

文章编号:1001-893X(2011)05-0127-06

卫星信号模拟器的发展现状与趋势^{*}

侯 博,谢 杰,刘光斌

(解放军第二炮兵工程学院,西安 710025)

摘 要:卫星信号模拟器作为卫星导航接收机开发与验证的必备工具,其相关理论研究与工程应用具有重要学术意义和巨大商业价值。详细介绍了软件、硬件和混合架构三种卫星信号模拟器的国内外理论研究和产品动态,总结了电离层误差、多径效应等主要误差模型的理论研究进展和应用现状,通过对比指出了国内较国外在模拟器产品、仿真实验特别是误差模型理论研究等方面存在的差距,最后对模拟器发展趋势进行了探讨和展望。

关键词:卫星导航系统;卫星信号模拟器;误差模型;电离层误差;多径效应;发展现状与趋势

中图分类号:TN965 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2011.05.027

Navigation Satellite Signal Simulator: Current Status and Developing Trend

HOU Bo, XIE Jie, LIU Guang-bin

(Second Artillery Engineering College of PLA, Xi'an 710025, China)

Abstract: As an indispensable tool to develop and verify GNSS (Global Navigation Satellite System) receivers, the navigation satellite signal simulator has been researched and developed extensively for its academic significance and substantial commercial value. Development and progress achieved in recent years on the theoretical research and products commercialization of satellite signal simulators home and abroad are introduced and studied comparatively, including software simulator, hardware simulator and hybrid structure simulator. New research progress achieved on main interrelated error models such as ionospheric error and multi-path effect is summarized and analysed. Efforts that should be made in China on simulator products development, signal simulation theories study especially those related to error models are pointed out. Finally future trends of the navigation satellite signal simulator are discussed.

Key words: satellite navigation system; satellite signal simulator; error model; ionospheric error; multi-path effect; development status and trend

1 引 言

目前,世界卫星导航领域已经形成了 GPS、GLONASS、“北斗二号”和 Galileo 四足鼎立之势,日本的 QZSS 和印度的区域导航系统 (Indian Regional

Navigation Satellite System, IRNSS) 也正在建设与筹备中^[1]。卫星导航系统已经成为大国必备的、关系国家安全的基础设施和重要战略资源。

在卫星导航系统中,卫星导航接收机无疑是最重要也是最直接发挥导航系统作用、体现其性能的环节。卫星信号模拟器作为接收机特别是高端接收

^{*} 收稿日期:2011-03-01;修回日期:2011-04-21

基金项目:军队重点研究项目 (EP050068-23)

Foundation Item: Military Key Research Project (EP050068-23)

机开发与验证的必备工具,其技术难点主要存在两个方面:由于模拟器仿真的卫星信号是扩频、调幅、调频、调相的复杂信号,模拟器需要非常合理的软硬件架构和信号的生成方案;实际卫星信号中存在多种干扰和延迟,模拟器中需要融入精确合理的误差模型,以实现信号的逼真模拟。相比于国外,国内无论是卫星信号系统架构、仿真理论还是相关误差模型的研究都显得不够细致深入。近年来,国外涌现出一大批软件、硬件以及混合架构的模拟器,其功能强大、门类齐全,国内也成功研发了多款模拟器产品。随着 GPS、GLONASS 的广泛应用和“北斗”、Galileo 等新系统的建设,卫星信号模拟器的相关理论研究和产品研发进入了一个全新阶段,也呈现出一些新的发展趋势。

2 国内外模拟器理论与产品现状

2.1 国外模拟器理论与产品现状

2.1.1 模拟器架构与系统设计研究现状

国外对于卫星导航仿真理论和模拟器技术的研究起步较早。最早在 20 世纪 70 年代后期, GPS 尚处于方案论证阶段,美国空军就已经建立了地面测试与数据处理系统。近十余年来,加拿大 Calgary 大学和 York 大学、美国的 Stanford 大学和 Ohio 大学、德国航天中心等诸多著名大学和研究机构都对卫星信号仿真理论与应用进行了深入研究,取得了丰硕成果。

