

文章编号: 1001-1595(2011)S-0089-06

多径效应的动态特性对码跟踪环路的影响分析

刘思慧^{1,3}, 樊婧琦², 欧 钢³, 焦文海¹, 崔晓伟⁴

1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094; 2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 国防科技大学 电子科学与工程学院 卫星导航研发中心, 湖南 长沙 410073; 4. 清华大学 电子工程系, 北京 100084

Effects of Dynamics of Multipath on Code Tracking Loop

LIU Sihui^{1,3}, FAN Jingqi², OU Gang³, JIAO Wenhai¹, CUI Xiaowei⁴

1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China; 2. Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China; 3. Satellite Navigation R & D Center, School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan, 410073, China; 4. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China

Abstract : The relative movement between the receiver and the satellite causes the dynamic effect on multipath. As to different orbits of satellites, this paper firstly analyzes the different effects of multipath to the error of pseudorange measurement. The standing multipath of static receiver is discussed especially when receiving the signals from the GEO satellites. Then influence to the code tracking loop, which is caused by fading-frequency in multipath, is simulated and analyzed in the paper. Further results show that the multipath effect is filtered in some extent, when the fading-frequency is large compared to the bandwidth of code tracking loop. It is concluded that quick change in short time and slow change in long time are represented in error of pseudorange measurement, because the dynamics of multipath is different according to different satellite orbits. This offers a validating approach for the relationship between the orbit and the multipath.

Key words : multipath; fading-frequency; receiver; code tracking loop

摘 要: 接收机与卫星之间的相对运动,使得多径效应存在动态特性。针对卫星轨道的不同,分析多径效应对测距误差的影响,着重讨论静止接收机接收 GEO 卫星信号时出现的固有多径现象,仿真分析多径信号的衰落频率对码跟踪环路的影响。仿真结果表明,当衰落频率接近或大于码环路带宽时,多径对码跟踪精度的影响会在一定程度上被滤除;不同的卫星轨道导致多径效应的动态特性存在差异,会使测距误差在时域上表现出短时快变和长时缓变两种特征。为研究多径效应产生机理与卫星轨道因素的相关性提供了验证途径。

关键词: 多径;衰落频率;接收机;码跟踪环路

中图分类号: P228

文献标识码: A

1 引 言

对流层误差、电离层误差、卫星定轨误差及多径误差是制约卫星导航接收机精度提升的主要误差源。其中对流层、电离层及定轨误差属于系统误差,可通过差分或建模的方法消除。而多径误差具有时变性及环境特性,难以通过差分技术消除,是影响高精度测距的最主要误差。多径效应的机理研究及误差消除技术仍然是卫星导航系统中的研究热点和瓶颈问题。

通常在卫星至接收机天线相位中心之间,存在一条最短、无障碍的路径用于传输直达信号;而卫星星体、地表环境等因素会导致卫星信号发生反射,通过其他路径进入接收机。多径效应就是

指卫星信号经反射、散射后进入接收机,导致测量误差的物理现象^[1]。

2 多径效应分析

2.1 多径效应特性

由于各自传输路径不同,直达信号与反射、散射信号之间存在相对相位和相对延迟,幅度特性存在差异,导致进入接收环路的信号发生畸变,相关峰鉴别曲线的过零点发生偏移,从而影响测距精度。通常认为多径信号是由反射引起的,而将散射信号模型化为一个附加的噪声项,对码跟踪的影响很小^[2]。

卫星发射天线、地面接收天线、星表及地表环境四者之间的几何位置关系,环境对信号的反射

特性, 以及天线的方向图特性, 决定着多径信号与直达信号之间的相位和延迟关系。环境特性的差异, 使得多径信号不具备空间相关性; 同时信号对天线相位中心的入射角会随着星地相对位置的变化而变化, 导致多径信号也是时变的。因此多径信号表现出随机特性, 也无法用特定的环境模型来描述多径信号的产生机理和变化规律。

