

周顺, 林红磊, 王茂磊, 等. 卫星导航信道模型综述[J]. 电波科学学报, 2020, 35(4): 504-514. DOI: 10.13443/j.cjors.2020041501
ZHOU S, LIN H L, WANG M L, et al. A survey of satellite navigation channel models[J]. Chinese journal of radio science, 2020, 35(4): 504-514. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2020041501

卫星导航信道模型综述

周顺^{1,2} 林红磊¹ 王茂磊³ 唐小妹¹ 欧钢¹

(1. 国防科技大学电子科学学院, 长沙 410073; 2. 国防科技大学第六十三研究所, 南京 210007;
3. 北京卫星导航中心, 北京 100094)

摘 要 卫星导航信道具有宽带、时变和城区复杂多径等特征, 为了能够充分挖掘、有效预测和评估全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的性能, 需要对各种环境中的卫星信道进行测量和建模研究, 文中主要讨论了卫星导航信道的测量和建模及其研究进展。首先给出了信道建模的方法和与卫星导航相关的测量活动的汇总, 然后讨论比较了几种常见的卫星导航信道模型, 最后探讨了卫星导航信道建模面临的挑战以及未来的研究重点。

关键词 卫星导航; 信道模型; 信道测量与建模; 陆地移动卫星; 传播特性

中图分类号 TN967.1

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2020)04-0504-11

DOI 10.13443/j.cjors.2020041501

A survey of satellite navigation channel models

ZHOU Shun^{1,2} LIN Honglei¹ WANG Maolei³ TANG Xiaomei¹ OU Gang¹

(1. College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. The 63rd Research Institute, National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China;
3. Beijing Satellite Navigation Centre, Beijing 100094, China)

Abstract Satellite navigation channel has the characteristics of broadband, time-varying, complex multipath in urban, etc. In order to practically enhance, effectively predict and evaluate the performance of Global Navigation Satellite System(GNSS), it is necessary to measure and model the satellite channel in the challenging environment. This paper mainly discusses the measurement and modeling of satellite navigation channel and its research advances. It summarizes the research status of measurement activities, reviews the general methods of channel modeling and the summary of measurement activities related to satellite navigation, and discusses and compares several prevailing GNSS channel models. Finally, the challenge of satellite navigation channel modeling and the future research focus are discussed.

Keywords satellite navigation; channel model; channel measurements and modeling; land mobile satellite; propagation characteristic

引 言

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)通过轨道位置可精确测量的卫星发射的无线电测距信号, 向用户提供全天候、连续、实

时和高精度的定位、导航及授时(positioning, navigation and timing, PNT)服务。GNSS已成为世界各国国防和经济建设的关键基础设施。众所周知, 导航卫星的测距信号需要通过电磁波在星地之间传播, 用户和卫星之间的链路受到多径和阴影的影响,

收稿日期: 2020-04-15

联系人: 欧钢 E-mail: ougangcs@139.com

而多径又是 GNSS 中最主要的精度降级源之一,严重影响 GNSS 的服务可用性和质量。为了研究这一问题,在 GNSS 的设计、仿真和优化中,需要对复杂多变的星地无线信道用数学方法抽象地描述,从而形成适用于仿真评估的模型,即卫星导航信道模型或 GNSS 信道模型。无论是为了有效地预测和评估 GNSS 的性能,还是改进接收信号处理算法设计,能够真实地体现 GNSS 信号传播特性的信道模型都是必不可少的。

导航卫星是一种重要的陆地移动卫星(land mobile satellite, LMS),它的信道模型遵循 LMS 信道的传播特性,是宽带卫星信道模型的典型代表之一,具有宽带、时变和城区复杂多径等传播特征。多国研究机构进行了一些针对 LMS 信道和 GNSS 信道的测量活动,导出了描述用户和地球同步轨道(geosynchronous earth orbit, GEO)或非 GEO 卫星之间传输路径的信道模型。粗略地说,信道模型可分为窄带模型和宽带模型,前者通过对信号的乘法运算来描述信道,后者考虑了由延迟回波引起的信道行为的频率依赖。以 LMS 信道模型^[1-3]和 LMS 通信信道模型^[4-7]为主题的综述较多,但较少涉及 GNSS 信道模型^[8]。

为此,本文首先简要回顾了主要信道建模方法,总结了与卫星导航信道相关的测量活动,然后比较了几种常见的 GNSS 信道模型,分析了 GNSS 信道模型的应用现状,最后讨论了 GNSS 信道建模面临的挑战及今后的研究重点。

1 信道建模方法回顾

LMS 信道建模方法^[9]可以分为三大类:统计性方法、确定性方法和混合物理统计方法。统计性方法与确定性方法的主要区别在于准确性、通用性和计算负荷之间的权衡。直观上来说,统计性方法简化了计算,而确定性方法则用复杂电磁模型,通过增加计算资源达到精确逼近的目的。混合物理统计方法试图综合利用这两种方法的优点,同时消除其缺点。

1.1 统计性方法

统计性方法反映了信道的全局行为,它通过测量真实传播环境,归纳出信道的各种重要参数,如功率延迟扩展、多普勒扩展和角度扩展等概率密度分布,产生用于动态系统性能评估的时间序列。统计性方法对信道主要元素的行为做出许多物理假设,因此在使用统计性模型时不需要有关环境的详细信