(1) 软件模拟器

2001 年, Calgary 大学 Luo Ning 在其博士论文^[2]中详细探讨 GPS 实际信号中存在的各种误差并建立了相应的模型,对各模型的有效性进行了验证。Corbell^[3]和 Lei Dong^[4]分别开发了基于 Matlab 的 GPS 中频信号软件模拟器。Lei Dong 在论文中将卫星信号的多普勒频移表示为伪距的一部分,大大降低了仿真计算量。作者在文中证明了两种表示方法的统一性,其基本思想为:多普勒频移本身就是由相对距离的改变产生,而卫星与接收机载体间的伪距本身就是两者距离的表示。2009 年,德国航天中心 F.M.Schubert 开发了基于 C++ 的开源软件 GNSS 信号模拟器 SNACS,该模拟器中引入了包含更多误差项的信道模型,可以提供更为复杂的信道仿真^[5]。同年,加拿大 York 大学的 Alexander Dolgansky 等也开发了多模卫星信号软件模拟器 (Multi - GNSS Observables Simulator, MGOS),文献^[6]中介绍了该模拟

器中所应用的误差模型并指出这些误差模型可以应用于各 GNSS 系统。此外, SATNAV 等基于 Matlab 的工具包软件模拟器应用较为广泛。

(2) 硬件模拟器

2008 年, Christoph Abart^[7]介绍了由欧盟科研架构计划资助, Agilent (安捷伦)、TeleConsult 等公司参与研发的卫星信号模拟器。该卫星信号模拟器可以进行 GPS L1、Galileo L1 和 SBAS 信号的仿真,硬件部分包括信号 API 接口、基带信号生成器和射频前端,但是论文中没有具体涉及仿真的软硬件实现方法。David A. Hall 介绍了 Avera 公司基于 NI 射频测试平台开发的录播式模拟器^[8]。然而录播式模拟器主要存在两个缺陷,一是录制的信号中掺杂着现实环境中的多种干扰信号,二是录制条件决定其模拟的载体场景例如高度、速度、运动曲线都受到很大限制。国外基于 VXI、PCI、CPCI、USB 和以太网的模拟器技术较为成熟,但是由于卫星信号模拟器中涉及敏感技术,西方发达国家对中国实行严格的模拟器进口管制,公开发表的有价值的论文很少,而且软件模拟器相关论文居多,涉及硬件实现的论文寥寥无几。

(3) 混合架构模拟器

混合架构即基于 Matlab 或其它软件计算得到中频信号存储在存储器中,而后将文件直接发送给接收机或通过硬件调制模块生成射频信号测试接收机整体性能。NAVSYS 公司一直致力于 AGHS (Advanced GPS Hybrid Simulator) 架构^[9]的 GPS 卫星信号仿真产品的研制,该公司的模拟器多采用“Matlab + DSR 存储器”式结构。

由于近年国外模拟器整体架构逐步成熟,相关产品较多,关于架构和实现方面的论文文献趋少。

2.1.2 主要相关模型的研究进展

(1) 电离层误差模型

电离层误差的研究主要集中在电离层延迟和电离层闪烁之上。

早在 1987 年, John A. Klobuchar 就给出了可以校正约 70% 电离层延迟的单频接收机电离层延迟校正算法^[10],此算法成为了之后广泛应用的 Klobuchar 模型。由于 Klobuchar 模型不需要环境参数、计算量小、实时性好, GPS 和“北斗二号”卫星信号的导航电文中均包含 Klobuchar 模型参数,为接收机提供电离层延迟校正数据。此外,常用的电离层模型还有 Bent 模型、IRI 模型、Nequick 模型、VTEC 模型等。近年来由于电离层监测网的建立,接近实

时的电离层延迟补偿成为可能,得到了广泛应用。

电离层闪烁可以引起信号幅度、相位、时延的快速抖动,严重时会造成接收机失去捕获。现阶段,电离层闪烁对于 GNSS 系统影响的研究正在国外广泛展开。2008 年,Humphreys 等建立了一种基于概率的电离层闪烁数学模型^[11],用以检测 GPS 接收机相位跟踪环路性能。2010 年,Rajendra Malla 与 Robert Fries 分别使用 Cornell 大学和 Air Force Research Laboratory 开发的电离层闪烁仿真工具,结合 Sprint 公司的 GPS 信号模拟器分析电离层闪烁对接收机的性能影响,提出将闪烁造成接收机定位中断的概率作为反映接收机架构和算法性能指标的方法^[12]。

(2)多径效应模型

2006 年,Tao Hu 在硕士论文中重点讨论了室内环境中复杂多径效应下的 GPS 卫星信号仿真^[13],建立了多种室内场景的多径效应模型,使用了硬件模拟器在各场景内对仿真模型进行了验证。此论文是多径效应仿真较为经典的论文之一。近年来,室内、城市、丛林、环境等下的多径效应成为了国外研究的热点。

