

1-4-2019

Assessment and Verification of Code-carrier Coherence on BDS

Dongxia Li

College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Fuhan Song

College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Ruihua Liu

College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Assessment and Verification of Code-carrier Coherence on BDS

Abstract

Abstract: In order to verify code-carrier coherence on BeiDou Navigation Satellite System (BDS), the monitoring and assessment system of code-carrier coherence on BDS is designed. *Code-Carrier Divergence (CCD) monitor is designed to detect the anomaly status of ionosphere, and based on the detection results, ionosphere delay error is eliminated by using Divergence-Free Smoothing (DFree) or Ionosphere-Free Smoothing (IFree) separately.* The values of integer ambiguity are calculated based on tri-frequency ambiguity decomposition model, and the cycle slip is detected by using tri-frequency pseudorange code and combination of carrier phase. Assessment and verification of code-carrier coherence can be conducted. It is proved by experimental results data that the deviations of code-carrier coherence on different frequencies are fluctuating within a little range for most BDS satellites and the range is less than 6.1 m.

Keywords

code-carrier coherence, Code-carrier Divergence (CCD) Monitor, Divergence-Free Smoothing (DFree), Ionosphere-Free Smoothing (IFree)

Recommended Citation

Li Dongxia, Song Fuhan, Liu Ruihua. Assessment and Verification of Code-carrier Coherence on BDS[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(10): 3949-3957.

北斗系统测距码与载波一致性评估与验证

李冬霞, 宋馥含, 刘瑞华

(中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300)

摘要: 为验证北斗系统测距码与载波一致性, 设计了北斗系统测距码与载波相位一致性监测与评估系统。设计码-载波偏离(Code-Carrier Divergence, CCD)监测器判断电离层异常状态, 并基于状态检测结果分别使用 Divergence-Free Smoothing (DFree) 方法与 Ionosphere-Free Smoothing (IFree) 方法消除电离层延迟误差; 根据三频模糊度分解模型解算整周模糊度, 利用三频码伪距/载波相位组合法求解周跳; 进行测距码与载波一致性评估与验证。实验数据表明北斗系统大部分卫星不同频率上测距码与载波一致性偏差波动范围较小, 不超过 6.1 m。

关键词: 测距码与载波一致性; CCD 监测器; DFree; IFree

中图分类号: TN967.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 10-3949-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201810042

Assessment and Verification of Code-carrier Coherence on BDS

Li Dongxia, Song Fuhan, Liu Ruihua

(College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to verify code-carrier coherence on BeiDou Navigation Satellite System (BDS), the monitoring and assessment system of code-carrier coherence on BDS is designed. Code-Carrier Divergence (CCD) monitor is designed to detect the anomaly status of ionosphere, and based on the detection results, ionosphere delay error is eliminated by using Divergence-Free Smoothing (DFree) or Ionosphere-Free Smoothing (IFree) separately. The values of integer ambiguity are calculated based on tri-frequency ambiguity decomposition model, and the cycle slip is detected by using tri-frequency pseudorange code and combination of carrier phase. Assessment and verification of code-carrier coherence can be conducted. It is proved by experimental results data that the deviations of code-carrier coherence on different frequencies are fluctuating within a little range for most BDS satellites and the range is less than 6.1 m.

Keywords: code-carrier coherence; Code-carrier Divergence (CCD) Monitor; Divergence-Free Smoothing (DFree); Ionosphere-Free Smoothing (IFree)

引言

全球定位系统(Global Positioning System, GPS)



收稿日期: 2016-09-01 修回日期: 2016-11-01;

基金项目: 民航安全能力建设基金(AADSA0007);

作者简介: 李冬霞(1971-), 女, 陕西绥德, 博士, 副教授, 研究方向为航空移动通信、甚高频数据链。

是当前国际民航主用的卫星导航系统, 出于主权和国家安全考虑, 中国民航未来应用的卫星导航系统, 必将是以自主建设、独立运行的北斗系统为基础, 兼容 GPS 等多导航星座的综合性系统^[1-2]。而北斗卫星信号能否满足民用航空导航性能需求, 需要进行全面的性能测试、指标验证与评估。