息,而必须从实验数据中提取参数。因此,统计性方法代表经验回归方法和物理/确定性方法之间的中间阶段。

首先,常用来描述窄带衰落传播特性的统计性模型有:Loo 模型^[10]、Corazza-Vatalaro 模型^[11]和 Lutz 等人^[12]提出的窄带面向状态模型。其中,1985 年提出的 Loo 模型是第一个专门针对 LMS 信道的模型,其特点是适应范围较广,这使其具有很好的灵活性和多功能性。尽管如此,单一的窄带衰落模型仍然有一个明显的问题,直达信号被遮挡的情况经常出现,特别是在城市环境中,单一不变模型不能适应变化。因此,Lutz 等人提出了 LMS 信道的两状态马尔可夫(Markov)链模型,两种状态分别被定义为视距(line-of-sight, LOS)分量存在的“好”状态和不存在的“坏”状态,“好”状态的接收信号包络服从莱斯分布,“坏”状态的包络服从瑞利-对数正态分布,该模型被视为 LMS 信道面向状态模型的基础。此外,由 Perez-Fontan 等人^[13]提出的窄带三状态 Markov 链模型,与两状态模型只包括 LOS 和 NLOS(non line of sight)状态不同,第三种状态代表了主要由植被引起的较轻的阴影状态。还有学者提出时变阶 Markov 链模型^[14],以使状态持续时间是不断变化的。总的来说,面向状态的模型采用状态机产生阴影条件,当每个离散状态改变时,触发新的参数化衰落分布,以适应快衰落波动,其效果是获得了信号动态多功能性。总之,窄带衰落模型可以表示中等尺度和小尺度组合下总的衰减,具有计算简单有效的优点。

其次,在宽带通信或导航应用中,仅仅考虑窄带信道特性是不够的,多径幅度、相位、延迟和多普勒频移对信息传输或定位性能有很大影响,窄带模型并不适用。因此,一些学者引入了更高级的宽带模型。宽带信道建模的一种常见的方法是 Bello^[15]提出的宽平稳不相关散射(wide-sense stationary with uncorrelated scattering, WSSUS)假设。WSSUS 采用线性时变滤波器表征宽带信道传输特性,为宽带信道描述奠定了数学基础。Jahn 等人基于德国宇航中心(Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, DLR)在 1994 年实施的信道测量活动提出室外 LMS 信道模型^[16]。Perez-Fontan 等人^[17]在 Jahn 模型的基础上提出采用三态一阶 Markov 链的宽带面向状态 LMS 模型。总体而言,宽带面向状态统计性建模方法基本可适应卫星导航宽带时变的信道特性,且计算简便,但缺乏对环境的精确表示。

1.2 确定性方法

确定性方法的目标是复现真实场景,通过物理电磁模型表示电磁波与本地环境的交互作用。得益于过去几十年以来计算工具的快速进步,确定性方法已被认为具有可行性。

确定性方法分为全波方法和渐近方法。全波方法是直接基于麦克斯韦方程解,它的限制性假设较少,由于需要大量的计算资源,且适用面积受限于几十个波长,不适用于大面积区域,主要用于天线设计或小型物体的雷达散射截面计算,不适合街道或城市规模。渐近方法不能解决电磁环境细节问题,需要在某些假设下使用,但它可以考虑更大尺度的环境。目前,渐近方法中,基于物理光学(physical optics, PO)和一致性绕射理论(uniform theory of diffraction, UTD)的射线跟踪^[18](ray-tracing, RT)方法被广泛应用。Dottling 等人^[19]提出基于 RT 的 LMS 信道模型,该模型能够模拟卫星和移动台的运动以及多重可见性的影响。文献^[20]提出了对该模型的进一步扩展,将二维 RT 模型扩展为更加准确的三维模型。Sofos 等人^[21]提出了另一个简单且计算高效的 RT 模型。

综上所述,考虑到准确性和计算可实现性,以 RT 方法为代表的渐近方法仍然是最佳方案。但从接近现实的角度评价,渐近方法仍缺乏环境建模的准确性,为了得到精确的结果,必须根据几何形状和材料精确地表示环境。对环境高逼真建模还存在许多现实的技术问题:一是因为不同表面材料导致的散射效应不同,需要对种类繁多的材料进行细致的测量,结果可能还不具有通用性,可操作性不强;二是环境几何描述要达到与真实世界一致也是非常困难的,对粗糙表面、异构面测量的误差控制和大范围建模复杂度等方面存在的许多技术和可行性问题;三是环境的描述越精确,计算的复杂度越大,如何合理又计算高效地对环境高逼真建模也是一个难点。

1.3 混合物理统计方法

每种混合物理统计方法都是基于统计和确定性建模之间的特定平衡。Oestges 等人^[22]在 2000 年引入了首个混合模型,提出了低轨卫星通信系统信道建模的具体方法。King^[23]提出了多输入多输出

(multiple-input multiple-output, MIMO) LMS 信道模型。Lehner 建立了卫星导航多径信道模型^[24],用于各种环境下行人和车辆的卫星导航。该模型由国际电信联盟标准化。由 Abele 等人^[25]引入的卫星通信系统窄带 LMS 信道模型和模拟器,基于模块化方法,允许用户选择准确度水平。

总之,混合物理统计方法是一种平衡性很好的方法,它利用统计数据来优化计算时间,同时使用电磁物理模型或测量调整来保持近似于实际结果。与确定性方法相比,混合方法足够准确,并且计算时间大大减少。

2 卫星导航信道模型

2.1 测量活动及信道建模进展

信道测量活动是以萃取信道参数、建立或验证信道模型为主要目的的科学研究活动,其提供的各种真实环境下的测量数据是经验和统计性信道建模的必要前提。信道测量也是检验信道模型合理性的比对手段。大多数测量活动都集中在窄带信道的特性测量上。卫星导航信道测量研究已有二十多年的历史,由早期的窄带测量迅速发展到宽带测量,测量仰角从单个方向发展为多个方向,测量场景从室外扩展到室内,信道特征参数则从多径时延域参数,发展到时延域与方向域联合特征参数。