(3)其余误差模型

常用的对流层模型还有改进 Hopfield 模型、Saastamonien 模型、Neill 模型、Davis 模型等。近年来,对流层校正研究主要方向有两个:一个是差分方法;另一个是使用气象观测机构(如 NOAA,即美国国家海洋和大气管理局)根据观测网给出的对流层数据进行实时延迟校正。国外对于单频用户独立定位的对流层模型研究趋少。

相对论效应、星钟误差等模型已经能够满足甚至超出了卫星导航的精度需求,应用较多,相关研究较少。

2.1.3 国外模拟器产品现状

国外有众多公司推出了配置灵活、功能强大的卫星信号模拟器产品。其中,英国 Sprint 公司在卫星信号模拟器领域的研究起步较早并一直处于较为领先的地位。

表 1 国外主要的模拟器生产商
Table 1 Major foreign simulator manufacturers

公司	所属国家	主要产品	架构类型
Sprint	英国	GSS 系列	硬件模拟器
IFEN	德国	NavX - NCS 系列	硬件模拟器
NAVSYS	美国	基于 Matlab 的仿真工具包	混合模拟器
CRS	美国	GPSS、GALS、GNSS 系列	混合模拟器

以上各公司的产品大都实现了 GPS L1/L2/L5、GLONASS L1/L2、Galileo E1/E5/E6、SBAS 的任意组合仿真。此外,美国 Aeroflex、Pendulum 公司推出的硬件模拟器产品也在市场上占有一定份额。

2008 年,美国国家仪器(NI)有限公司发布了基于 LabView 和 PXI 软件无线电平台的 GPS 工具包,可以模拟 GPS L1 频段 C/A 码信号,在配备磁盘阵列时可以进行 GPS 信号录播,其系统架构与 AGHS 相似。Agilent 在部分信号源产品上也可以增加简单的 GPS 信号生成功能。

2.2 国内模拟器理论与产品现状

2.2.1 模拟器研究现状

北京航空航天大学依托国家自然科学基金,率先开展了 GPS 卫星信号模拟器和接收机领域的研究,对 GPS 卫星信号仿真基本原理和构架、误差仿真数学模型和实现方法进行了深入的理论研究,从软件架构和硬件实现上对 GPS 卫星信号模拟器进行了探索^[14-16]。

国防科技大学也开展了模拟器的相关研究。张惠军等针对模拟器中信号延迟、卫星位置等参数计算量大、迭代次数多等特点,提出在精度要求不高情况下使用插值和拟合减少计算量的方法^[17]。罗益鸿等在其论文中给出了基于迭代的精密伪距计算方法^[18],针对计算时间过长的问题,作者进一步提出了迭代生成与插值相结合的组合伪距生成方法,大大降低了计算量。单庆晓等提出在 FPGA 中采用延迟滤波器仿真 GPS 伪随机码的延迟方案^[19],这种方案实际应用可行,但硬件代价较大。罗显志等在其论文中介绍了基于 Matlab 的 GPS/Galileo 信号软件模拟器并给出了模拟器中所应用的各种误差模型^[20]。

2008 年,第二炮兵工程学院范志良硕士对 GLONASS 卫星信号仿真理论进行了深入研究,研制了 GLONASS 卫星信号模拟器,文献[21]中给出了该模拟器的软硬件架构。2009 年,程俊仁硕士成功开发了多模卫星信号模拟器的上位机软件,解决了各卫星导航系统时空表示不统一情况下的信号同步仿真问题^[22]。

2010 年,北京理工大学宋媛媛等提出了一种基于三阶 DDS 的卫星信号多普勒模拟方法^[23-24],通过三阶 DDS 级联,在模型中引入卫星和接收机相对运动的速度、加速度、加加速度因素,解决了一阶 DDS 下载波和码波形的不平滑问题,多普勒效应仿真更加逼真,但是作者没有给出各阶 DDS 控制字的具体计算方法。此外,哈尔滨工程大学、西安理工大

学等多家单位也都在进行卫星信号模拟器的研究。

国内近年来的 40 余篇卫星信号模拟器相关文献中结果大多是计算机仿真得出,多篇硬件模拟器论文缺乏接收机实验验证。当前尚无公开发表的“北斗二号”卫星信号模拟器相关论文。