全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite

<http://www.china-simulation.com>

• 3949 •

System, GNSS)信号质量直接影响导航性能。国外许多研究机构,如美国斯坦福大学、德国宇航研究院、欧洲空间局等机构,积极开展GPS和Galileo系统信号质量监测与评估方面的研究,研究内容包括卫星信号异常探测,码跟踪误差监测与分析,误码率监测等^[3]。在国内,多家研究单位对北斗空间信号质量进行监测与评估,主要通过对信号功率、频谱等特性的长期监测,利用伪距和载波相位等观测量评估信号的稳定性、一致性等主要性能^[4-5]。

GNSS接收机对每颗卫星产生伪距和载波相位两个基本距离观测值。在理想情况下,同一颗卫星在同一频率上相邻两个历元的测码伪距与测相伪距之差相等(即满足测距码与载波的一致性)。由于受电离层延迟效应、多路径的影响,以及由于卫星发射源的不理想性,导航信号的测距码与载波表现出不同的传输特性,导致二者不一致^[3-5]。测距码与载波的一致性(Code-Carrier Coherence)是监测卫星信号质量,判断系统能否满足导航定位精度和可靠性需求的重要指标。国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)对GNSS码载波发散有专门求解方法与指标要求,以GPS民用监测性能规范的具体指标要求为例:在任意100~7200 s时间间隔内,测距码与载波一致性偏差小于6.1 m^[6]。针对北斗系统的民用监测性能规范并没有纳入ICAO规定的GNSS标准,因此有必要对北斗系统测距码与载波一致性开展测试与验证。

本文利用单点多频接收机接收并处理多颗北斗卫星原始观测信号,开展北斗系统在B1频率(1561.098 MHz),B2频率(1207.14 MHz)和B3频率(1268.52 MHz)测距码与载波一致性监测,验

证其是否满足民用监测性能规范规定的码与载波一致性要求。

1 测距码与载波一致性评估方案

测距码与载波一致性评估之前需要对单点多频接收机接收的原始观测数据进行预处理,包括电离层误差消除,整周模糊度解算,探测并修复周跳,以及卫星硬件延迟偏差与接收机硬件延迟偏差确定等。测距码与载波一致性评估整体过程如图1所示,图中各模块的关键技术简要说明如下。

电离层是一个不断变化的开放系统,总体处于复杂的非线性状态^[7]。电离层呈现出的复杂空间变化产生不同的电离层延迟误差,它是导致伪距与载波相位不一致的重要原因。典型的电离层误差消除模型有IRI模型,Bent模型,Klobuchar模型,低阶球函数模型等^[8]。这些模型在应用过程中并未考虑电离层状态异常变化情况(如电离层风暴)。故本文测距码与载波相位一致性监测与评估方案中设计了码载波偏离(Code-Carrier Divergence, CCD)监测器。CCD监测器实时监测电离层的状态,在正常状态和极度异常状态下分别使用2种不同的电离层延迟消除方法,以便更好地消除电离层误差对测距码与载波相位一致性监测结果的影响。

考虑到多频组合数据的处理不仅可以提高定位精度,而且可以提高原始数据预处理的质量,本系统通过Melbourne-Wubben组合(简称MW组合)求出组合观测值的整周模糊度值,再利用三频模糊度分解模型解算单频载波的整周模糊度值^[9];然后使用三频码伪距/载波相位组合方法探测并修复周跳^[10]。