近年来,包括欧洲空间局(European Space Agency, ESA)、DLR、法国航天局(French Centre National d'Etudes Spatiales, CNES)、法国宇航实验室(Le centre français de recherche aérospatiale, ONERA)、奥地利 JOANNEUM 研究中心、英国萨里大学、加拿大卡尔加里大学、芬兰奥卢大学、捷克理工大学、西班牙马德里理工大学、西班牙维戈大学和法国国立高等航空航天学院(Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, ISAE)在内的一些研究机构已经在不同频段、不同场景、采用不同测量方式开展了大量 GNSS 和/或 LMS 信道特性测量研究,国内上海交通大学等也已开始了类似的研究。这些测量活动各有侧重,一些与卫星导航信道相关的测量活动及相关指标汇总在表 1 中,相应的参考文献也列在表中。

表 1 与卫星导航信道相关的测量活动汇总

Tab. 1 Summary of measurement campaigns related to satellite navigation channel

研究机构	时间和地点	场景	频段和频率/ GHz	带宽/ MHz	指标和特色	信号源和测量系统
DLR Jahn ^[26]	1994 年,德国和英国	6 种场景	L 波段 1. 82	窄带 宽带 30	10 m 空间分辨率,CDMA 扩频,具有干扰测试	飞机,扫频时延交叉相关宽带信道探测器 CSPE1800
英国萨里大学 ^[27]	1995 年,英国吉尔福德	城市、郊区、开阔公路、重树荫和轻树荫	L/S 波段 1. 54~1. 56/ 2. 315~2. 335	宽带 20	100 ns 延迟分辨率,动态范围 30 dB	直升机,扫频时延交叉相关宽带信道探测器
马德里理工大学 ^[28]	1998 年,西班牙马德里	城市、郊区、农村、森林	GPS L1	宽带	提取幅度和相位形成 Markov 链模型	GPS 卫星,GPS 接收机
DLR Steingass ^[29]	2002 年,德国慕尼黑黑地区	郊区、城市中车辆与行人应用	L 波段 1. 46~1. 56	宽带 100	10 ns 延迟分辨率,使用确定性和随机过程来模拟人工场景中动态用户的时变信道冲击响应	飞艇,Medav 公司信道探测仪
JOANNEUM ^[30-31] (SATNEx 项目)	2002—2003 年,奥地利格拉茨和维也纳	卫星到室内、机场	S 波段 1. 995	宽带 100	混合物理统计建模	直升机,SIMO 信道探测仪
DLR Jost ^[32]	2008 年,德国奥伯法芬霍芬	卫星到室内	L/C 波段 1. 51/5. 2	宽带	5 W 功率 OFDM 信号	移动式起重机高架平台,Medav RUSK 信道探测仪
捷克理工大学 ^[33-34]	2008—2012 年,捷克布拉格	卫星到室内、植被衰减	L/C/S 波段	窄带	左旋圆极化连续波信号,建筑物穿透损失测量	遥控飞艇,自制的连续波信号发生器 R&S PR100 便携无线电监测接收机
ESA ^[35] (MiLADY 项目)	2008—2009 年,美国东海岸和德国埃朗根	5 种环境	L/S 段 1. 575/2. 3	窄带	两种卫星,通过摄像机记录的图像来区分环境	S-DARS 卫星和 GNSS 卫星,自制的基于 FPGA 的采集设备
CNES 和 ISAE ^[36]	2011 年,法国图卢兹	城市环境	GPS L1	宽带 68	采集真实 GNSS 信号,I/Q 四位量化	GPS 卫星,BGM 数字化信道仪
加拿大卡尔加里大学 ^[37]	2011 年,加拿大卡尔加里	城市峡谷	GPS L1	宽带	利用 GNSS 信号进行多径测量	GPS 卫星,带有战术级 UIMU-LCI 惯性传感器的 NovAtel SPAN 系统
芬兰奥卢大学 ^[38]	2016 年,芬兰	林荫道路	GPS L1	宽带	基于极化的反射研究	GPS 卫星,采用右旋和左旋圆极化天线以及软件的接收机
上海交通大学 ^[39]	2015—2017 年,上海陆家嘴	城市峡谷	BDS B1 GPS L1	宽带	利用 GNSS 信号进行多径测量	GPS 和北斗卫星,宽带 GNSS 中频数据采集平台

基于宽带信道测量,许多 GNSS 宽带信道模型被开发出来. 这些模型模拟不同情况下 GNSS 信道的时变响应:例如,适用于航空^[40]、城市^[17,24,41]和郊

区^[42]场景、行人^[43]和室内^[44]应用的一些模型. 以下是该领域内的一些重要或较新研究成果.

