

# 有效的 Ka 波段移动卫星信道综合模型研究

韦娟, 刘达, 田刚旗

(西安电子科技大学 通信工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 为了更加准确地描述卫星移动通信信道的衰落特性, 提出了一种新的 Ka 波段卫星移动通信信道综合模型。首先在分析移动卫星信道传播特性的基础上, 考虑多径衰落、阴影遮蔽及天气影响等因素, 建立了服从 Gaussian 分布的大气空间模型, 推导出服从 Rice、Rayleigh 和 Lognormal 联合分布的地面信道模型。然后利用卫星信道环境中大气空间部分与地面部分对信道特性的影响是彼此相互独立的性质, 提出了一种在大气空间持续影响下的移动卫星信道衰落特性综合模型。并就不同天气条件和不同阴影遮蔽程度下, 综合模型的误码率特征与系统误码率理论上限进行仿真对比, 得出了相一致的结果, 验证了该信道综合模型的合理性和正确性。

**关键词:** Ka 波段; 卫星信道; 概率分布; 天气影响; 综合模型

中图分类号: TN927

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2012)Z2-0172-04

## Study on an effective integrated model of Ka-band mobile satellite channel

WEI Juan, LIU Da, TIAN Gang-qi

(School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In order to describe the Ka-band mobile satellite communications channel fading features more realistically, a mobile satellite integrated channel model was proposed. The characteristics of the mobile satellite propagation channel were analysed in detail. Weather conditions, as well as multi-path fading and shadowing were taken into account as main influencing factors. On this basis, airspace channel model was built obeying the Gaussian distribution as well ground surface, which obey Rice, Rayleigh and Lognormal joint distribution. Then the integrated channel model was presented considering weather effects on condition that the two parts are independent each other in the influence of the channel characteristics. The mathematical analysis model and simulation model of the new integrated channel model were established respectively. Finally, the BER (bit error rate) performance was analyzed for different weather conditions and shadows. Compared with the theoretical BER, the integrated channel model in satellite mobile communication systems is correct and reasonable.

**Key words:** Ka-band; satellite channel; probability distribution; weather effect; integrated model

### 1 引言

在移动卫星通信系统中, 信道传播特性的优劣直接影响系统的通信质量和工作性能。因此, 在研

究和设计移动卫星通信系统时, 重要的环节之一就是分析信道的传播特性, 研究信道的衰落特性, 建立信道的分析模型。针对 Ka 波段移动卫星通信信道衰落特性, 已有相关的信道衰落试验<sup>[1~3]</sup>。而关于

收稿日期: 2012-10-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61201134); 高等学校学科创新引智计划(“111”计划)基金资助项目(B08038); 国家留学基金委访问学者出国研修项目; 中央高校基本科研业务费资金资助(K50511010022)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (61201134); 111 Project (B08038); China Scholarship Council Project; The Fundamental Research Funds for the Central Universities (K50511010022)

移动卫星通信信道衰落特性的研究，多是针对地球表面的多径传播和阴影遮蔽效应，很少考虑信道环境中大气空间部分各种衰落因子对信号传播所带来的影响<sup>[4,5]</sup>。文献[6]中，利用 Ka 波段卫星信道环境中大气空间部分与地面部分对信道特性的影响是彼此相互独立的性质，将大气空间部分的天气影响看作是一个乘性因子和地面部分直接相乘建立综合模型。但是对于 2 个相互独立的过程，直接将这 2 个概率密度函数相乘得到的综合模型不能准确描述信道的衰落特性。本文提出一种考虑天气条件对信道传播特性影响的新信道综合模型。该信道模型能够更加准确地描述 Ka 波段卫星移动通信信道的衰落特性。最后基于新信道综合模型进行仿真计算，并对结果进行分析比较。

## 2 信道模型

Ka 波段卫星信道可以分成 2 个部分：大气空间部分和地面部分。建立信道综合模型，首先需建立表征这两部分各自信号衰落特性的数学分析模型。

### 2.1 大气空间部分

由文献的相关试验数据可知，接收信号的包络和相位在受到大气效应（如雨、雪、云、雾等）的影响下均服从 Gaussian 分布<sup>[1~3]</sup>，则此时接收信号包络  $r_s$  的概率密度函数为

$$f_{\text{sky}}(r_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(r_s - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (1)$$