2.2 研究现状

在多径影响分析方面, 通常使用简单的反射模型来定性描述多径信号, 难以给出多径延迟和相位随时间的变化关系, 研究难点集中于地面环境引发的多径影响分析, 对其他因素引发的多径影响分析尚未展开。

为保证接收机的观测弧段, 接收天线的方向图在低仰角为 10° 附近仍有较好的增益特性, 导致反射信号较容易进入接收机。因此, 在多径抑制技术方面, 目前研究主要着眼于改善地面接收机的性能, 在天线设计、多径抑制处理算法和工程实现方面取得了不少成果, 如扼流圈天线, 基于码环的窄相关技术、ELS 技术、MEDLL 技术等^[3]。但在多径效应的机理分析方面尚有很大的研究空间, 针对卫星轨道特性、星体表面环境等综合因素是否会引发多径效应, 星地之间的相对运动、星座设计对多径误差的影响研究, 应是多径效应机理分析的重要研究方面。

国外针对 GPS 和 Galileo 系统采用的 MEO 星座, 已有一定文献从数据域开展了多径机理和误差特性的研究。而针对北斗系统的 IGSO 与 GEO 星座, 涉及机理的研究很少。因此利用时域和频域手段分析 IGSO 和 GEO 轨道特性下的多径误差特性, 有助于从机理上认清多径效应的规律, 为数据后处理和接收机设计提供指导。

2.3 多径信号影响分析

图 1 及图 2 给出了在典型地面环境下, 宽波束天线接收机受到多径信号干涉后的伪距测量误差, 可以看出, 多径信号会使测距误差在零值附近波动, 在时域上表现出小时量级的短时快变特性, 在频域上表现出低频特性, 如图 3 所示。

在 GEO 和 IGSO 两种卫星轨道下, 宽波束接收机的多径误差可从图 4 对比中得到。图中黑色线为 IGSO 卫星的测量值, 其余为 GEO 卫星的测量值, 可以看出相对于 IGSO 卫星, GEO 卫星下接收机的测量值变化较快, 波动幅度也较大。

