

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.03.011

# 一种适用于多场景的窄带 LMS 信道模型

廖希, 薛睿, 赵旦峰

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 150001 哈尔滨)

**摘要:** 针对现存陆地移动卫星(land mobile satellite, LMS)信道模型使用场景有限及状态持续时间概率密度函数(state duration probability density function, SDPDF)不精确问题, 提出能准确有效地描述更多操作场景的窄带 LMS 信道模型. 利用对数正态分布近似 SDPDF 的 Semi-Markov 链实现状态序列. 在每一状态内结合传播参数生成服从 Loo 分布的载噪比时间序列. 通过在慢衰落成分中引入多普勒频移以增加参数数据库及扩展适用场景. 研究不同场景下状态概率、载噪比时间序列的一阶统计特性和 90% 信号有效性所需的余量, 并与实测值比较. 研究结果表明: 该模型能在多场景下有效地代表阴影条件, 且在不同信道环境中的各仰角和方位角下具有较好适用性, 可用于系统性能分析.

**关键词:** 陆地移动卫星; 信道模型; Semi-Markov 链; 基于角度分集的移动卫星信道; Loo 分布

**中图分类号:** TN927

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2015)03-0066-06

## A narrowband LMS channel model suitable for more scenarios

LIAO Xi, XUE Rui, ZHAO Danfeng

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, 150001 Harbin, China)

**Abstract:** In view of the problem of limited usage scenarios as well as inaccuracy of state duration probability density function (SDPDF) in existing land mobile satellite (LMS) channel model, we propose a narrowband LMS channel model which is capable of describing much more operational scenarios accurately and effectively. The state sequence is achieved by using Semi-Markov chain which approximates the SDPDF as a lognormal distribution. Within each state the carrier-to-noise ratio (C/N) time series is generated and defined as a Loo distribution by combining with propagation parameters. Doppler frequency shift is applied in slow fading components to increase parameter database and extend usage scenarios. The state probabilities, the first-order statistical characterization of C/N time series, and the required margins of 90% signal availability are investigated and compared with measurement results under different scenarios conditions. Simulation results show that the proposed model is effective for the representation of shadowing conditions on much more scenarios. In addition, it has a good applicability for different elevations and driving directions in different environments, and can be used in system performance analysis.

**Keywords:** land mobile satellite; channel model; Semi-Markov chain; mobile satellite channel with angle diversity; Loo distribution

近年来, 能为用户各种应用提供无缝接入的陆地移动卫星(land mobile satellite, LMS)系统成

为第三代和第四代无线系统所必需的部分, 而传播信道中复杂的电磁波特性严重影响了接收信号可靠性. 因此需要建立一个准确信道模型. 研究表明: 一个能有效代表窄带 LMS 信道传播特性的信道模型可进一步扩展到多卫星单极化天线、单卫星双极化天线及多波束天线的 LMS 信道<sup>[1-3]</sup>、混合卫星-陆地移动信道<sup>[3]</sup>和宽带卫星信道<sup>[4-7]</sup>等建模中, 为 LMS 系统的物理层和网络层仿真研究提供信息.

**收稿日期:** 2013-10-15.

**基金项目:** 国家自然科学基金(61371099); 黑龙江省留学归国科学基金(LC2013C22); 中央高校基本科研业务费专项基金(HEUCF14080).

**作者简介:** 廖希(1988—), 女, 博士研究生;

赵旦峰(1961—), 男, 教授, 博士生导师.

**通信作者:** 廖希, hjkx1988@163.com.

目前,常用概率统计模型来描述窄带 LMS 信道,该模型包含表征信道非常慢变化的状态转移、快变化和慢变化衰落信号两个过程.文献[8-10]对一阶 Markov 模型, Semi-Markov 对数正态拟合、分段指数拟合、修正的对数正态拟合模型、动态 Markov 及其近似模型的研究表明对数正态拟合的 Semi-Markov 状态模型能更精确地生成状态概率和状态持续时间的统计特性,且复杂度较低,可作为窄带 LMS 传播信道状态模型的较优选择.在不同卫星仰角下,文献[11]将用户-卫星间视距(line-of-sight, LOS)信号分为3种状态,并由经验拟合公式计算传播参数.在 L、S、Ka 频段的给定环境和卫星仰角下,文献[12]提取出窄带、宽带 LMS 信道状态参数和传播参数,并假定每一状态内信号包络服从 Loo 分布<sup>[13]</sup>.参考数字视频广播-手持终端接收卫星业务(digital video broadcasting-satellite services to handhelds, DVB-SH)标准,文献[14]修正三状态 LMS 信道模型<sup>[11-12]</sup>,提出适用于单卫星系统通用两状态 LMS 信道模型,该模型仅适用于 S 频段给定环境和卫星仰角的实测数据.由于限定频段、环境和卫星仰角,以上提出信道模型仅能描述有限场景的阴影条件.为能准确有效地代表不同环境、不同卫星仰角和不同方位角的信道传播特性,有必要在一组具有统计意义接收环境的实测数据下研究适用于多场景的 LMS 信道模型.