其中， $\mu_s$  与  $\sigma_s^2$  分别为 Gaussian 分布的均值和方差。

与信号包络衰落引起的损失相比，相位衰落引起的损失可以忽略不计<sup>[7]</sup>。

### 2.2 地面部分

电波在移动环境中传播时，接收信号受到地面各种障碍物的阻挡而发生阴影慢衰落。还可能经过地面各种障碍物的反射、散射或绕射等发生多径传播。信号包络服从 Rice、Rayleigh 和 Lognormal 等的联合分布。

常见的用于描述阴影衰落的概率分布模型服从 Lognormal 分布，则其直射信号分量包络  $z_g$  的概率密度函数为

$$f(z_g) = \frac{1}{z_g \sqrt{2\pi}d_{0g}} \exp\left[-\frac{(\ln z_g - \mu_g)^2}{2d_{0g}^2}\right] \quad (2)$$

其中， $\mu_g$  与  $d_{0g}$  分别为  $\ln z_g$  的均值和方差。

设直射信号分量的强度明显超过多径信号分量，则在一定阴影遮蔽条件下接收信号服从 Rice 分布，包络  $r_g$  的概率密度函数为

$$f(r_g|z_g) = \frac{r_g}{\sigma_g^2} \exp\left[-\frac{r_g^2 + z_g^2}{2\sigma_g^2}\right] I_0\left(\frac{r_g z_g}{\sigma_g^2}\right) \quad (3)$$

其中， $\sigma_g^2$  为 Rice 分布的方差； $I_0(\cdot)$  为第一类零阶修正贝塞尔函数。

根据式(2)和式(3)可推导出合成信号包络  $r_g$  的概率密度函数为

$$f_{\text{Ground}}(r_g) = \frac{r_g}{\sigma_g^2 \sqrt{2\pi}d_{0g}} \int_0^\infty \frac{1}{z_g} \exp\left[-\frac{r_g^2 + z_g^2}{2\sigma_g^2} - \frac{(\ln z_g - \mu_g)^2}{2d_{0g}^2}\right] I_0\left(\frac{r_g z_g}{\sigma_g^2}\right) dz_g \quad (4)$$

### 2.3 信道综合模型

建立 Ka 波段移动卫星信道综合模型时，除了考虑阴影衰落及多径传播以外，还应该考虑天气条件对系统的影响。设信道环境中大气空间部分与地面部分对信道特性的影响是彼此相互独立的<sup>[1]</sup>，根据随机过程理论，在整个天气条件影响下，信道综合模型中接收信号包络  $r$  的概率密度函数可表示为

$$f(r) = \int_0^\infty f(r|r_s) f_{\text{sky}}(r_s) dr_s \quad (5)$$

根据全概率公式，并参考 Corazza 模型（全阴影模型）接收合成信号包络的概率密度函数的推导过程，可得

$$f(r|r_s) = \frac{1}{r_s} f_{\text{Ground}}\left(\frac{r}{r_s}\right) \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)得

$$f(r) = \int_0^\infty \frac{1}{r_s} f_{\text{Ground}}\left(\frac{r}{r_s}\right) f_{\text{sky}}(r_s) dr_s \quad (7)$$

将式(1)和式(4)代入式(7)可得到信道综合模型完整表达式。分析其概率分布关系可知，Rice-Lognormal 分布描述了阴影遮蔽作用下直射信号分量的衰落特性。Gaussian 分布则反映了信号传播过程中天气对其产生的影响。综合模型能够更加准确地描述移动卫星通信信道的衰落特性，反映真实的信道环境。

### 3 仿真及结果分析

系统总体仿真模型如图 1 所示, 在该基带等效系统中, 数据源产生等概率的二进制随机序列, 经过 DBPSK 调制后, 进入 Ka 波段移动卫星综合信道, 经过基带 DBPSK 解调器输出。