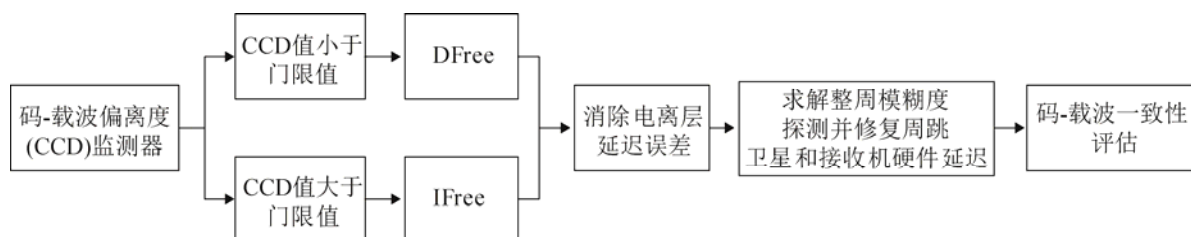


图1 测距码与载波一致性评估方法流程图

Fig. 1 Processing steps of code-carrier coherence assessment

北斗卫星发射的 3 个载波信号在卫星和接收机内部信号通道中存在时延差。为消除该硬件延迟, 首先利用双频观测量提取电离层斜向总电子含量(Total Electron Content, TEC), 然后通过卫星仰角和天顶角得到穿刺点处 TEC, 最后利用卡尔曼滤波法估算硬件延迟^[11]。

由于篇幅所限, 本文仅给出详细的电离层误差消除方法以及码与载波一致性检测结果, 整周模糊度的解算以及硬件延迟处理结果未列出。

2 电离层误差消除方法

2.1 CCD 监测器设计

CCD 监测包括 CCD 偏离度估计和校验两部分^[12-13], 通过将监测值与合适的 CCD 检测门限进行比较, 来判断电离层是否出现异常, 并选择 Divergence-Free Smoothing (DFree) 方法或 Ionosphere-Free Smoothing (IFree) 方法消除电离层延迟误差^[14]。

CCD 估计模型如图 2 所示, 该模型由 2 个一阶线性时不变滤波器组成。

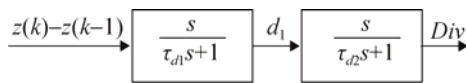


图 2 CCD 估计模型

Fig. 2 CCD estimation model

由伪码原始观测量与载波原始观测量计算所得的伪距差值为图 2 模型的输入量, 其输出量为 CCD 检测统计量 Div , 表达式为:

$$d_1(k) = \frac{\tau_{d1} - T}{\tau_{d1}} d_1(k-1) + \frac{1}{\tau_{d1}} (z(k) - z(k-1)) \quad (1)$$

$$Div(k) = \frac{\tau_{d2} - T}{\tau_{d2}} Div(k-1) + \frac{T}{\tau_{d2}} d_1(k) \quad (2)$$

式(1)、式(2)中: τ_{d1} 和 τ_{d2} 代表相应滤波器的时间常数; T 代表卫星信号原始观测量的时间间隔; $z(k)$ 代表 k 时刻伪码原始观测量与载波相位原始观测量计算得到的伪距之差, 可以表示为 $z(k) = \rho(k) - \varphi(k)$, 其中, $\rho(k)$ 为 k 时刻伪码原始观测量, $\varphi(k)$ 为 k 时刻载波相位原始观测量。

检测门限是影响 CCD 监测结果的关键因素, 其确定思路如下: 将全部卫星的原始观测值作为一个整体, 不考虑仰角小于 10 度的卫星, 计算 CCD 检测统计量 Div 的值; 然后将其根据卫星仰角划分为 8 组, 每一组包含仰角差值为 10° 之内的所有卫星, 计算每一组 Div 的均值 μ_e 和标准差 σ_e 。假设 CCD 检测统计量服从高斯分布, 则检测门限 Th_e 可以表示为^[15]:

$$Th_e = \mu_e \pm K\sigma_e \quad (3)$$

为了保持恒虚警概率(1.98×10^{-9}), 通常令膨胀系数 $K = 6$ 。

估计模型中滤波器时间常数选取越大, 检测统计量的标准差就会越小, 即检测统计量 Div 的稳定性越好; 如果滤波器时间常数选取过小, 膨胀系数 K 将会变大, 进而导致检测统计量的概率密度函数偏离正态分布, 减小 CCD 监测器的可用性。本文在保证 CCD 监测器可用性的前提下选取较小的滤波器时间常数来判断 CCD 的监测效果。