本文采用基于角度分集的移动卫星信道(mobile satellite channel with angle diversity, MiLADY)项目<sup>[15-19]</sup>中两组实测数据提取的状态参数和传播参数,研究一种适用于更多操作场景的窄带 LMS 信道模型.相比 DVB-SH 系统中的两状态 LMS 信道模型<sup>[14]</sup>,该模型的状态参数依赖于状态持续时间和当前状态,且在慢衰落信号成分中引入与卫星方位角有关多普勒频移,增加模型参数数据库.在不同环境、不同仰角和不同方位角下,研究对数正态拟合的 Semi-Markov 状态模型的‘坏’状态概率、输出载噪比(carrier-to-noise ratio, C/N)时间序列的累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)及 90% 信号有效性所需的余量,并与卫星数字音频无线业务(satellite digital audio radio services, SDARS)实测及 DVB-SH 参考模型<sup>[14]</sup>比较.

## 1 窄带 LMS 信道的场景

建立一个能准确有效地代表阴影场景的 LMS 信道模型,需要描述信道阴影条件变化的状

态参数及描述快变和慢变信号成分的传播参数. MiLADY 项目进行了两次具有统计代表意义的实测<sup>[15-16]</sup>.第一次沿着 U.S. 东海岸以 2.1 kHz 的采样率在 2.3 GHz 频段左右的 S 波段同时记录 4 颗 SDARS 卫星的功率及天线的噪声功率,进而从实测数据统计分析中提取出信道模型的状态参数(即对数正态拟合 Semi-Markov 链的均值和标准偏差)和 Loo 分布的传播参数(即多径平均功率、阴影遮蔽成分的均值和标准偏差).尽管 SDARS 测试能有效地代表 U.S. 阴影环境,但仅包含 XM 卫星无线电的两颗 GEO 卫星和 Sirius 卫星无线电的两颗 HEO 卫星,只能获得有限的轨道星座,受限于卫星方位角或仰角的分析.第二次在德国爱尔兰根测试记录了全球导航卫星系统(global navigation satellite systems, GNSS)在 L 波段(1 575.42 MHz)下至少 8 颗 GPS 卫星的信号.由于 C/N 的时间分辨率(20 Hz)和幅度分辨率(1 dB)较低,仅能提取出状态参数,但能在更宽范围的卫星仰角和运动方向下研究衰落对 LMS 信道影响.因此,为扩展模型参数数据库,本文采用以上两组实测数据提取的信道参数,建立一个适用于多场景窄带 LMS 信道模型,其参数定义为:

1) MiLADY SDARS 参数组. Loo 分布的传播参数和 Semi-Markov 链的状态参数均来自 SDARS 实测,称为 Model SDARS. 与卫星方位角有关的运动方向为  $0^\circ \sim 360^\circ$ .

2) MiLADY SDARS Loo-&GNSS 状态参数组. 将 SDARS 实测提取的传播参数与 GNSS 实测提取的状态参数结合,生成不同场景的时间序列,称为 Model GNSS. 4 种不同间隔的方位角:  $0^\circ \sim 10^\circ$ 、 $10^\circ \sim 30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 60^\circ$  和  $60^\circ \sim 90^\circ$  及方位角  $0^\circ \sim 360^\circ$ .

1) 和 2) 均能描述 5 个不同环境(城市、城郊、森林(或乡村)、商业区和开阔地(或高速公路))和 8 个不同卫星仰角( $15^\circ, 25^\circ, \dots, 85^\circ$ ); 2) 还可描述 5 个不同间隔的方位角. 因此,可将参数组的每个实测条件定义为一个场景,共有  $5 \times 8 + 5 \times 8 \times 5 = 240$  个的场景,如采用 MiLADY SDARS Loo-&GNSS 状态参数组,可将城市环境,卫星仰角  $25^\circ$ , 方位角  $20^\circ$  作为一个场景.