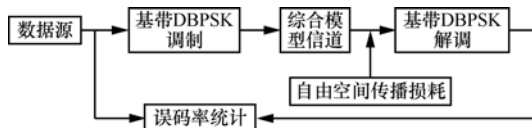


图 1 信道综合模型的系统总体仿真框

在信道模型中, 选择文献[1]中的 Olympus 卫星环境及仿真参数, 载波信号的工作频率为 25GHz, 移动终端以 10km/h 的速度朝着卫星方向运动。在图 1 所示的信道综合仿真模型中, 数据源模块将产生等概率的 0 和 1 数据序列。不同阴影遮蔽程度下, 雷雨、中雨、中雪和小雪 4 种恶劣天气条件对信道传播特性的误码率情况如图 2~图 4 所示。

图 2 为信号在无阴影遮蔽时系统传输的误码率特性曲线。对比分析可知, 雷雨天气时信号所受的衰减作用最严重。而且由于雷雨天气时, 大气中存在复杂的电磁环境和水汽特性, 当  $E_b/N_0 > 45\text{dB}$  时, 系统的误码率性能很难得到显著改善。

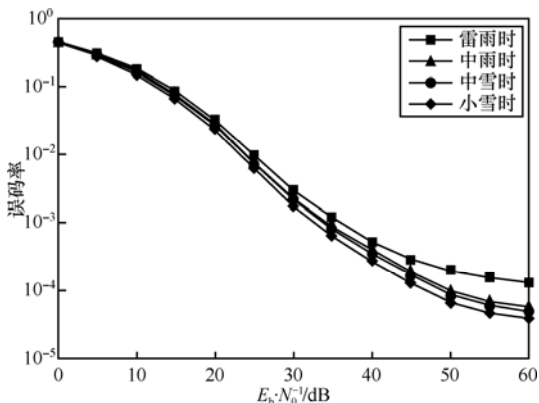


图 2 无阴影遮蔽时 4 种天气条件下系统的 BER 对比曲线

图 3 为信号在中度阴影遮蔽时系统传输的误码率特性曲线。分析对比可知, 在  $E_b/N_0 < 60\text{dB}$  时, 雷雨天气衰落最为严重; 而当  $E_b/N_0 > 60\text{dB}$  时, 中雨天气对信号传播的衰减作用超过了雷雨时的情况。此时系统的误码率很难得到显著改善。

图 4 为信号在深度阴影遮蔽时系统传输的误码率特性曲线。当系统的  $E_b/N_0 < 55\text{dB}$  时, 雷雨天气衰落最为严重; 但当系统的  $E_b/N_0 > 55\text{dB}$  时, 中雨天气

对信号传播的衰落影响最大, 卫星信号的传输将可能出现短暂中断。

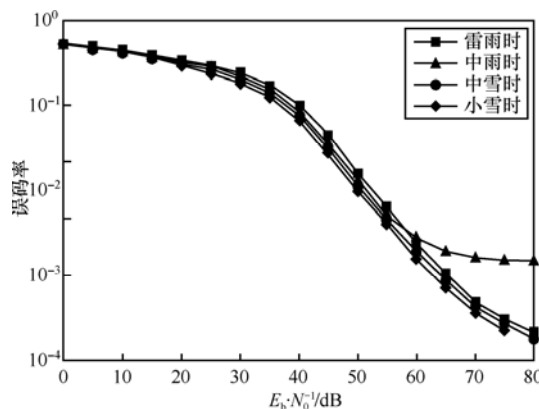


图 3 中度阴影遮蔽时 4 种天气条件下系统的 BER 对比曲线

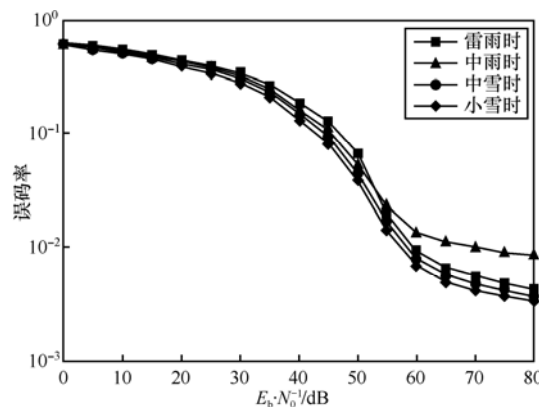


图 4 深度阴影遮蔽时 4 种天气条件下系统的 BER 对比曲线

为了验证 Ka 波段移动卫星信道仿真模型的正确性, 将不同天气条件和不同阴影遮蔽程度下仿真系统的误码率与其理论值进行对比分析。由于分析计算的局限性, 分别只考虑各种天气条件及地球表面部分不同程度阴影遮蔽对综合模型信道衰落影响时, 只得到综合模型仿真系统的误码率理论上限公式[8]。