2.2 DFree 方法

多频数据处理技术可以有效的减轻或移除电离层延迟误差。DFree 方法以双频载波观测量的线性组合作为码减载波(Code Minus Carrier, CMC)计算中的载波量, 以便消除码载波发散的影响。在电离层正常或者适度异常状态下, 对应于 CCD 检测值小于检测门限的情况, 使用 DFree 方法来消除电离层延迟误差^[16]。北斗系统卫星钟差参考点为卫星 B3 频点发射天线相位中心, 因此, 北斗系统 B3 频点单频用户不需要进行卫星的硬件延迟频间偏差(the time group delay, TGD)参数修正, 而北斗其他单频用户或双频用户均需要进行 TGD 修正。其 B1 频点和 B2 频点的码伪距与载波相位线性组合表示如下:

$$\rho_1 = r + I_1 + IFB + \tau_{gd} + \varepsilon_{\rho_1} \quad (4)$$

$$\phi_1 = r - I_1 + IFB + \tau_{gd} + N_1 + \varepsilon_{\phi_1} \quad (5)$$

$$\phi_2 = r - (f_1^2 / f_2^2) I_1 + IFB + \tau_{gd} + N_2 + \varepsilon_{\phi_2} \quad (6)$$

$$\Phi_{12} = \phi_1 - \frac{2}{\alpha} (\phi_1 - \phi_2) = r + I_1 + N_{12} + IFB + \tau_{gd} \quad (7)$$

$$\alpha = 1 - f_1^2 / f_2^2 \quad (8)$$

$$N_{12} = N_1 - \frac{2}{\alpha}(N_1 - N_2) \quad (9)$$

式(4)-(9)中: ρ_1 代表 B1 频率上的测码伪距; ϕ_1 代表 B1 频率上的测相伪距; ϕ_2 代表 B2 频率上的测相伪距; Φ_{12} 代表利用 B1 频率与 B2 频率载波相位组合观测值得到的测相伪距; r 代表卫星与接收机之间的真实几何距离; I_1 代表 B1 信号载波频率上电离层延迟; $\varepsilon_{\rho 1}$ 代表 B1 信号载波频率上伪码相位观测量的多径和接收机噪声之和; $\varepsilon_{\rho 2}$ 代表 B2 信号载波频率上伪码相位观测量的多径和接收机噪声之和; N_{12} 代表 DFree 方法中载波相位组合观测值的整周模糊度值; N_1 、 N_2 分别为 B1、B2 载波的整周模糊度值; f_1 、 f_2 为分别为 B1、B2 载波的频率; IFB 代表接收机的硬件延迟频间偏差参数; τ_{gd} 代表卫星的硬件延迟频间偏差参数。

同理, B2 频点与 B3 频点之间的码伪距与载波相位线性组合表示如下:

$$\rho_2 = r + I_2 + IFB + \tau_{gd} + \varepsilon_{\rho 2} \quad (10)$$

$$\Phi_{23} = r + I_2 + N_{23} + IFB + (1 - \frac{2}{\beta})\tau_{gd} \quad (11)$$

$$\beta = 1 - f_2^2 / f_3^2 \quad (12)$$

$$N_{23} = N_2 - \frac{2}{\beta}(N_2 - N_3) \quad (13)$$

式(10)~(13)中: ρ_2 代表 B2 频率上的测码伪距; Φ_{23} 代表利用 B2 频率与 B3 频率载波相位组合观测值得到的测相伪距。

B3 频点与 B1 频点之间的码伪距与载波相位线性组合分别表示如下:

$$\rho_3 = r + I_3 + IFB + \varepsilon_{\rho 3} \quad (14)$$

$$\Phi_{31} = r + I_3 + N_{31} + IFB + \frac{2}{\gamma} \cdot \tau_{gd} \quad (15)$$

$$\gamma = 1 - f_3^2 / f_1^2 \quad (16)$$

$$N_{31} = N_3 - \frac{2}{\gamma}(N_3 - N_1) \quad (17)$$

式(14)~(17)中: ρ_3 代表 B3 频率上的测码伪距; Φ_{31} 代表利用 B3 频率与 B1 频率载波相位组合观测值得到的测相伪距。

由式(4)~(17), 各个频率的码减载波可以分别

表示为:

$$\chi_{DFree1} = \rho_1 - \Phi_{12} = \varepsilon_{\rho 1} - N_{12} \quad (18)$$

$$\chi_{DFree2} = \rho_2 - \Phi_{23} = \varepsilon_{\rho 2} - N_{23} + \frac{2}{\beta} \cdot \tau_{gd} \quad (19)$$

$$\chi_{DFree3} = \rho_3 - \Phi_{31} = \varepsilon_{\rho 3} - N_{31} - \frac{2}{\gamma} \cdot \tau_{gd} \quad (20)$$

由式(18)、式(19)、式(20)得到各个频率的测码伪距, 分别表示为:

$$\rho_1 = \chi_{DFree1} + \Phi_{12} = \varepsilon_{\rho 1} + r + I_1 + IFB + \tau_{gd} \quad (21)$$

$$\rho_2 = \chi_{DFree2} + \Phi_{23} = \varepsilon_{\rho 2} + r + I_2 + IFB + \tau_{gd} \quad (22)$$

$$\rho_3 = \chi_{DFree3} + \Phi_{31} = \varepsilon_{\rho 3} + r + I_3 + IFB \quad (23)$$

由式(21)~(23)可知, 电离层延迟 I_1 、 I_2 和 I_3 并没有被完全消除掉, 因此, 引入下文 IFree 方法。

2.3 IFree 方法

DFree 方法可以有效移除码载波发散的影响, 但是它不能完全移除电离层延迟误差。当电离层状态变化异常时, 电离层延迟需要完全消除才不会给卫星导航信号的传输带来影响。IFree 方法使用双频码观测量的线性组合和载波观测量的线性组合进行码减载波计算, 可完全消除电离层延迟。因此, 在电离层出现极端异常, CCD 检测值大于检测门限的情况下, 使用 IFree 方法来消除电离层延迟误差^[16]。

基于式(4)~(6)和式(10), IFree 方法码伪距组合与载波相位组合表示如下:

$$P_{12} = \rho_1 - \frac{1}{\alpha}(\rho_1 - \rho_2) = r + IFB + \tau_{gd} + \varepsilon_{\rho 1} - \frac{1}{\alpha}(\varepsilon_{\rho 1} - \varepsilon_{\rho 2}) \quad (24)$$

$$\Phi_{12} = \phi_1 - \frac{1}{\alpha}(\phi_1 - \phi_2) = r + N_{12} + IFB + \tau_{gd} \quad (25)$$

$$N_{12} = N_1 - \frac{1}{\alpha}(N_1 - N_2) \quad (26)$$

式(24)~(26)中: P_{12} 代表利用 B1 频率与 B2 频率码组合观测值得到的测码伪距; Φ_{12} 代表利用 B1 频率与 B2 频率载波相位组合观测值得到的测相伪距。

同理, B2 频点与 B3 频点之间的码伪距与载波相位线性组合表示如下:

$$P_{23} = r + IFB + (1 - \frac{1}{\beta})\tau_{gd} + \varepsilon_{\rho 1} - \frac{1}{\beta}(\varepsilon_{\rho 1} - \varepsilon_{\rho 2}) \quad (27)$$

$$\Phi_{23} = r + N_{23} + IFB + (1 - \frac{1}{\beta})\tau_{gd} \quad (28)$$

$$N_{23} = N_2 - \frac{1}{\beta}(N_2 - N_3) \quad (29)$$

式(27)~(29)中, P_{23} 代表利用 B2 频率与 B3 频率码组合观测值得到的测码伪距; Φ_{23} 代表利用 B2 频率与 B3 频率载波相位组合观测值得到的测相伪距。