## 2 窄带 LMS 信道模型

### 2.1 窄带 LMS 信道模型的结构

基于 MiLADY 实测的单卫星窄带 LMS 信道模型修正了通用的两状态 LMS 信道模型结构,见图 1.

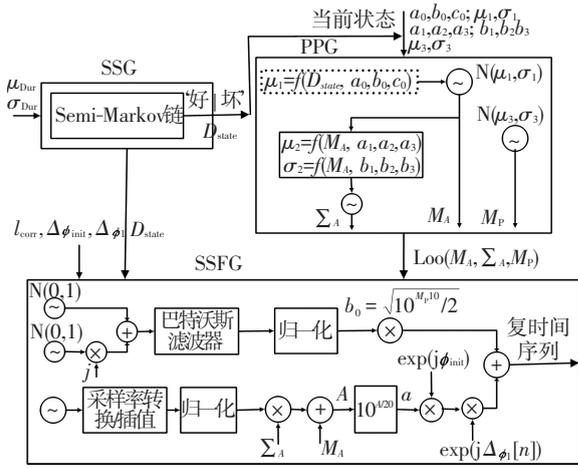


图 1 窄带 LMS 信道模型框图

为生成接收信号复包络的时间序列,图 1 中模型包含 3 个生成器:状态序列生成器 (state sequence generator, SSG)、传播参数生成器 (propagation parameter generator, PPG) 和小尺度衰落生成器 (small-scale fading generator, SSFG)。

### 2.2 基于 Semi-Markov 链的状态序列生成器

相比两状态 LMS 信道模型,SSG 的改进在

于:假设 SDPDF 服从对数正态分布, Semi-Markov 链根据状态持续长度控制状态之间的转移,弥补了一阶 Markov 链不能精确地描述状态持续时间统计特性的缺陷,且具有参数少和复杂度低的优点.信道模型能否代表衰落传播特性,依赖于状态概率的精确性.因此 Semi-Markov 状态模型的‘坏’状态概率  $p_b$  的精确性至关重要,它依赖于移动终端所处的环境、卫星仰角和运动方向,如图 2 所示.  $p_b$  随着卫星仰角的增加而降低,降低趋势依赖于运动方向.相比卫星仰角,状态概率更大程度上取决于运动方向,  $p_b$  随着运动方向的增加而变大,一般将  $90^\circ$  视为最差情况,可为衰落抑制和系统设计提供信息.相比图 2 (b)、(d) 和 (e)、(a) 和 (c) 区域的  $p_b$  较高,运动方向  $90^\circ$  和  $0^\circ$  之间的偏差较大.当卫星仰角大于  $70^\circ$  时,运动方向对状态概率影响较小,且在城市环境中由于树阴影导致的阻塞概率较低使得  $p_b$  小于城郊和森林环境.同时,仅在城市环境中的运动方向  $0^\circ \sim 360^\circ$  下, Model SDARS 和 Model GNSS 有相似的结果,而在森林和开阔区域, Model SDARS 较 Model GNSS 低。