2.2.2 国内模拟器产品现状

在产品和应用方面,第二炮兵工程学院和国防科技大学推出了 GNS8000 系列模拟器,可以实现 GPS、GLONASS、Galileo 卫星信号的仿真。第二炮兵工程学院研制了世界上第一款可以实现 GPS、GLONASS 和“北斗一号”信号任意时空同步仿真的 NS300 系列多模卫星模拟器。东方联星、华力创通等公司也推出了能够实现 GPS、GLONASS 信号仿真的产品系列,产品具体状态和性能不详。

航天恒星科技有限公司借助卫星领域的研究优势,开发出了“CSG-5000 单端口北斗卫星导航信号源”,可以产生“北斗二号”B1、B2、B3 三个频点的粗码和精码仿真和信号传播的多径效应仿真。据悉,国防科技大学已经成功研制“北斗二号”卫星模拟器。此外,多家国内公司也都发布了“北斗二号”卫星信号模拟器产品的宣传广告,但经咨询得知并无实物或现货。

由于卫星信号模拟器特别是“北斗二号”模拟器应用前景广阔,多家院校、研究所和地方公司都在进行此领域的研究。第二届中国卫星导航学术年会(CSNC 2011)将于 2011 年 5 月在上海举行,届时必将有更新的模拟器产品亮相。

2.3 国内外理论研究、产品现状对比与分析

国内模拟器领域无论是理论研究还是产品性能,水平依然较国外有着较大差距,掌握模拟器核心技术的单位屈指可数。在辅助精确定位的各种误差模型研究领域,国外已经达到了非常精细的水准,例如室内、丛林、海洋等环境的影响、信号多径效应、电离层闪烁、电离层和对流层延迟网格校正等更为细致深入的研究早已在国外广泛开展,国内对此研究依旧较少。究其原因,一方面我国卫星导航领域研究起步晚,一直没有属于自己的导航系统和相应观测手段;另一方面,西方对高动态模拟器进行了严格的技术封锁,且人为限制出口我国的模拟器可仿真载体速度和高度。

3 模拟器发展趋势

卫星信号模拟器发展趋势主要呈现在以下几个

方面。

(1)多模、多频化

为满足用户高精度定位需求以及卫星覆盖率引起的导航定位问题,多模多频是接收机未来发展的必然方向。可以实现多系统多频点卫星信号组合仿真的模拟器将成为必然趋势。

(2)高精度、高动态化

随着电子元器件性能的提升、软件无线电理论的发展和新型模拟器架构的提出,卫星信号模拟器的精度和动态范围必将随之提高,以实现高性能接收机的算法和功能验证。

(3)真实化、实时化

模拟器提供的仿真信号越接近实际卫星的信号就越能验证接收机的真实工作性能,这就需要建立更为精准的卫星信号误差模型并将其融入仿真的信号中,例如多径效应模型、信号衰减模型、电离层闪烁模型、天线方向增益模型等。此外,添加各类可控干扰信号的仿真信号生成也将成为未来模拟器必不可少的功能,用以验证接收机抗干扰性能。

未来模拟器将更多地要求任意时空的实时仿真,单一的录播转发式的卫星信号仿真最终将被淘汰,录播将作为辅助功能存在。

(4)小型化、专业化、标准化

针对不同市场的需求,更为专业的接收机验证模拟器和小型嵌入式模拟器将分别占据高低端市场。另一方面,国内对于接收机已经实施了部分标准,模拟器作为一种标准的信号源也需要一个行业标准进行规范。多家研究院所现在都在拟定模拟器的规范,以期申报为国家标准。

(5)与测试系统融为一体的“硬件在环”(Hardware-in-loop)仿真

未来的模拟器将提供多样的标准化接口,提供与被测系统的交互,构成完整的闭环测试回路,在验证接收机性能的同时验证定位数据处理和使用方案的可行性。

(6)软件、硬件和 AGHS 架构模拟器互补并存

软件模拟器价格相对低廉,信号建模和调理方法灵活、简便易行;硬件模拟器具有实时性高、可实施“硬件在环”仿真和接收机系统进行整体测试等优势;AGHS 架构模拟器则各取其半。在未来一段时间里,这种“三足鼎立”之势不会改变。

(7)成为接收机检定的标准源

我国现行接收机检定手段多依赖于标准检定场

的各种基线,然而标准检定场对于场地地质、视野及周边环境有较高要求,建设维护费用高昂,且检定场易受基线向量误差、点位漂移误差、天气等诸多不确定因素影响^[25]。卫星信号模拟器作为低成本的灵活测试工具,可以为接收机提供时空无约束的仿真信号,在未来将逐步取代检定场基线成为接收机检定的标准工具。