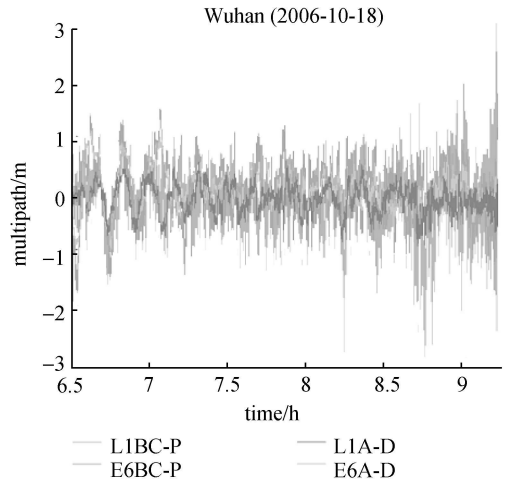


图 1 Galileo 接收机多径误差

Fig. 1 Multipath error of Galileo receiver

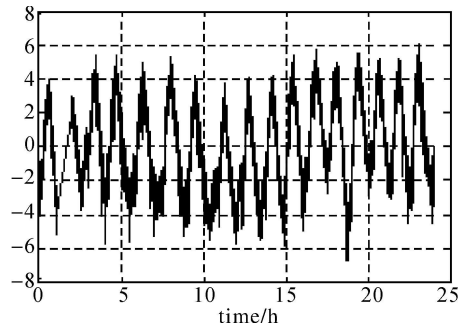


图 2 北斗接收机多径误差

Fig. 2 Multipath error of receiver

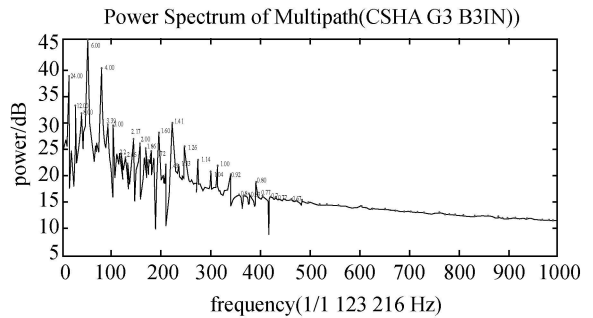


图 3 多径误差的频域特性

Fig. 3 Characteristic of multipath error in frequency domain

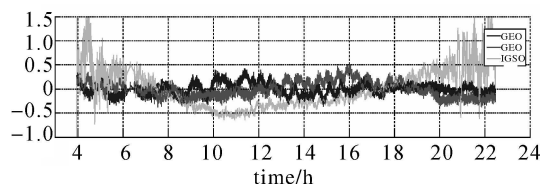


图 4 不同轨道卫星下宽波束天线的多径误差

Fig. 4 Multipath error of wide beam antenna in different kinds of satellite orbit

窄波束天线接收机的多径测量误差可从图 5 中得到对比, 其中(a)为 GEO 卫星, (b)为 IGSO 卫星。窄波束天线的方向图较窄, 相对于宽波束天线, 地面反射的多径信号进入天线的概率要小很多。短时快变的误差在图中基本没有体现, 误差主要表现出长时缓变的特性, 近似以 24 h 为周期重复。

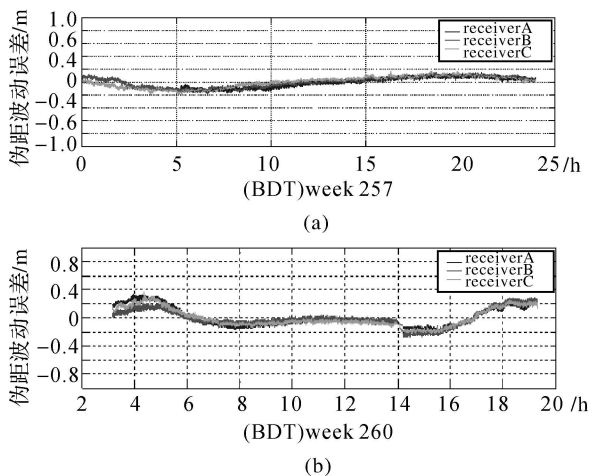


图 5 不同轨道卫星下窄波束天线的多径误差
Fig.5 Multipath error of narrow beam antenna in different kinds of satellite orbit

国外星基增强系统专家在研究利用星基增强系统 GEO 卫星播发的导航信号进行测距时发现, 由于 GEO 卫星在空间中几乎是固定的, 某些多径干扰随时间的变化是非常缓慢的, 这就增加了出现所谓的固有多径 (standing multipath) 的可能性, 进而降低了测距性能^[4]。图 6 给出了 Houston B thread site 的固有多径误差, 与图 4 和图 5 中得到的现象具有类似的规律。

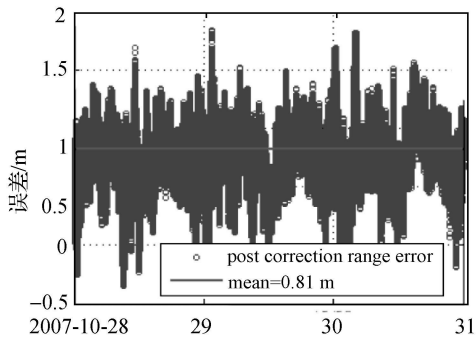


图 6 Houston B thread site 的固有多径误差
Fig. 6 Standing multipath on CRE measurements from Houston

Raytheon 公司的专家对此作了进一步的阐述, 在利用 GPS 卫星进行伪距测量时, 多径效应在卫星的一次过境时间内通常会平均到 0。而 GEO 卫星的伪距观测值由于卫星位置几乎是固定的, 更容易受到多径的影响: 或者很缓慢地平均到零, 或者会平均到一个偏移值。接收机和卫星之间的几何位置关系稍有改变, 就会带来伪距中多径误差的变化, 因而 GEO 卫星的正常在轨运动会带来伪距中多径误差偏移值的变化。实测数据分析表明, 在多数参考站中这种固有多径误差在 1 m 左右, 但在 2~ 3 个参考站这种误差可达到 2 m 以上^[4]。