DLR 从 20 世纪 90 年代就开始进行宽带 LMS

信道的测量和研究。

1996 年,DLR 的 Jahn 等人发表了码分多址 (code division multiple access, CDMA) 扩频卫星通信信道特性的测量和建模研究成果^[16],建立了抽头延迟线 (time delay line, TDL) 结构的宽带信道模型。研究表明,由于周围环境的反射作用,接收到的多个信号回波中,大多数回波延迟小于 600 ns,包络服从瑞利分布,延迟呈指数衰减。

2002 年,为了辅助评估 Galileo 系统的候选信号,DLR 开展针对卫星导航多径信道的测量活动。2004 年的统计结果^[45]揭示了建筑物反射的短延迟回波具有指数衰减性质,但同时又具有明显的成簇效应。此外,还证明了回波不太可能出现在 15 ns 之前。对于导航应用来说,短延迟回波特性的研究非常重要,必须在设计新的系统和接收机时充分考虑该特性。

2005 年,Lehner 等人^[46]提出了新的 LMS 导航多径信道模型,该模型是基于混合物理统计的信道建模方法。具体来说,就是综合测量的统计数据和一个人工场景进行建模,人工场景被用于 LOS 路径建模,包括因屋顶遮挡造成的阴影效应、树木遮蔽和路灯折射等;与此同时,该信道模型的散射体由测量得到的数据驱动生成。值得一提的是,该模型成为 ITU-R P. 681-7^[47]建议书的一部分。

DLR 的 Jost 等人建立了卫星到室内的卫星导航信道模型^[44,48],该模型能够再现用于移动接收器的宽带传播信道的空间特性。该模型也是基于混合建模方法,已被纳入 ITU-R P. 681-10^[49]建议书中。ITU-R P. 681 建议书的最新版本为 ITU-R P. 681-11^[50],该版本的名称有所变化,体现了对 LMS 包括导航卫星的涵盖。

总之,DLR 在 GNSS 信道模型方面的研究取得了一系列重要成果,拓展了对 GNSS 信道特性的认识,提供了实用的评估模型,但其存在的问题是使用模拟卫星平台,如飞机、飞艇和吊车,都很难完美模拟卫星运动状态,验证的频段也没有完全覆盖 GNSS 的全部频段。

2012 年,Ait-Ighil 等人在移动卫星通信和导航的背景下提出了三分量模型^[51-52]。它是一种简化的建筑物电磁散射模型,其原理是将复杂立面的散射函数划分为三种不同的机制:镜面反射、后向散射和非相干散射。镜面反射发生在平滑的和宽的表面

上,如平坦的墙壁或窗户。非相干散射分量来自复杂外立面上存在粗糙表面和小元素。后向散射来自在阳台或窗户等突出和内凹角落发生的二次反射。

2013 年,Ait-Ighil 在其博士论文^[36]中详细讨论了 LMS 信道建模问题,并针对移动应用解决城市环境中信道损伤的具体问题,特别关注多径建模和宽带表示,提出了一种新的 LMS 信道模拟器,即城市导航的简化信道 (simplified channel for urban navigation, SCHUN),它基于混合物理统计方法,以满足多功能性、准确性和快速计算的要求。此外,SCHUN 已由涉及卫星通信和卫星导航应用的两个测量活动进行了验证。

2015 年,加拿大 Calgary 大学的 Xie 等人^[37]采用真实的 GNSS 信号来测量和表征城市峡谷地区的多径分布。

2015 年至 2017 年,上海交通大学研究小组^[39,53]在上海陆家嘴地区开展了一系列测量活动,期望通过在现场采样 GNSS 数据中提取多径信号并分析其参数的变化,提出基于真实信号可以推导出多径模型的方法,但由于 GNSS 信号过于微弱,其方法的精确度还值得推敲。

最后,从卫星导航信道参数测量方式来看,依据信号的来源大致可分为模拟卫星信号源和真实卫星信号源两种方式。前者利用飞机、飞艇、直升机等平台模拟不同的卫星入射角,发射专门的信道探测信号,在地面用信道探测仪采集分析信号,好处是信号功率大,接收处理得到的信道参数比较准确,不足之处在于模拟平台的动态或运动轨迹不同于卫星,可能在多径生灭过程建模效果上与真实情况不一致;后者采用真实的卫星导航信号作为信号来源,好处是与卫星传输的动态和方向效应一致性较强,但是由于卫星导航信号本身十分微弱,想要萃取得到比较精确的多径参数十分困难。总而言之,信道参数测量方式对建模的精度和一致性有重大影响。

2.2 信道模型比较

下面从建模方法、适用场景和应用、适用频段、带宽、应用成熟度和对应的测量活动等方面对几种代表性的卫星导航信道模型进行汇总,如表 2 所示。表中适用频段的具体数值以发表文献中的描述为准,如果没有给出具体数据则给出信道测量的频段作为参考。表中的成熟度评价是指该信道模型实用化或标准化的状态。

表 2 代表性卫星导航信道模型比较

Tab. 2 Comparison of representative satellite navigation channels

信道模型	建模方法	适用场景和应用	适用频段 带宽/MHz		应用成熟度	对应的测量活动
DLR 多径信道模型 ^[46-47]	混合物理统计方法	郊区和城市环境,车辆与行人应用	1~2 GHz	100	ITU 标准化模型	2002 年,德国
DLR 室内信道模型 ^[44,49]	混合物理统计方法	卫星到室内,静态卫星与移动接收机,在典型办公环境中面向外部的房间	1~2 GHz	100	ITU 标准化模型	2008 年,德国
SCHUN 模型 ^[36]	混合物理统计方法	兼顾卫星通信和导航密集城市环境	L\ S 波段	68	自研信道模拟器	2011 年,法国
Fontan 模型 ^[17]	统计性方法	适用于窄带和宽带条件,以及 GEO 和非 GEO 卫星下的 LOS、中等阴影和深度阴影环境	L\ S 波段	20	时间序列生成模型,能够产生振幅、相位、瞬时功率延迟分布、多普勒频谱等	1995 年,英国
Jahn 模型 ^[16]	统计性方法	适用于窄带和宽带条件,应用 CDMA 传输体制的通信和导航卫星系统	L 波段	30	TDL 模型,具备直射、短距回波和长距回波模型参数	1994 年,德国和英国