B3 频点与 B1 频点之间的码伪距与载波相位线性组合表示如下:

$$P_{31} = r + IFB + \frac{1}{\gamma} \cdot \tau_{gd} + \varepsilon_{\rho 3} - \frac{1}{\gamma}(\varepsilon_{\rho 3} - \varepsilon_{\rho 1}) \quad (30)$$

$$\Phi_{31} = r + IFB + \frac{1}{\gamma} \cdot \tau_{gd} + N_{31} \quad (31)$$

$$N_{31} = N_3 - \frac{1}{\gamma}(N_3 - N_1) \quad (32)$$

式(30)~(32)中, P_{31} 代表利用 B3 频率与 B1 频率码组合观测值得到的测码伪距; Φ_{31} 代表利用 B3 频率与 B1 频率载波相位组合观测值得到的测相伪距。

由式(24)~(32), 各个频率的码减载波可以分别表示为:

$$\chi_{IFree1} = P_{12} - \Phi_{12} = \varepsilon_{\rho 1} - \frac{1}{\alpha}(\varepsilon_{\rho 1} - \varepsilon_{\rho 2}) - N_{12} \quad (33)$$

$$\chi_{IFree2} = P_{23} - \Phi_{23} = \varepsilon_{\rho 2} - \frac{1}{\beta}(\varepsilon_{\rho 2} - \varepsilon_{\rho 3}) - N_{23} \quad (34)$$

$$\chi_{IFree3} = P_{31} - \Phi_{31} = \varepsilon_{\rho 3} - \frac{1}{\gamma}(\varepsilon_{\rho 3} - \varepsilon_{\rho 1}) - N_{31} \quad (35)$$

由式(33)~(35)得到各个频率的测码伪距, 分别表示为:

$$P_{12} = \chi_{DFree1} + \Phi_{12} = \varepsilon_{\rho 1} - \frac{1}{\alpha}(\varepsilon_{\rho 1} - \varepsilon_{\rho 2}) + r + IFB + \tau_{gd} \quad (36)$$

$$P_{23} = \chi_{DFree2} + \Phi_{23} = \varepsilon_{\rho 2} - \frac{1}{\beta}(\varepsilon_{\rho 2} - \varepsilon_{\rho 3}) + r + IFB + (1 - \frac{1}{\beta})\tau_{gd} \quad (37)$$

$$P_{31} = \chi_{DFree3} + \Phi_{31} = \varepsilon_{\rho 3} - \frac{1}{\gamma}(\varepsilon_{\rho 3} - \varepsilon_{\rho 1}) + r + IFB + \frac{1}{\gamma} \cdot \tau_{gd} \quad (38)$$

由式(36)~(38)可知, 电离层延迟 I_1 、 I_2 和 I_3 已被完全消除掉, 但是 IFree 方法在消除电离层延迟

误差的同时会额外引入码相位误差。因此除非在电离层极端异常状态下使用 IFree 方法, 其他情况尽量使用 DFree 方法消除电离层延迟误差。

通过整周模糊度计算以及卫星与接收机硬件延迟的计算, 再分别计算同一颗卫星同一频率相邻 2 个历元的码减载波值, 即可评估北斗系统测距码与载波是否一致。

3 实测数据分析

3.1 实验参数

根据北斗多频接收机在中国民航大学实验室(北纬 39.112 588 661°, 东经 117.344 275 744°)于 2015-09-08~14 观测的 13 颗实际运行北斗卫星的原始观测数据, 以 2015-09-08~09 数据为例进行实测数据分析, 按照本文所给方法给出 CCD 监测器的判断结果和电离层延迟消除之后的测距码与载波一致性偏差。实验结果中卫星编号从 161~174 号的各颗卫星分别对应北斗系统 1~14 号星。实验环境的主要技术参数见表 1。