德国的研究人员在研究 SBAS 的载波相位观测测量时提到, 静止接收机的 SBAS 载波相位观测测量中会出现周期变化的偏移量。他们认为对于 GPS 卫星, 多径造成载波相位观测量的波动会随着卫星位置的变化按照数分钟的周期变化; 但对于 SBAS 系统中的 GEO 卫星, 由于卫星运动极为缓慢, 多径会带来载波相位观测测量中周期变化的偏移。图 7 给出的两颗 EGNOS 系统中 GEO 卫星载波相位双差结果变化图较为清晰地说明了这一问题。

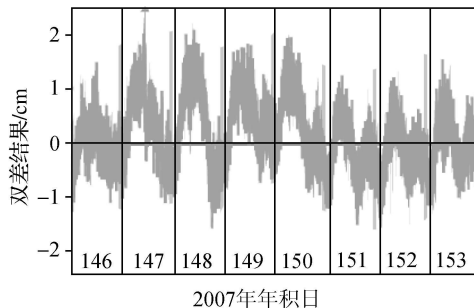


图 7 EGNOS 系统中 GEO 卫星载波相位双差变化
Fig. 7 Double difference carrier phase L1 residuals of PRN 120 and PRN 126 in a short static baseline

相关数据和研究表明, 静止接收机利用 GEO 卫星播发的导航信号进行测距时会出现固有多径的现象, 具有长时缓变的特性且波动幅度较大, 利用载波相位进行测量时也有类似现象。

可以初步判断, 地面反射引发的多径误差主要表现短时快变特性。引发长时缓变误差的成因是否包含卫星环境、卫星轨道类型及运动特性等因素, 应成为多径效应机理研究的重要内容。

2.4 信号模型

虽然无法用准确的模型来表征多径信号与直

达信号的几何关系和传输特性,但接收机端只关注输入信号的幅度、延迟和相位信息,可用合成信号的形式来表达多径信号。

含有 N 路多径信号的合成信号可表示为

$$s(t) = Ap(t - \tau_0)\cos(\omega_0 t + \theta_0) + A \sum_{n=1}^N \alpha_n p(t - \tau_0 - \tau_n)\cos(\omega_n t + \theta_n) \quad (1)$$

其中,第一项表示直达信号,第二项表示 N 路多径信号; A 为直达信号幅度; p 为调制了数据的伪码序列; τ_0 为直达信号的延迟; ω_0 为直达信号的多普勒频率; θ_0 为直达信号初相位; α_n 为第 n 路多径信号幅度与直达信号幅度之比; τ_n 为第 n 路多径信号的延迟; ω_n 为第 n 路多径信号的多普勒频率; θ_n 为第 n 路多径信号的初相位。

另外,定义残余多普勒频率为

$$f_{M,n}(t) = \frac{d[(\omega_n - \omega_0)t + (\theta_n - \theta_0)]}{dt} \quad (2)$$

$f_{M,n}(t)$ 是第 n 路多径信号相对于直达信号的残余多普勒频率,也称衰落频率(fading frequency)。

星地之间的相对动态会使多径信号与直达信号之间的相位关系存在时变特性,本文将在此模型的基础上通过定量的仿真,试图分析多径效应的动态特性对码跟踪环路性能的影响,进而分析星地之间的相对动态所引发的多径误差变化。

3 多径误差对码跟踪性能的影响仿真

多径信号的幅度、延迟、初相、相位变化率共同决定了合成信号的特性^[6]。

存在多径信号时,如果仅研究多径误差包络,对码跟踪环路影响最坏的情况,是假定多径信号的相位变化率为 0,且初相位于 $\theta_0 \pm 180^\circ$ 处。而本文关注于相位变化率不为 0 时的情况,通过对鉴相器和环路的仿真,分析相位变化率对码跟踪性能的影响,这不同于多径误差包络,更接近于真实接收机的处理。