DLR 多径信道模型从 2002 年开始测量活动,到 2009 年该模型纳入了 ITU 建议书中,其目的是逼真和精确建模 GNSS 应用中的多径传播效应。它采用混合物理统计方法建模,将接收机和信道动力学之间的关键关联考虑在内。为了建模多径分量,模型在遵循经验似然分布的位置上创建了随时间变化的反射体,产生的回波功率、带宽、莱斯系数和寿命遵循实地测量的统计数据。可通过 <http://www.kn-s.dlr.de/satnav/> 下载该模型的免费版本 Matlab 代码。DLR 室内信道模型同样采用混合物理统计方法进行建模,可以在 ITU 网站上下载该模型的 Matlab 代码。SCHUN 模型可计算城市峡谷中接收机运动时宽带参数,由于信号载波频率可以在 L 波段或 C 波段调谐,因此它专门用于 GNSS 和 LMS 系统的测试。此外,混合物理统计的实现方式优化了精度和计算资源之间的平衡,得以进行几乎实时的信道仿真。Jahn 模型和 Fontan 模型采用经典的统计建模方法,但相对来说不太适合高精度和大带宽的需求。

通过对比可知,一方面,现有的模型研究取得了一些阶段性的成果,其中有部分模型成为 ITU-R 建议书的一部分,有许多特点值得一提:在适用场景和应用上,能够提供郊区、城市和室内等各种场景,具备城市峡谷和室内等存在复杂多径的恶劣环境支持;在建模方法上,除早期的模型使用统计性建模方法外,较新的模型多采用混合物理统计方法,UTD

和 RT 等确定性建模方法发挥了重要作用;在测量验证上,所有模型都有对应的测量活动进行的验证,符合 L 波段 GNSS 的要求。

另一方面,现有模型也存在一些不足之处和问题:在频段支持上,多数模型仅考虑 L 波段的适用,而考虑到未来 GNSS 的演进,可能会扩展到 S 和 C 波段,因此非常需要了解其信道特性并建立适用的信道模型;在天线支持上,除了 SCHUN 模型支持波达方向信息外,大多数模型没有考虑多径分量的空域角度扩展,卫星导航中使用的多径缓解、抗干扰和抗欺骗重要技术之一就是接收机侧使用天线阵列,这必然会限制天线阵列使用信道模型进行性能评估;在极化支持上,极化特性已经被应用于 GNSS 天线和射频系统中,现有的模型并不能真实地刻画信道的极化特征;在场景全面性上,现有模型覆盖的场景并不全面,因此需要对模型场景进行合理准确的归类,而此项工作在已有的研究中并没有得到重视;在频率依赖关系上,GNSS 大多有多个频段^[54],从信道的角度,多个频段之间是否具有相关性,可否采用统一的模型刻画都是值得研究的问题。

3 卫星导航信道模型的应用现状

传统的 GNSS 多径模型只考虑镜面多径,将散射多径视为附加的噪声通道^[55-57]。文献中提出的多径研究一般基于乐观假设,例如,假设静态双路径信道或具有瑞利或 Nakagami-m 分布的衰落信

道^[58-59]。文献[60]在 DLR 的 LMS 多径信道模型下分析不同多径缓解技术的性能。文献[61]也采用了 DLR 信道模型来评估窄相关器、双 Delta 和后验多径估计技术在城市环境中的性能。近年来还有学者对特定的场景信道模型下的卫星导航定位性能进行了研究,如 GNSS 铁路定位性能评估^[62]、标准化道路场景 GNSS 接收机定位性能评估^[63]。文献[64]采用 DLR 信道模型对 BPSK、BOC(1,1)和 CBOC 信号进行分析,同时考虑三种类型的接收机信号处理算法,包括窄相关器、最大似然估计器和贝叶斯最小均方误差估计器,结果证实了新型导航信号和先进缓解技术的优势。Steingass 等人^[65]利用 DLR 信道模型评估了不同的经典信号和高级信号,发现宽带信号鲁棒性和准确性之间的冲突,提出了一种改进的用于鲁棒城市导航的方法;并指出在 LOS 和阴影混合环境中,粒子接收机明显优于经典的延迟锁相环接收机。

此外,文献[66]用基于 Markov 过程的双态 LMS 信道模型对城市信道进行建模,然后利用帧差错率分析解码性能,验证了 B-CNAV1 消息的非二进制低密度奇偶校验(low density parity check, LDPC)码的良好纠错性能,以及城市条件下两种消息中交织的有效性。Roudier^[67]分析了码移键控(code shift keying, CSK)调制和 LDPC 码在 Prieto 传播信道模型以及 DLR 信道模型条件下的解调解码性能。Garcia-Pena 等人^[68]采用 Perez-Fontan 的 LMS 信道模型^[69]分析了城市环境下不同 CSK 结构与不同解调/解码方法的耦合解调性能。在卫星导航信道模型的实际应用方面,思博伦公司的 GNSS 仿真系统中 simGEN 和 sim3D 软件结合了最新的 GNSS 仿真器和高级 GNSS 传播模型,支持在完全可自定义的环境中进行测试。

近年来 GNSS 信道模型受到高度关注,因为基于信道模型的仿真技术是有效改善 GNSS 接收机设计及算法开发的关键基础技术之一。在仿真的应用中存在一个明显的问题,利用模拟复杂城市环境的信道模型进行仿真会产生大量的多径分量,从而导致仿真计算时间开销巨大,如果将模型参数导入硬件模拟器实时仿真则会耗费大量硬件资源,有必要在尽可能保持信道模型对导航系统影响的前提下,用最优化的方法减少信道冲击响应的数量。

