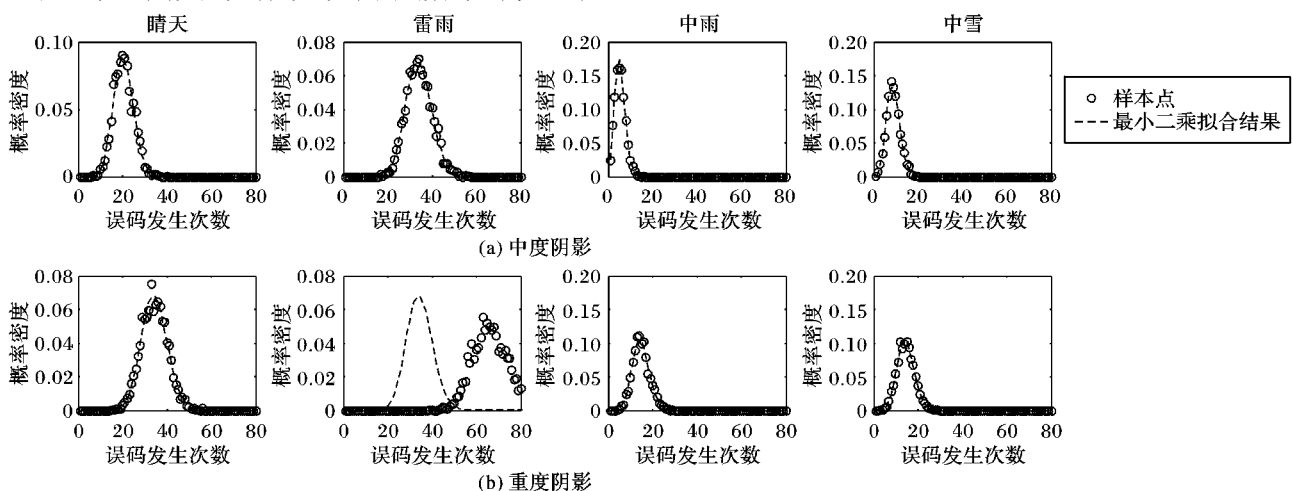


图3 误码发生次数概率密度分布的最小二乘拟合(信噪比为24 dB)

研究中发现,其他天气在不同信噪比下拟合时,当信噪比减小到一定值后,误码率升高,相同概率的误码发生次数过

多,导致其概率分布不服从任何分布,表现为突发误码。

图4(a)是轻度阴影条件下,信噪比为24 dB时,不同天气



的误码间隔长度的累计分布曲线。由图可以看出,雷雨天气的误码间隔长度最小(一般小于700);晴天的误码间隔长度相对较长(一般小于1000);中雪的误码间隔长度最大。说明雷雨天气造成的系统误码最为严重。图4(b)是重度阴影条件下,相同信噪比下误码间隔长度的累计分布曲线。相比于中度阴影,其误码间隔长度均有所减小,而中雨最为明显。在重度阴影作用下,中雨的衰落变得严重;雷雨天气的衰落最为严重,并且相对于其他天气误码特性表现为误码密集,有突发误码的特性。该结论与图2和图3结论一致。

在之前分析得到的结论基础之上,对突发误码阈值进行了定义。假定所得到的误码图案序列长度为 $n_0$ ,其中第一个误码到最后一个误码之间的误码个数为 $n_e$ ,定义突发误码错误密度为 $\lambda_e = n_e/n_0$ ;当 $\lambda_e \geq \lambda_0$  ( $\lambda_0$ 是某个阈值)时为突发误码,否则认为是随机误码。在获得误码序列后,对统计窗口中

的错误密度(误码发生个数/统计窗口长度)进行统计得到如图5所示的错误密度分布(错误密度指错误的概率密度)。通过设置阈值 $\lambda_0$ ,即图5中的平均错误密度值,可以将不同天气在不同信噪比、不同阴影下系统的误码界定为随机误码,或者突发误码。例如:设定 $\lambda_0$ 为0.015,可以认为在信噪比为24 dB时,雷雨天气在重度阴影下造成的误码为突发误码。