3.1 直接鉴相仿真

直接鉴相仿真,通过仿真合成信号的伪码自相关函数、码鉴相曲线,以及鉴相曲线的过零点轨迹,观察多径信号对码跟踪的影响。其基本思路如下。

3.1.1 码自相关函数

输入参数:直达信号幅度,多径信号幅度,多径延迟。

直达信号自相关函数为三角形,合成信号的自相关函数为两者的叠加(如图 8 所示)。多径信号的相位决定了做图时使用的直达信号和多径信号的幅度。

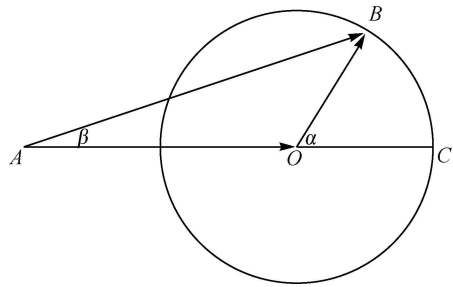


图 8 多径信号与直达信号的矢量合成

Fig. 8 Vector signal of direct signal and multipath signal

如图 8 所示, AO 为直达信号,幅度为 A 。 OB 为多径信号,幅度为 $0.5A$ ($\alpha = 0.5$)。 AB 为合成信号, α 为多径信号相位, β 为合成信号相位。

当稳定跟踪时,接收机跟踪到合成信号 AB 。在计算自相关函数时,直达信号的幅度为 $A \cos \beta$,多径信号的幅度为 $0.5A \cos(\alpha - \beta)$ 。

仿真时假设稳定跟踪合成信号,因而没有考虑环路滤波对码跟踪的影响。

3.1.2 鉴相曲线

输入参数:鉴相器间距,码自相关函数。

计算方法:由码自相关函数进行计算,使用早、迟相关器。

3.1.3 鉴相曲线过零点

计算方法:利用鉴相曲线所得数据,寻找其中的符号跳变点,在两个跳变点间进行线性插值,得到过零点对应的码相位。

图 8 中矢量合成信号的鉴相误差及鉴相曲线如图 9 及图 10 所示。其中,相关器间隔为 0.1 个码片,多径延迟为 0.1 个码片,残余多普勒频率为 1 Hz。