在实际应用中,应综合考虑具体的环境条件,并应有针对性地选择最有效的信道模型,使所用模型在满足需要的前提下,具有简单、标准的输入和输出,

尽可能逼真且用途广泛,并能快速计算。当然,随着研究的进一步深入,必定会出现更为高效的信道模型,充分发挥基于信道模型的仿真系统低复杂性和高精度的优势,为 GNSS 的设计和规划提供更科学的依据。

4 挑战与展望

本文介绍了卫星导航信道模型的现状和发展,总结了卫星导航相关的信道测量活动和现有的 GNSS 信道模型。近二十年来,ESA、CNES、DLR、ONERA 等研究机构开展了信道测量活动,提出了一些 GNSS 信道模型,这些研究工作采用先进的建模方法,基本上揭示了 L 波段城区和室内等恶劣环境,以及车辆和行人移动用户的本地多径效应的机理。本文通过对信道测量与建模研究成果的梳理,对现有的信道模型进行了比较分析,指明了它们的特点、不足之处和问题。最后,介绍了 GNSS 信道模型在性能测试评估中的应用现状。针对 GNSS 信道测量与建模的发展现状,预计在 GNSS 信道建模领域还面临一些挑战,同时也是未来研究的重点,包括:目前的测量与建模大多只考虑 L 频段,增加对未来可能的工作频段的测量;现有模型对天线阵列的支持并不普遍,因此还要加强空间相关特性的测量和建模;对极化传播在 GNSS 信道中真实效应进行建模;加强对快时变高速移动信道的测量和建模,研究快时变条件下信道的空间非平稳特征;研究借鉴 5G 采用的标准随机信道模型(geometrically based stochastic models, GBSM)混合物理统计信道建模方法,改进 RT 等确定性技术,平衡其准确性与计算复杂性的矛盾;对以表格形式罗列的信道模型的测量数据和统计参数进行标准化处理,建立统一数据格式,体现简单清晰的数据关系,将有利于信道模型的应用和系统测试评估。

参考文献

- [1] KARALIPOULOS M S, PAVLIDOU F. Modelling the land mobile satellite channel: a review[J]. Electronics & communication engineering journal, 1999, 11(5): 235-248.
- [2] JAHN A. Propagation considerations and fading countermeasures for mobile multimedia services[J]. International journal of satellite communications, 2001, 19(3): 223-250.
- [3] ARAPOGLOU P, MICHAELIDIS E T, PANAGOPoulos A D, et al. The land mobile earth-space

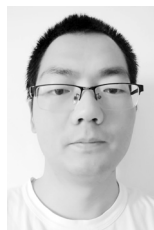
- channel[J]. IEEE vehicular technology magazine, 2011, 6(2): 44-53.
- [4] HOFFMANN G S, HELBERG A S, GROBLER M J. A brief survey of channel models for land mobile satellite communication[C]//Proceedings of Southern Africa Telecommunication Application Network. Telkom, 2010: 1-6.
- [5] FONTAN F P, MAYO A, MAROTE D, et al. Review of generative models for the narrowband land mobile satellite propagation channel[J]. International journal of satellite communications networking, 2008, 26(4): 291-316.
- [6] LUTZ E. Modelling of the land mobile satellite communications channel[C]//IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications(APWC). Torino, 2013: 199-202.
- [7] SARKAR T K, ZHONG J, KYUNGJUNG K, et al. A survey of various propagation models for mobile communication[J]. IEEE antennas and propagation magazine, 2003, 45(3): 51-82.
- [8] MARTELLUCCI A, CERDEIRA R P. Review of tropospheric, ionospheric and multipath data and models for global navigation satellite systems[C]//The 3rd European Conference on Antennas and Propagation. Berlin, 2009: 3697-3702.
- [9] AIT-IGHIL M, LEMORTON J, PÉREZ-FONTÁN F, et al. SCHUN-A hybrid land mobile satellite channel simulator enhanced for multipath modelling applied to satellite navigation systems[C]//The 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Gothenburg, 2013: 692-696.
- [10] LOO C. A statistical model for a land mobile satellite link[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 1985, 34(3): 122-127.
- [11] 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.
- [12] 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): 375-386.
- [13] FONTAN F P, GONZALEZ J P, FERREIRO M J S, et al. Complex envelope three-state Markova model based simulator for the narrow-band LMS channel[J]. International journal of satellite communications, 1997, 15(1): 1-15.
- [14] 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.
- [15] BELLO P. Characterization of randomly time-variant linear channels[J]. IEEE transactions on communications systems, 1963, 11(4): 360-393.
- [16] JAHN A, BISCHL H, HEISS G. Channel characterisation for spread spectrum satellite communications[C]//Proceedings of the IEEE 4th International Symposium on Spread Spectrum Techniques & Applications. Mainz, 1996, 3: 1221-1226.
- [17] FONTAN F P, VAZQUEZ-CASTRO M, CABADO C E, et al. Statistical modeling of the LMS channel[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2001, 50(6): 1549-1567.
- [18] DOTTLING M, JAHN A, DIDASCALOU D, et al. Two-and three-dimensional ray tracing applied to the land mobile satellite (LMS) propagation channel[J]. IEEE antennas propagation magazine, 2001, 43(6): 27-37.
- [19] DOTTLING M, ERNST H, WIESBECK W. A new wideband model for the land mobile satellite propagation channel[C]//IEEE International Conference on Universal Personal Communications. Florence, 1998, 1: 647-651.
- [20] DOTTLING M, JAHN A, WIESBECK W. A comparison and verification of 2D and 3D ray tracing propagation models for land mobile satellite communications[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Salt Lake City, 2000, 1: 434-437.
- [21] SOFOS T, KOUTSOPOULOS I, CONSTANTINOU P. A deterministic ray-tracing based model for land mobile satellite channel in urban environment[C]//The 48th IEEE Vehicular Technology Conference. Ottawa, 1998, 1: 658-660.
- [22] OESTGES C, VANHOENACKER-JANVIER D. A physical-statistical shadowing correlation model and its application to low-Earth-orbit systems[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2001, 50(2): 416-421.
- [23] KING P. Modelling and measurement of the land mobile satellite MIMO radio propagation channel[D]. Guildford: University of Surrey, 2007.
- [24] LEHNER A. Multipath channel modeling for satellite navigation systems[D]. Bavaria: University Erlangen-Nuremberg, 2007.
- [25] ABELE A, PEREZ-FONTAN F, BOUSQUET M, et