在仿真中, 地面部分选取无阴影遮蔽。大气空间部分选取对 Ka 波段移动卫星信道传播特性影响较大的雷雨和中雨天气, 仿真对比如图 5 和图 6 所示。分析对比不同天气条件下系统的理论误码率上限曲线和仿真曲线可知, 二者比较吻合。雷雨和中雨时, 信号传播的衰落影响较大, 雷雨天气最为严重。

信道环境中的地面部分选取中度阴影遮蔽和深度阴影遮蔽 2 种情况, 大气空间部分选取晴天。对比关系如图 7 所示。分析对比可知, 系统的理论误码率上限曲线和仿真曲线比较吻合。当信号受到深度阴影遮蔽作用时, 信号传播的衰落影响更为严重。

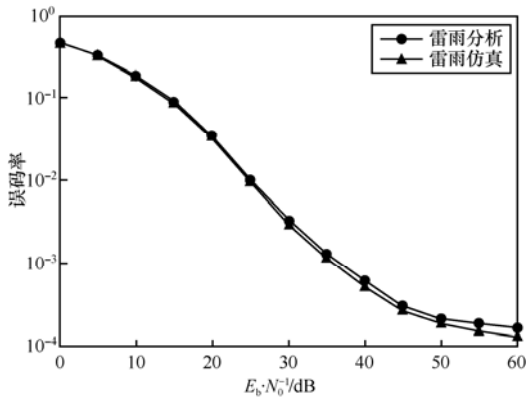


图 5 雷雨天气时系统误码率理论上限与仿真曲线

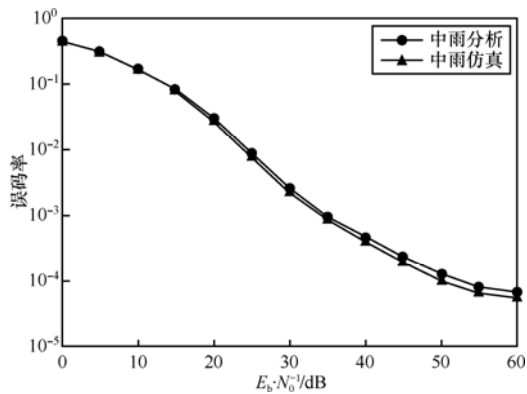
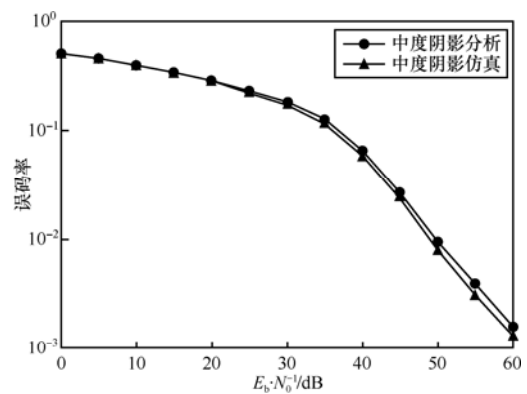
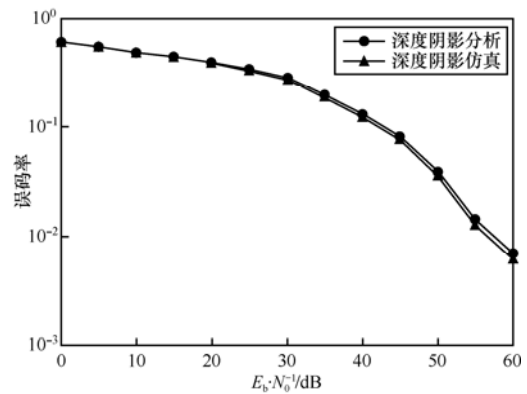