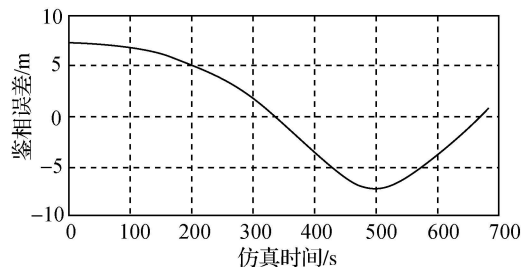


图 9 鉴相误差曲线

Fig. 9 Error curve of discriminator

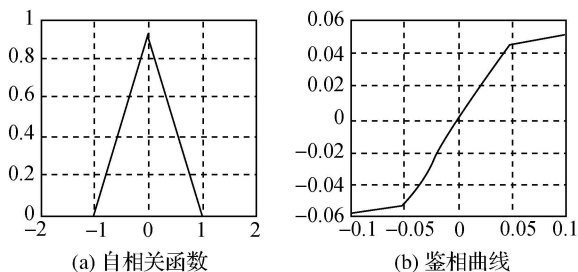


图 10 鉴相仿真结果

Fig. 10 Simulation result of discriminator

3.2 环路仿真

使用实际环路进行仿真, 可以观察到环路滤波对跟踪误差的影响。

延迟锁定环使用二阶 DLL, 双线性积分器。锁相环使用三阶 PLL, 双线性积分器。

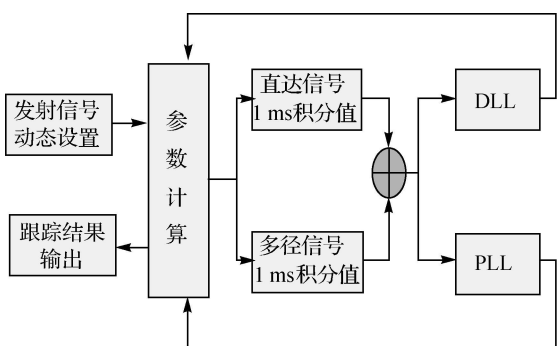


图 11 接收环路组成

Fig. 11 Frame of receiver's loop

3.3 仿真结果及分析

通过一定的轨道模型, 计算出星地相对运动时多径信号中的动态特性(衰落频率), 基于软件模拟的导航信号来仿真此动态特性对码跟踪环路的影响。试验条件如表 1 所示。

表 1 仿真试验环路参数设置

Tab. 1 Configuration of parameter in loop simulation

环路参数	设定值
相关器间隔/ 码片	0.1
多径信号延迟/ 码片	0.1
多径信号初相/ 度	0
码环带宽/ Hz	0.03
载波环带宽/ Hz	0.5
多径信号相对直达信号幅度/dB	-3
预检测积分时间/ ms	1

在环路参数设置相同的条件下, 对残留多普勒频率分别为 0.001 Hz 和 0.05 Hz 的两组数据进行仿真试验, 其结果如图 12、图 13 所示。

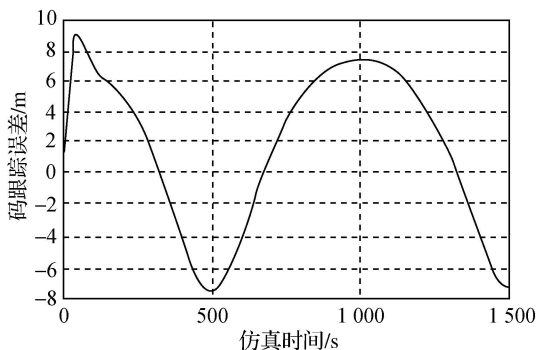


图 12 残留多普勒频率 0.001 Hz 时的码跟踪误差 (仿真时间 1 500 s)

Fig. 12 Code tracing error when fading-frequency is 0.001 Hz (simulation for 1 500 s)

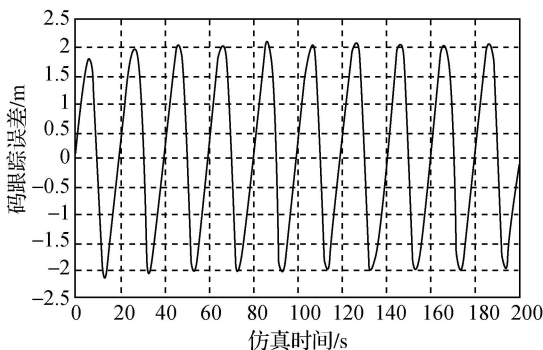


图 13 残留多普勒频率 0.05 Hz 时的码跟踪误差 (仿真时间 1 500 s)

Fig. 13 Code tracing error when fading-frequency is 0.005 Hz (simulation for 1 500 s)

从图 12 和图 13 可以看出, 在多径信号具有相同幅度、延迟和初相的条件下, 由于码跟踪环路表现出低通滤波的作用, 当衰落频率接近或大于环路带宽时, 多径对码跟踪精度的影响会在一定程度上被滤除。

4 结论

以往对多径的研究, 都关注于在最坏情况下的多径误差界, 研究中假设多径信号的相位不变, 且处于多径信号对跟踪误差贡献最大的位置。实际上, 这种假设过高地估计了多径信号对跟踪误差的影响, 不完全符合实际情况。

接收机与卫星之间的相对运动, 对于直达信号和多径信号的影响是不同的。在接收机的信号处理过程中, 跟踪的是直达信号与多径信号的合成信号, 多径信号本身存在残余的动态特性, 会影响接收机的码跟踪精度。由于环路滤波的作用,