- al. A new physical-statistical model of the land mobile satellite propagation channel[C]//Proceedings of the 4th European Conference on Antennas and Propagation. Barcelona, Spain, 2010: 1-5.
- [26] JAHN A, LUTZ E. DLR channel measurement programme for low earth orbit satellite systems[C]//Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Universal Personal Communications. San Diego, 1994: 423-429.
- [27] PARKS M N, SAUNDERS S R, EVANS B G. Wide-band characterisation and modelling of the mobile satellite propagation channel at L- and S-bands[C]//The 10th International Conference on Antennas and Propagation (ICAP). Edinburgh, 1997, 2: 2-39.
- [28] BRISO C, ALONSO J I. An experimental propagation model for LMS radio channel using measurements of GPS satellite [C]//The 28th European Microwave Conference. Amsterdam, Netherlands, 1998, 2: 173-178.
- [29] STEINGASS A, LEHNER A. Measuring Galileo's multipath channel [C]//Global Navigation Satellite Systems Conference (GNSS2003). Graz, 2003.
- [30] PÉREZ-FONTÁN F, SANMARTÍN B, STEINGASS A, et al. Measurements and modeling of the satellite-to-indoor channel for Galileo[C]//European Navigation Conference GNSS. Rotterdam, Netherlands, 2004.
- [31] FONTAN F P, MORAITIS N, BROWN T, et al. Overview of activities carried out within satnex on land mobile satellite and satellite-to-indoor channel modeling[C]//The 3rd European Conference on Antennas and Propagation. Berlin, 2009: 1717-1721.
- [32] JOST T, WEI W, DAMMANN A, et al. Satellite-to-indoor broadband channel measurements at 1.51 GHz and 5.2 GHz[C]//The 3rd European Conference on Antennas and Propagation. Berlin, 2009: 2236-2240.
- [33] KVICERA M, PECHAC P. Building penetration loss for satellite services at L-, S- and C-band: measurement and modeling[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2011, 59(8): 3013-3021.
- [34] HORAK P, KVICERA M, PECHAC P. Frequency dependence of attenuation due to vegetation for satellite services[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2010, 9: 142-144.
- [35] HEYN T, EBERLEIN E, ARNDT D, et al. Mobile satellite channel with angle diversity: the MiLADY project[C]//Proceedings of the 4th European Conference on Antennas and Propagation, 2010: 1-5.
- [36] AIT-IGHIL M. Enhanced physical-statistical simulator of the land mobile satellite channel for multipath modelling applied to satellite navigation systems[D]. Toulouse; University of Toulouse, 2013.
- [37] XIE P, PETOVELLO M G. Measuring GNSS multipath distributions in urban canyon environments[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2015, 64(2): 366-377.
- [38] LIGHARI R U R, BERG M, KALLANKARI J, et al. Analysis of the measured RHCP and LHCP GNSS signals in multipath environment [C]//International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS). Barcelona, Spain, 2016: 1-6.
- [39] CHEN X. Statistical multipath model comparative analysis of different GNSS orbits in static urban canyon environment[J]. Advances in space research, 2018, 62(5): 1034-1048.
- [40] STEINGASS A, LEHNER A, PÉREZ-FONTÁN F, et al. Characterization of the aeronautical satellite navigation channel through high-resolution measurement and physical optics simulation[J]. International journal of satellite communications networking, 2008, 26(1): 1-30.
- [41] FONTAN F P, ABELE A, MONTENEGRO B, et al. Modelling of the land mobile satellite channel using a virtual city approach[C]//The 2nd European Conference on Antennas and Propagation. Edinburgh, 2007: 1-7.
- [42] STEINGASS A, LEHNER A. Navigation in multipath environments for suburban applications [C]//Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Institute of Navigation Satellite Division. Fort Worth, 2007.
- [43] LEHNER A, STEINGASS A, SCHUBERT F. A location and movement dependent GNSS multipath error model for pedestrian applications [C]//Proceedings European Navigation Conference. Naples, 2009: 108-119.
- [44] JOST T, WANG W, FIEBIG U, et al. A wideband satellite-to-indoor channel model for navigation applications[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2014, 62(10): 5307-5320.
- [45] STEINGASS A, LEHNER A. Measuring the navigation multipath channel: a statistical analysis[C]//Institute of Navigation Conference GNSS. Long Beach, USA, 2004.
- [46] LEHNER A, STEINGASS A. A novel channel model for land mobile satellite navigation [C]//The 3rd