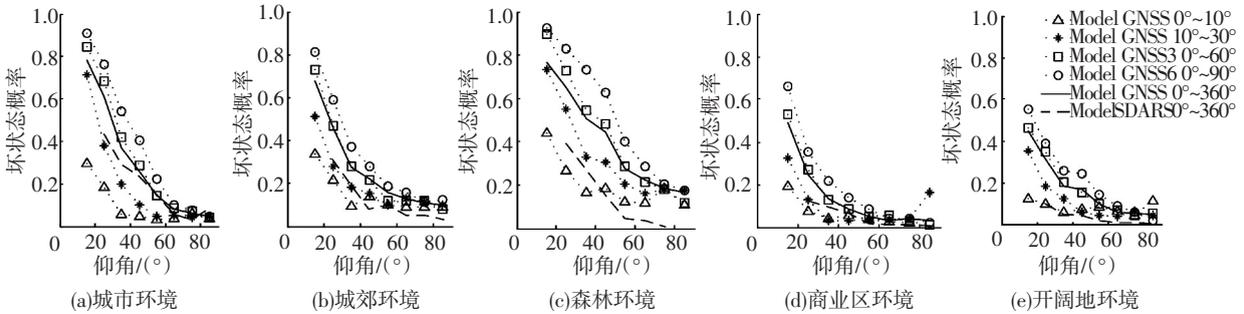


图 2 不同环境下‘坏’状态的概率

### 2.3 传播参数生成器

当进入新状态时,根据当前状态及移动终端的接收环境,由相应的联合分布函数更新传播参数。

$$\begin{cases}
 f(M_A) \sim N(\mu_1, \sigma_1), f(\sum_A | M_A) \sim N(\mu_2, \sigma_2), \\
 \mu_2 = a_1 \times M_A^2 + a_2 \times M_A + a_3, \\
 \sigma_2 = b_1 \times M_A^2 + b_2 \times M_A + b_3, \\
 f(M_P) \sim N(\mu_3, \sigma_3).
 \end{cases}
 \quad (1)$$

式中:  $N(\cdot)$  为高斯分布,  $M_A$ ,  $\sum_A$  分别为对数正态分布均值和标准偏差,  $M_P$  为多径分量的平均功率,均以 dB 为单位.系数  $\mu_i, \sigma_i, a_i, b_i$  取决于环境类型、卫星仰角和方位角<sup>[14]</sup>。

在城市环境,卫星仰角  $45^\circ$ ,运动方向  $20^\circ$

下,图 3 给出 Loo 分布的传播参数.图 3 表明多径衰落对接收信号影响较小,而阴影遮蔽效应严重.同时表明建立信道模型具有可变的传播参数.图 4 分别给出对数正态分布的均值与‘好’、‘坏’状态持续时间的关系。

图 4 分别表明对于不同的状态持续长度,‘好’状态的均值变化较小,而‘坏’状态的均值在较大范围内波动.因此,可通过状态持续长度修正‘坏’状态时均值的高斯分布来避免长期深度衰落

$$\begin{aligned}
 f(M_A) &\sim N(\mu_1, \sigma_1), \\
 \mu_{11 \text{ bad}} &= a_0 + b_0 \cdot c_0^{-D_{\text{state}}}.
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