4 结 论

国内卫星导航领域方兴未艾,各方面研究仍较国外有很大差距。随着“北斗二号”的建成,我国的卫星导航技术必将得到长足的发展。然而,“北斗二号”星座尚未布满,接收机开发缺乏信号源和验证工具,国内对于拥有自主知识产权的“北斗二号”卫星信号模拟器需求十分紧迫。各卫星导航系统将在未来互补并存,多模接收机必然得到广泛应用,开展的“北斗二号”及其它各系统的卫星信号模拟器的研究具有巨大的经济效益和重大的军事战略意义。

参考文献:

- [1] Gibbons Media. Japan's Quasi-Zenith Satellite Michibiki Begins Broadcasts[J]. Inside GNSS, 2010.
- [2] Luo Ning. Precise Relative Positioning of Multiple Moving Platforms Using GPS Carrier Phase Observables[D]. Calgary, Alberta, Canada: University of Calgary, 2001.
- [3] Cornell P M. Design and Validation of an Accurate GPS Signal and Receiver Truth Model For Comparing Advanced Receiver Processing Techniques[D]. USA: Air University, 2000.
- [4] LEI Dong. IF GPS Signal Simulator Development and Verification[D]. Calgary, Alberta, Canada: University of Calgary, 2003.
- [5] Schubert F M, Prieto-Cerdeira R, Robertson P, et al. SNACS-The Satellite Navigation Radio Channel Signal Simulator[C]//Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Savannah, GA: ION, 2009: 1982-1988.
- [6] Dolgansky A, Szeto A, Bisnath S. Software Simulation of Multiple Global Navigation Satellite System measurements [C]//Proceedings of IEEE Toronto International Conference on Science and Technology for Humanity. Toronto, ON: IEEE, 2009: 322-327.
- [7] Christoph Abart. Simulating GNSS Constellations GPS, Galileo and SBAS[C]//Proceedings of 50th International Symposium on ELMAR. Zadar, Croatia: IEEE, 2008: 569-572.
- [8] David A Hall. Innovation: Record, Replay, Rewind-Testing GNSS Receivers with Record and Playback Techniques [J]. GPS World, 2010.
- [9] Alison Brown, Neil Gerein. Advanced GPS Hybrid Simulator Architecture[C]//Proceedings of ION 57th Annual Meeting. Albuquerque, NM: ION, 2001: 1-8.
- [10] Klobuchar J A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users[J]. IEEE Transactions on AES, 1987, 23(3): 325-331.
- [11] Humphreys T E, Psiaki M L, Hinks Joanna C, et al. Simulating Ionosphere-Induced Scintillation for Testing GPS Receiver Phase Tracking Loops[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2009, 3(4): 707-715.
- [12] Rajendra Malla, Robert Fries. Multi-Layer Modeling and Simulation of the Effects of Ionospheric Scintillation on Service Availability of the GPS Augmentation Systems [C]//Proceedings of IEEE/ION PLANS. Indian Wells, CA: IEEE, 2010: 688-693.
- [13] Tao Hu. Controlled Indoor GPS Signal Simulation[D]. Calgary, Alberta, Canada: University of Calgary, 2006.
- [14] 赵军祥. 高动态智能 GPS 卫星信号模拟器软件数学模型研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003.
ZHAO Jun-xiang. The Study on Mathematical Model of High Dynamic and Intelligent GPS Satellite Signal Simulator's Software [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003. (in Chinese)
- [15] 赵军祥, 张其善, 常青, 等. 高动态 GPS 卫星信号模拟器关键技术分析及应用[J]. 电讯技术, 2003, 43(4): 49-54.
ZHAO Jun-xiang, ZHANG Qi-shan, CHANG Qing, et al. The Key Technique Analysis and Applications of High Dynamic GPS Signal Simulator[J]. Telecommunication Engineering, 2003, 43(4): 49-54. (in Chinese)
- [16] 朱宇虹. 高动态 GPS 卫星信号模拟器的研究与设计[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.
ZHU Yu-hong. The Study and Design of High Dynamic GPS Signal Simulator [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)
- [17] 张惠军, 程翥, 王朝军, 等. 一种提高 GPS 模拟器运算效率的方法[J]. 全球定位系统, 2006, 31(3): 21-25.
ZHANG Hui-jun, CHENG Zhu, WANG Chao-jun, et al. A Method of Improving GPS Simulator's Calculation Efficiency [J]. GNSS World of China, 2006, 31(3): 21-25. (in Chinese)
- [18] 罗益鸿, 王威, 郝晓宁. 导航卫星信号模拟器伪距生成实时仿真研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(7): 77-80.
LUO Yi-hong, WANG Wei, XI Xiao-ning. Real-time Simulation of Pseudo Range Generation of Navigation Satellite Signal Simulator [J]. Computer Simulation, 2009, 26(7): 77-80. (in Chinese)
- [19] 单庆晓, 钟小鹏, 陈建云, 等. 基于 FPGA 的低成本 GPS 信号模拟器设计[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(7): 1365-1367.