- CNES Worksky on Earth-Space Propagation. Long Beach, 2005.
- [47] ITU. Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space land mobile telecommunication systems; Recommendation ITU-R P. 681-7 [S/OL]. [2020-04-15]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.681-7-200910-S!!PDF-E.pdf.
- [48] JOST T A. Satellite to indoor wave propagation modeling for positioning applications[D]. Vigo; University of Vigo, 2013.
- [49] ITU. Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space land mobile telecommunication systems; recommendation ITU-R P. 681-7 [S/OL]. [2020-04-15]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.681-10-201712-S!!PDF-E.pdf.
- [50] ITU. Propagation data required for the design systems in land mobile-satellite service; recommendation ITU-R P. 681-11[S/OL]. [2020-04-15]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.681-11-201908-I!!PDF-E.pdf.
- [51] AIT-IGHIL M, PÉREZ-FONTÁN F, LEMORTON J, et al. A three components model for simplified building scattering in urban environment[C]//The 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Prague, 2012; 2449-2453.
- [52] AIT-IGHIL M, LEMORTON J, PÉREZ-FONTÁN F, et al. Simplifying the propagation environment representation for LMS channel modelling[J]. EURASIP journal on wireless communications and networking, 2012(1); 110.
- [53] WANG Y Z, CHEN X, LIU P L, et al. Statistical multipath model based on experimental GNSS data in static urban canyon environment[J]. Sensors, 2018, 18(4); 1149.
- [54] XIAO W, LIU W, SUN G. Modernization milestone: BeiDou M2-S initial signal analysis[J]. GPS solutions, 2016, 20(1); 125-133.
- [55] 张鑫, 刘小汇, 肖志斌, 等. 一种低复杂度高精度多路 GNSS 多径信号模拟方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014(1); 111-116.
- ZHANG X, LIU X H, XIAO Z B, et al. A low complexity high-precision multi-channel GNSS multipath signal simulation method[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2014, 45(1); 111-116. (in Chinese)
- [56] 刘思慧, 樊婧琦, 欧钢, 等. 多径效应的动态特性对码跟踪环路的影响分析[J]. 测绘学报, 2011(S1): 89-94.
- LIU S H, FAN J Q, OU G, et al. Effects of dynamics of multipath on code tracking loop[J]. Acta geodetica et cartographica sinica, 2011(S1): 89-94. (in Chinese)
- [57] 张孟阳, 吕保维, 宋文森. GPS 系统中的多径效应分析[J]. 电子学报, 1998, 26(3): 10-14.
- ZHANG M Y, LYU B W, SONG W S. Analyses of multipath effects in the GPS system[J]. Chinese journal of electronics, 1998, 26(3): 10-14. (in Chinese)
- [58] LOHAN E S, LAKHZOURI A, RENFORS M. Feedforward delay estimators in adverse multipath propagation for Galileo and modernized GPS signals [J]. EURASIP journal on advances in signal processing, 2006. DOI: 10.1155/ASP/2006/50971
- [59] BHUIYAN M Z H, LOHAN E S, RENFORS M. Code tracking algorithms for mitigating multipath effects in fading channels for satellite-based positioning[J]. EURASIP journal on advances in signal processing, 2008. DOI: 10.1155/2008/863629
- [60] BHUIYAN M Z H, ZHANG J, LOHAN E S, et al. Analysis of multipath mitigation techniques with land mobile satellite channel model[J]. Radio engineering, 2012, 21(4);1067.
- [61] BROCARD P, SALOS D, JULIEN O, et al. Performance evaluation of multipath mitigation techniques for critical urban applications based on a land mobile satellite channel model[C]//IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. Monterey, 2014; 612-625.
- [62] STALLO C, NERI A, SALVATORI P, et al. GNSS-based location determination system architecture for railway performance assessment in presence of local effects[C]//IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. Monterey, 2018; 374-381.
- [63] ŠTERN A, KOS A. Positioning performance assessment of geodetic, automotive, and smartphone GNSS receivers in standardized road scenarios[J]. IEEE access, 2018, 6; 41410-41428.
- [64] KRACH B, ARTAUD G. Performance assessment of navigation signals in realistic multipath environments [C]//Proceedings of the 4th ESA Workshop on Satellite Navigation User Equipment Technologies, 2008.
- [65] STEINGASS A, KRACH B, CRISCI M. Robustness versus accuracy: multipath effects on land mobile satellite navigation[J]. IET radar, sonar & navigation, 2017, 11(3); 520-527.
- [66] KE J, LU X, WANG X, et al. Decoding performance

analysis of GNSS messages with land mobile satellite channel in urban environment[J]. Electronics, 2018, 7(11).

- [67] ROUDIER M. Analysis and improvement of GNSS navigation message demodulation performance in urban environments[D]. Toulouse: University of Toulouse, 2015.
- [68] GARCIA-PENA A, PAIMBLANC P, JULIEN O, et al. Analysis of different CSK configurations in a urban environment when using non-coherent demodulation [C]//The 7th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies. Noordwijk, Netherlands, 2014.
- [69] PEREZ-FONTAN F, VAZQUEZ-CASTRO M A, BUONOMO S, et al. S-band LMS propagation channel behavior for different environments, degrees of shadowing and elevation angles[J]. IEEE transactions on broadcasting, 1998, 44(1): 40-76.



林红磊 (1989—), 男, 河南人, 国防科技大学电子科学学院讲师, 博士, 研究方向为星基导航与定位技术.



王茂磊 (1979—), 男, 山东人, 北京卫星导航中心高级工程师, 博士, 研究方向为卫星导航与时间频率.

作者简介



周顺 (1983—), 男, 湖南人, 国防科技大学电子科学学院博士研究生, 工程师, 研究方向为星基导航与定位技术、无线信道建模.