结合图 4 (b),式 (2) 的衰减指数修正了‘坏’状态的持续时间。

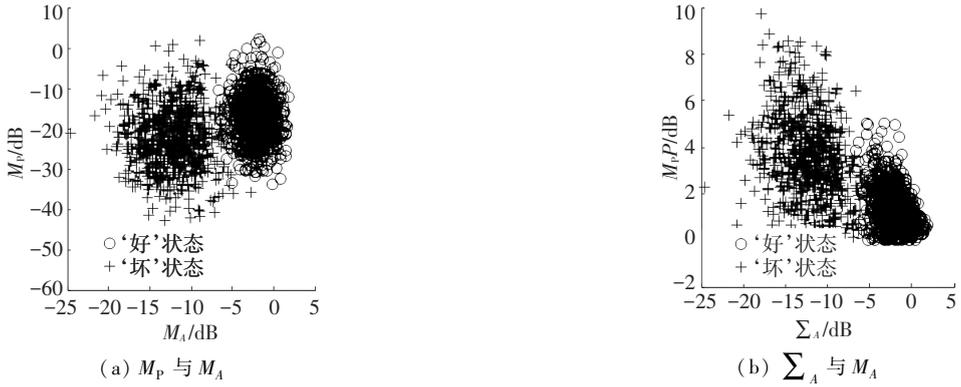


图 3 Loo 分布的传播参数

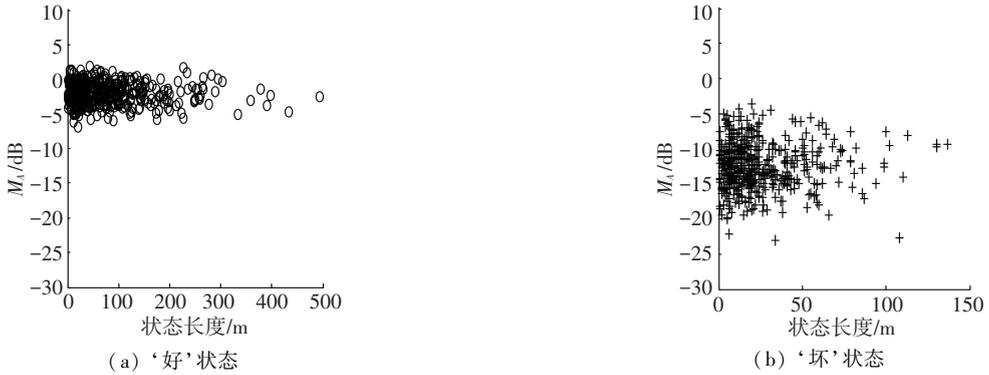


图 4  $M_A$  与状态持续时间的关系

2.4 小尺度衰落生成器

根据当前状态持续时间和 Loo 分布的传播参数, 在 SSFG 中输出 C/N 的时间序列, 包含慢变和快变信号成分, 其实现过程见图 1. 相比通用的两状态 LMS 信道模型, 该 SSFG 先对采样值进行三次样条插值提高其采样率并归一化处理得到零均值单位方差的采样序列, 且经过非线性变化得到服从对数正态分布的序列  $a$ . 然后, 引入与运动方向有关的多普勒频移  $\Delta\phi_1[n]$ , 扩展该模型的使用场景.

在窄带 LMS 信道模型中, 每一状态持续时间内信号包络  $r$  的概率密度函数服从 Loo 分布,

$$f_R(r) = \int_0^\infty f_{R|z}(r|z)f(z)dz = \frac{r}{b_0\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \frac{1}{z} \exp\left[-\frac{r^2+z^2}{2b_0}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(\ln z - u)^2}{2\sigma^2}\right] I_0\left(\frac{rz}{b_0}\right) dz. \quad (3)$$

式中:  $b_0 = \sqrt{10^{M_P/10}}/2$ ,  $I_0(\cdot)$  是第一类零阶修正的贝塞尔函数,  $u = M_A/8.686$ ,  $\sigma = \Sigma_A/8.686$ . 在各种场景下分析 C/N 的一阶统计特性, 并验证信道模型的准确性.

3 仿真分析

为验证所建的窄带 LMS 信道模型在不同场

景下的准确性和适用性, 在不修改模型结构的前提下, 仿真分析信道模型输出的时间序列的一阶统计特性, 并与 SDARS 实测及 DVB-SH 参考模型比较. 由于 L 波段和 S 波段之间的频带仅影响快衰落特性, 对状态参数的影响可以忽略, 因此仿真系统采用 S 波段. 仿真参数设置为: 移动终端速度 50 km/h, 快衰落采样率为八分之一波长, 慢衰落相关距离  $l_{corr} = 2$  m. 巴特沃斯低通滤波器的通带和阻带的归一化截止频率分别为 0.225 和 0.75. 对于单卫星接收系统, MiLADY 模型的两个参数组分别是: SDARS 测试提取的传播参数及 SDARS 或 GNSS 测试提取的 Semi-Markov 链的状态参数.

3.1 载噪比的一阶统计特性

在城郊环境中, 卫星仰角分别为  $35^\circ$ 、 $55^\circ$  和  $75^\circ$  下, 图 5 给出该模型一阶统计特性, 即输出载噪比时间序列小于给定门限的概率, 并与文献 [14] 中 DVB-SH 参考模型比较, 其卫星仰角分别为  $40^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $80^\circ$  及 SDARS 实测比较.

从图 5 中可看出: 在低仰角和高方位角下, 视距分量被严重遮蔽导致接收信号包络受到深度衰落, 如  $35^\circ$  仰角,  $75^\circ$  方位角下,  $C/N < -10$  dB 的概率约为 0.2. 采用 Model SDARS 参数组, 仿真结果与 SDARS 实测拟合地很好表明该参数组能正确地估计出状态参数及传播参数. 采用 Model

GNSS 参数组, 信号的有效性随运动方向的增加而降低, 运动方向为 90° 时, 传播环境对 LMS 信道影响最严重. DVB-SH 参考模型在卫星仰角 40° 时与 SDARS 实测相似. 图 5(b)、(c) 中, DVB-SH 参考模型与 LMS 信道模型之间的偏差可能是由测试位置的差异引起的.

### 3.2 信号余量

为全面分析 MiLADY 窄带 LMS 信道模型的衰落特性, 有必要在各种场景下研究满足某一给定信号有效性时所需的余量. 假设信号的有效性为 90%, 结合载噪比时间序列的累积分布函数, 所需余量为 LoS 电平(0 dB)与 CDF 等于 0.1 相应的

C/N 之间的差值. 分别在城市、城郊、森林、商业区和开阔地, 卫星仰角 25°, 35°, …, 85° 下采用两个参数组分析信号余量, 如图 6 所示.