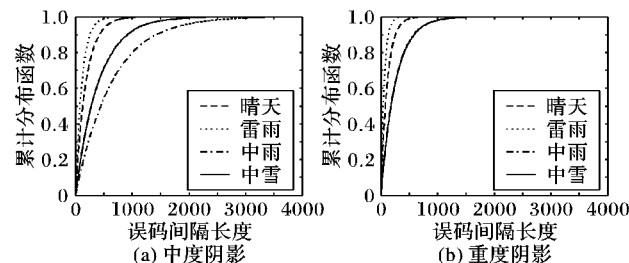


图4 误码间隔长度累计分布曲线

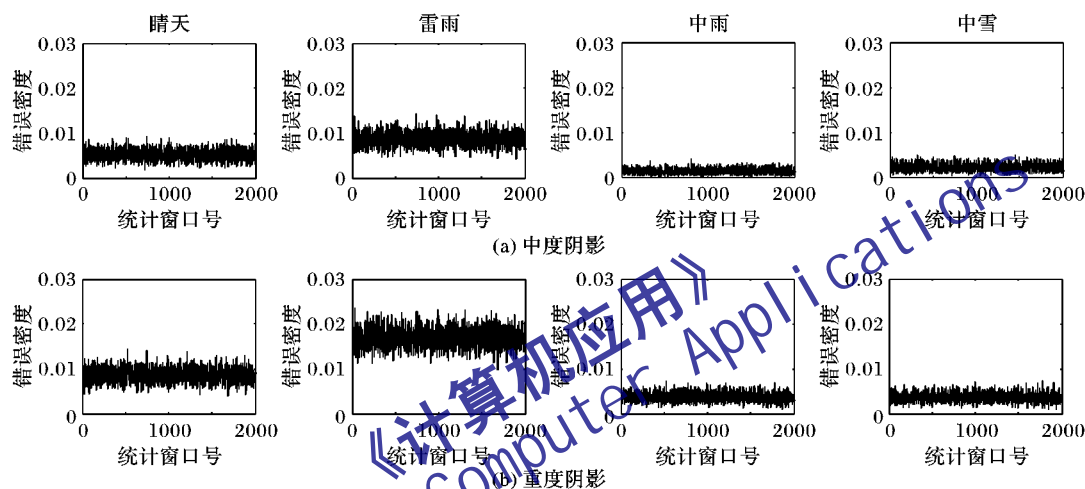


图5 统计窗口错误密度分布图

由图3~5,本文可以得出下面的结论:在Ka频段移动卫星星地链路中,系统误码不是简单的高斯随机误码,而应该由服从泊松分布的随机误码和突发误码组成。根据突发误码阈值 $\lambda_0$ 的设置,可以判决误码为随机误码或者突发误码。

### 3 结语

本文在分析了Ka频段移动卫星通信信道特性的基础上,建立了Ka频段移动卫星通信系统的仿真模型;在采用BPSK调制方式,没有加入信道编码、交织、均衡和抗雨衰等技术时,得到了不同信道条件下信道模型的仿真结果;在此基础上,对仿真结果进行了系统基带误码特性的分析和研究,并用最小二乘法对仿真结果中的误码发生次数的概率密度分布进行了拟合。仿真结果表明:在一定条件下,系统误码的发生次数服从泊松分布;当误码率高于一定值后,系统误码表现出明显的突发误码特性。因此在卫星通信系统的研究中,BPSK调制方式下,Ka频段移动卫星数字基带信道的模拟应采用泊松误码和突发误码的混合模拟,对其他调制方式下的模拟可以采用相同的方法获得。该结果可作为后续的Ka频段移动卫星通信基带信道模拟的理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 凌翔,卓永宁,胡剑浩. 卫星信道基带残留误码分布特性拟合与模拟[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(2): 191-195.
- [2] WU W W, WU M U. Simple digital satellite channel modeling with bandwidth, capacity and efficiency evaluations [C]// IWSSC'07: International Workshop on Satellite and Space Communications. Pis-

cataway: IEEE, 2007: 11-14.

- [3] LOO C. Land mobile satellite channel measurements and modeling [J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86 (7): 1442-1463.
- [4] LOO C. Measurements and models of a land mobile satellite channel and their applications to MSK signals [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1987, 35(3): 114-121.
- [5] LI W, LAW C L, DUBEY V K, et al. Ka-band land mobile satellite channel model incorporating weather effects [J]. IEEE Communications Letters, 2001, 5(5): 194-196.
- [6] 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.
- [7] 黄和,王东进,刘发林. Ka波段移动卫星信道的综合模型及误码率分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2005, 35(3): 346-353.
- [8] 吴亚玲,孙华伟,郑林华. 数字信道模拟中误码发生器的设计[J]. 现代有线传输, 2003(4): 42-46.
- [9] 王欣,王可人,金虎,等. 基于Ka频段的数字卫星广播系统建模仿真[J]. 计算机工程, 2010, 36(13): 224-226.
- [10] 翟政安,唐朝京. Ka频段卫星通信链路雨衰对策[J]. 中国空间科学技术, 2010, 30(3): 55-62.
- [11] 周辉,郑海昕,许定根. 空间通信技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [12] 王爱华,罗伟雄. Ka频段卫星通信信道建模及系统性能仿真[J]. 通信学报, 2001, 22(9): 61-69.
- [13] 王红霞,尹建方,潘成胜. Ka频段卫星通信的信道特性及系统性能仿真[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(6): 121-124.