- SHAN Qing - xiao, ZHONG Xiao - peng, CHEN Jian - yun, et al. Low Cost GPS Simulator Based on Single FPGA[J]. Computer Measurement & Control, 2009, 17(7): 1365 - 1367. (in Chinese)
- [20] 罗显志, 杨滕, 魏海涛, 等. 基于 MATLAB 的卫星导航信号仿真和验证平台[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(18): 5692 - 5698.
- LUO Xian - zhi, YANG Teng, WEI Hai - tao, et al. Satellite Navigation Signal Simulation and Validation Platform Based on MATLAB Software[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(18): 5692 - 5698. (in Chinese)
- [21] 范志良. GLONASS 卫星信号仿真技术研究[D]. 西安: 第二炮兵工程学院, 2008.
- FAN Zhi - liang. Research on the Simulation Technology of GLONASS Signal[D]. Xi'an: The Second Artillery Engineering College, 2008. (in Chinese)
- [22] 程俊仁, 刘光斌, 焦巍. 多模卫星信号仿真器上位机软件设计与实现[J]. 电讯技术, 2009, 49(5): 17 - 20.
- CHENG Jun - ren, LIU Guang - bin, JIAO Wei. Design and Implementation of the Software on the Upper Computer for Multi - mode Satellite Signal Simulator[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(5): 17 - 20. (in Chinese)
- [23] Song Yuanyuan, Zhou Hui, Zeng Tao, et al. Algorithm and Realization of High Dynamic Satellite Signal Doppler Simulation Based on FPGA[C]//Proceedings of 2010 ION GNSS. San Diego, CA: ION, 2010: 1044 - 1050.
- [24] 宋媛媛, 曾大治, 曾涛. 基于三阶 DDS 的卫星信号多普勒模拟方法[J]. 北京理工大学学报(自然科学版), 2010, 30(10): 1213 - 1216.
- SONG Yuan - yuan, ZENG Da - zhi, ZENG Tao. Satellite Signal Doppler Simulation Method Based on Third Order DDS[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2010, 30(10): 1213 - 1216. (in Chinese)
- [25] 杨博雄, 傅辉清, 凌模, 等. GPS 接收机标准检定场测量不确定度的分析与评定[J]. 计量技术, 2007(5): 64 - 66.
- YANG Bo - xiong, FU Hui - qing, LING Mo, et al. Analysis and Evaluation of Uncertainty in the Field Inspection Test of GPS Receivers[J]. Measurement Technique, 2007(5): 64 - 66. (in Chinese)

作者简介:

侯 博(1988—),男,山东菏泽人,2005 年获计算机专业学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为卫星导航与导航对抗;

HOU Bo was born in Heze, Shandong Province, in 1988. He received the B.S. degree from the Second Artillery Engineering College of PLA in 2009. He is now a graduate student. His research interests include satellite navigation and navigation countermeasure.

Email: houbol1988@163.com

谢 杰(1986—),男,四川射洪人,2005 年获测试与控制专业学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为仪器科学技术;

XIE Jie was born in Shehong, Sichuan Province, in 1986. He received the B.S. degree from the Second Artillery Engineering College of PLA in 2009. He is now a graduate student. His research direction is instrument science and technologies.

刘光斌(1963—),男,四川射洪人,教授、博士生导师,1993 年获西安交通大学博士学位,主要研究方向为系统可靠性与电磁环境控制、智能仪器仪表、信号检测与估计等。

LIU Guang - bin was born in Shehong, Sichuan Province, in 1963. He received the Ph.D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1993. He is now a professor and also the Ph.D. supervisor. His research interests include system reliability, EMC, intelligent instrument, signal probe and estimation.