信号有效性取决于移动终端所处的环境、卫星仰角和运动方向. 图 6 表明 5 种不同环境中, 给定信号有效性时, 城市环境所需 C/N 较高. 采用 Model SDARS 参数组的仿真结果与 SDARS 实测高度一致, 因此采用该参数组的 MiLADY 信道模型能有效地代表 SDRAS 实测场景. 采用 Model GNSS 参数组的仿真结果表明单卫星 LMS 信道模型所需的信号余量随运动方向的增加而增加.

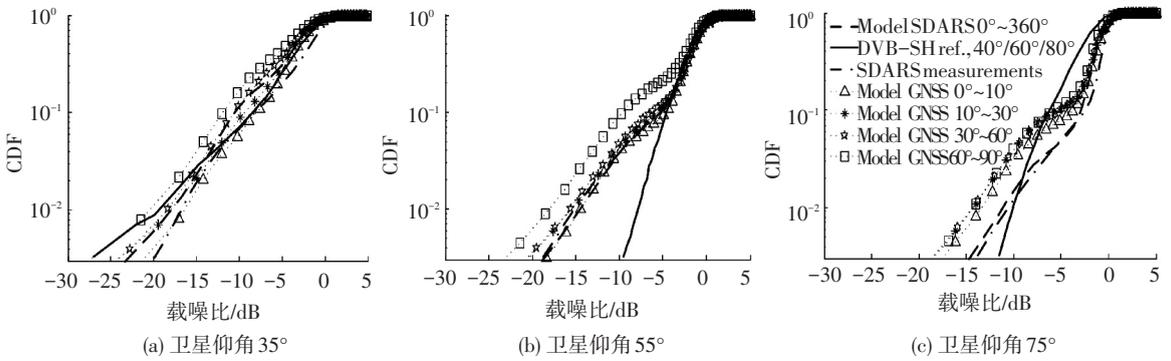


图 5 城郊环境不同仰角下的 CDF

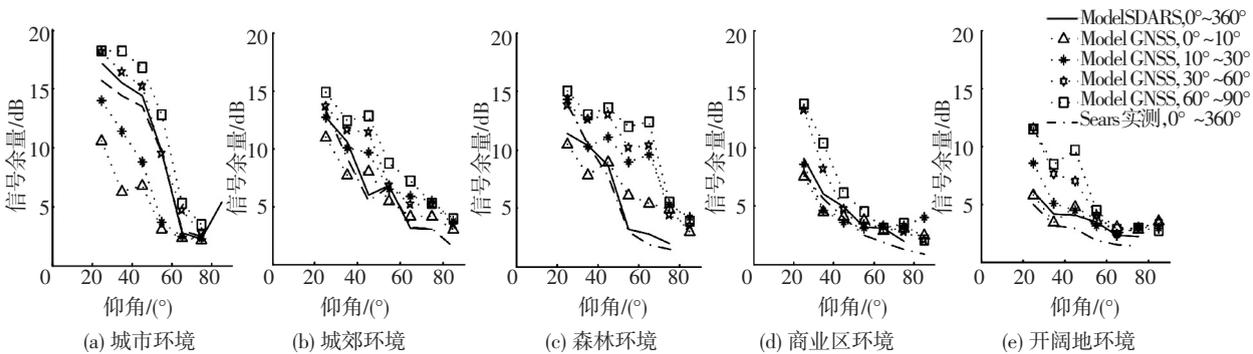


图 6 90% 信号有效性时所需的余量

## 4 结 语

本文基于 MiLADY 项目的两组实测数据提取的模型参数, 在多场景下研究窄带 LMS 信道模型. 相比通用的两状态 LMS 信道模型, 该模型采用 Semi-Markov 链实现‘好’、‘坏’状态之间的转移. 同时, 在生成对数正态分布之前进行样条插值并修正其均值, 且引入多普勒频移, 降低深度衰落持续时间并使依赖于运动方向的研究成为可能. 仿真结果表明: MiLADY SDARS 参数组与 SDARS 实测的一阶统计特性一致, 能有效地代表 SDARS 实测场景. 而采用 MiLADY SDARS Lo-GNSS 参数组, 信号衰减较 SDARS 实测大, 但能

代表更多的阴影场景, 尤其是窄街道和阴影较高的区域. 同时, 接收信号的质量由环境类型、卫星仰角和方位角共同决定. 对单卫星窄带 LMS 信道模型的研究可进一步扩展到多卫星信道模型的建立和角度分集及时间分集等系统性能分析中. 该模型是否能有效地代表我国信道环境的阴影条件值得深入研究, 但却受限于我国匮乏实测数据, 但本文对国外实测数据的研究可为国内开展这方面的研究提供参考依据.