图 6 中雨天气时系统误码率理论上限与仿真曲线



(a) 中度阴影时



(b) 深度阴影时

图 7 不同环境时系统误码率理论上限与仿真曲线

### 4 结束语

在考虑多径衰落、阴影遮蔽及天气影响等因素的基础上，建立了一种考虑天气条件影响的 Ka 波段卫星移动通信信道综合模型。分析对比仿真结果可知，无阴影遮蔽时，雷雨天气时信号所受的衰减作用最为严重。中度和深度阴影遮蔽时，仍然是雷雨天气时系统的衰落最为严重，但对于更大的信噪比，中雨天气对信号的的衰减更严重，超过了雷雨天气。另外在深度阴影时，卫星信号的传输将可能出现短暂中断。综合模型中虽然考虑了典型的天气条件如降雨、降雪等对电波传播的影响，但对大气环境中的其他效应如气体吸收、闪烁等因素进行了忽略处理。因此，下步工作将对这些大气因子建立相应的修正模型，从而使得信道综合模型更加完善。

### 参考文献：

[1] LOO C. Statistical models for land mobile and fixed satellite communications at Ka-band[A]. IEEE 46th Vehicular Technology Conference[C]. USA,1996, 2:1023-1027.

[2] ABBAS M, AJAYI S, ZHE Y, *et al.* Channel modelling and characterization of mobile satellite communication systems[A]. 20th Nordic Conference on Radio Science and Communications[C]. 2009, 1106:311-321.

[3] 康健, 王宇飞. 中国 Ka 波段卫星通信线路的雨衰分布特性[J]. 通信学报, 2006, 27(8):78-81.

KANG J, WANG Y F. Rain attenuation distribution characteristic of Ka band satellite communication[J]. Journal on Communication, 2006, 27(8):78-81.

[4] 雍明远, 梁俊, 袁小刚. 宽带移动卫星通信信道模型研究[J]. 通信技术, 2009, 42(1):65-67.

YONG M Y, LIANG J, YUAN X G. Study on simulation model for wideband satellite mobile communication channels[J]. Communication Technology, 2009, 42(1):65-67.

[5] PRIETO-CERDEIRA R, PEREZ-FONTAN F, BURZIGOTTI P, *et al.* Versatile two-state land mobile satellite channel model with first application to DVB-SH analysis[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2010. 291-315.

[6] LOO C, BUTTERWORTH J S. Land mobile satellite channel measurement and modeling[A]. Proc IEEE[C]. 1998, 86: 1442-1463.

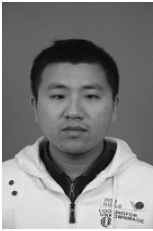
(下转第 181 页)

system combining digital signature and digital watermarking[J].  
Journal of Software, 2003, 14(6):1157-1162.

[11] ISO. Information Technoly-Security Techniques-Key Management-part 3: Mechanisms Using Asymmetric Techniques ISO/IEC 11770-3[S]. International Standard, 1999.

[12] SHOUP V. On formal models for secure key exchange[EB/OL]. <http://www.shoup.net/papers/skey.pdf>, 2012.

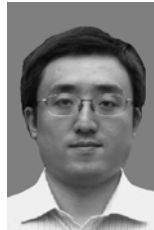
作者简介:



许金超 (1982-), 男, 山东临沂人, 同济大学博士生, 主要研究方向为软件保护、信息安全。



曾国荪 (1964-), 男, 江西吉安人, 同济大学教授, 主要研究方向为可信软件、信息安全。



王伟 (1979-), 男, 湖北武汉人, 同济大学讲师, 主要研究方向为内容安全、并行计算。

.....  
(上接第 175 页)

[7] FONTAN F P. Channel modeling for land mobile satellite services[A]. Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)[C]. Spain, 2010.1-5.

[8] LOO C. A statistical model for a land mobile satellite link[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1985, 34(3):122-127.

作者简介:



韦娟 (1973-), 女, 陕西渭南人, 博士, 西安电子科技大学副教授, 主要研究方向为卫星通信与移动通信。



刘达 (1984-), 男, 辽宁锦州人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为卫星通信。



田刚旗 (1987-), 男, 陕西武功人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为卫星通信。