这种多径信号的动态却可能削弱了多径信号对跟踪误差的影响。

码跟踪环路对多径效应的不同动态特性具有不同的滤波作用,合理选择环路参数,可利用多径信号的动态削弱多径误差的影响。反过来,基于对多径效应动态特性的影响研究,可以从后处理数据的变化规律中进行逆向推导,有助于分析并推测出多径效应引发长时缓变误差的机理。这也是本文后续工作中所需要关注的重要问题。

参考文献:

- [1] PARINSON B W, SPILKER J J, AXELRAD P. Global Positioning System: Theory and Applications: 1[M]. [S. l.]: AIAA, 1996, 547-568.
- [2] ZHANG Mengyang, LV Baoxiong. Analyses of Multipath Effects in the GPS System [J]. Chinese Journal of Electronics, 1998, 26(3): 195-197. (张孟阳, 吕保雄, 宋文森. GPS 系统中的多径效应分析 [J]. 电子学报, 1998, 26(3): 195-197.)
- [3] LIU Huihui. Disquisition on Multipath Mitigation Algorithm in Spread-spectrum Ranging Systems [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (刘荟萃. 扩频测距系统中的多径消除算法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.)
- [4] SCHEMPP T, BURKE J, RUBIN A. WAAS Benefits of GEO Ranging [C] // Proceedings of ION GNSS 2008. Savannah: [s. n.], 2008: 1903-1910.
- [5] WANNINGER L, WALLSTAB-FREITAG S. Combined Processing of GPS, GLONASS, and SBAS Code Phase and Carrier Phase Measurements [C] // Proceedings of ION GNSS 2007. Fort Worth: [s. n.], 2007: 866-875.
- [6] MISRA P, ENGE P. Global Positioning System-Signals, Measurements, and Performance [M]. Lincoln: Ganga-Jamuna Press, 2001: 308-313.

(责任编辑:马保马)

-
- 收稿日期: 2011-01-28
修回日期: 2011-03-28
- 第一作者简介: 刘思慧(1983—), 男, 博士生, 研究方向为卫星导航接收机。
- First author: LIU Sihui (1983—), male, PhD candidate, majors in satellite navigation receiver.
- E-mail: landlover.vivian@gmail.com

(上接第 88 页)

- [7] JIANG Pucheng, WU Tanran, ZHANG Yuhuan. The Developing Conditions and Tendency of Near Space Airship [J]. Space Electronic Technology, 2008, 5(3): 5-10. (蒋谱成, 武坦然, 张宇涵. 近地空间飞艇发展现状与趋势 [J]. 空间电子技术, 2008, 5(3): 5-10.)
- [8] ZHANG Zhi, YUAN Jianping, CHEN Shilu. Applications of GPS in Space [J]. Journal of Astronautics, 1996, 17(3): 68-71. (张志, 袁建平, 陈士鲁. GPS 的空间应用 [J]. 宇航学报, 1996, 17(3): 68-72.)
- [9] LIU Huijie, ZHANG Naitong. Research of Space Coverage Property for GPS Constellation [J]. High-tech Communication, 1999(12): 1-5. (刘会杰, 张乃通. GPS 星座的空间覆盖特性研究 [J]. 高技术通讯, 1999(12): 1-5.)
- [10] MAO Kecheng, SUN Fuping, LI Hongtao, et al. Modeling and Simulation of GPS Signal Blockage Based on Space

Resection [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2007, 27(4): 36-40. (毛克诚, 孙付平, 李洪涛, 等. 基于空间交会 GPS 信号遮挡模型的建模与仿真 [J]. 海洋测绘, 2007, 27(4): 36-40.)

(责任编辑:马保马)

-
- 收稿日期: 2011-1-25
修回日期: 2011-3-25
- 第一作者简介: 李建文(1971—), 男, 副教授, 主要研究卫星导航系统测试及导航定位应用。
- First author: LI Jianwen (1971—), male, associate professor, majors in satellite navigation system test and navigation & positioning applications.
- E-mail: zljw@126.com