## 参 考 文 献

[1] KING P R, BROWN T W C, KYRGAZOS A, et al. Empirical-stochastic LMS-MIMO channel model

- implementation and validation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(2): 606-614.
- [2] BURKHARDT F, EBERLEIN E, JAECKEL S, et al. MIMOSA - a dual approach to detailed land mobile satellite channel modeling [J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2014, 32(4): 309-328.
- [3] NEIRA A I P, IBARS C, SERRA J, et al. MIMO channel modeling and transmission techniques for multi-satellite and hybrid satellite-terrestrial mobile networks [J]. Physical Communication, 2011, 4(2): 127-139.
- [4] VILLACIEROS B M, OESTGES C, VANHOENACHER J D, et al. Review and update of mobile data processing for the land mobile satellite channel modeling [C]// Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Barcelona, Spain; IEEE, 2010: 1-4.
- [5] 张嘉铭, 杨明川, 郭庆. 宽带频率选择性卫星移动通信仿真模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(7): 46-50.
- [6] CERDEIRA R P, SCHUBERT F, PEREZ R O. Flexible statistical multipath and shadowing model for land mobile satellite navigation [C]// Proceedings of 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Prague; IEEE, 2012: 2436-2439.
- [7] LUTZ E. Modelling of the satellite communications channel - with emphasis on the land mobile satellite channel [C]// Proceedings of the First AESS European Conference on Satellite Telecommunications (ESTEL). Rome; IEEE, 2012: 1-7.
- [8] MILOJEVIC M, HAARDT M, EBERLEIN E, et al. Channel modeling for multiple satellite broadcasting systems [J]. Broadcasting, 2009, 55(4): 705-718.
- [9] ARNDT D, IHLOW A, HEYN T, et al. State modelling of the land mobile propagation channel for dual-satellite systems [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012(1): 1-21.
- [10] MILOJEVIC M, HAARDT M, EBERLEIN E, et al. Channel state modeling for single and multiple satellite broadcasting systems [C]// Proceedings of International Workshop on Satellite and Space Communications (IWSSC). Toulouse; IEEE, 2008: 102-106.
- [11] 陈秀廷, 段少华, 张乃通. 三状态信道模型在卫星移动通信系统中的应用研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1998, 30(1): 91-94.
- [12] FONTAN F P, VAZQUEZ C M, CABADO C E, et al. Statistical modeling of the LMS channel [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2001, 50(6): 1549-1567.
- [13] LOO C. A statistical model for a land mobile satellite link [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1985, 34(3): 122-127.
- [14] CERDEIRA R P, FONTAN F P, 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, 28(5-6): 291-315.
- [15] EBERLEIN E, HEUBERGER A, HEYN T. Channel models for systems with angle diversity-the MiLADY project [C]// Proceedings of ESA Workshop on Radiowave Propagation Models, Tools and Data for Space Systems. ESTEC Noordwijk, the Netherlands; [s.n.], 2008.
- [16] ARNDT D, IHLOW A, HEUBERGER A, et al. Land mobile satellite channel characteristics from the MiLADY project [C]// Proceedings of the 10th Workshop Digital Broadcasting. Ilmenau, Germany; [s.n.], 2009: 49-55.
- [17] ARNDT D, IHLOW A, HEUBERGER A, et al. Mobile satellite broadcasting with angle diversity-performance evaluation based on measurements [C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). Shanghai, China; IEEE, 2010: 1-8.
- [18] HEYN T, EBERLEIN E, ARNDT D, et al. Mobile satellite channel with angle diversity: the MiLADY project [C]// Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Barcelona, Spain; IEEE, 2010: 1-5.
- [19] ESA telecommunications & integrated applications. MiLADY-mobile satellite channel with angle diversity [EB/OL]. (2012-02-01) [2013-10-15] <http://telecom.esa.int/telecom/www/object/index.cfm?fobjectid=29020>.
- [20] ARNDT D, IHLOW A, HEUBERGER A, et al. QoS prediction for mobile satellite broadcasting with angle diversity based on measurements [C]// Proceedings of International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). Nuremberg; IEEE, 2011: 1-8.