表 1 实验参数
Tab. 1 Experimental parameters

参数	值
北斗系统卫星运行数目/颗	13
滤波器时间常数 τ_{d1} /s	30
滤波器时间常数 τ_{d2} /s	30
卫星信号原始观测的时间间隔/s	5/100
接收卫星数据的起始日期	2015-09-08
接收卫星数据的截止日期	2015-09-14

3.2 实验结果

图 3 显示给出了北斗系统各颗卫星在 48 h 之内的 CCD 检测统计值随历元变化规律曲线。横轴代表历元序号, 纵轴代表 CCD 检测统计值(m)。从图中可以看出, 各颗卫星的 CCD 检测统计值大部分均分布在 0.3~1 m 范围内, 只有少数历元的 CCD 检测统计值小于 0.3 m 或大于 1 m。

图 4 显示给出了按不同卫星仰角划分的北斗系统各颗卫星 48 h 之内的 CCD 检测统计值, 横轴

代表卫星仰角($^{\circ}$), 纵轴代表 CCD 检测统计值(m)。从图中可以看出, 随着卫星仰角的增大, 各颗卫星的 CCD 检测统计值总体趋势变小, 只有极个别情况下, CCD 检测统计值出现过度变大或变小。图中横点线为不同卫星仰角范围内的 CCD 检测门限值(上限值与下限值)。除 $80^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围外, 其他卫星仰角范围内均存在 CCD 检测统计值超过上限值的现象, 说明对应区域电离层处于异常状态。

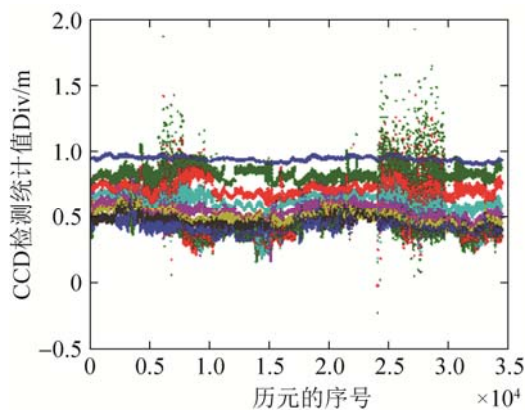


图3 北斗系统的 CCD 检测统计值(48 h)

Fig. 3 Statistical values of CCD monitoring on BDS (48 h)

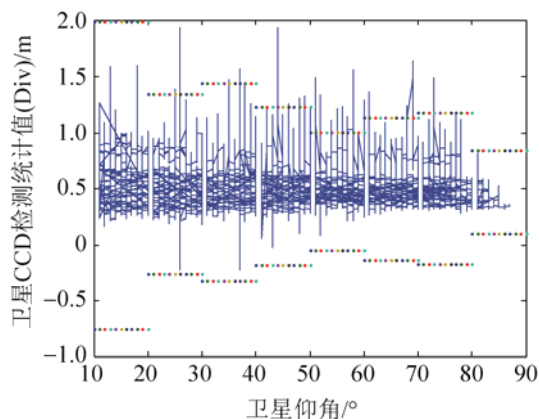


图4 北斗系统的 CCD 检测值(48 h)(按卫星仰角分类)

Fig. 4 Statistical values of CCD monitoring on BDS (according to elevation angle of satellite)

图5~7显示给出了北斗系统161号卫星分别在B1、B2、B3三个频段上时间间隔为100 s的码载波一致性偏差随历元变化规律曲线。从图中可以看出, 在大部分历元时刻, 161号卫星不同频率上的码载波一致性偏差均在 $-3\text{ m}\sim +3\text{ m}$ 范围内波动, 只有个别历元时刻卫星的码载波一致性偏差较大,

但不超过 6.1 m。

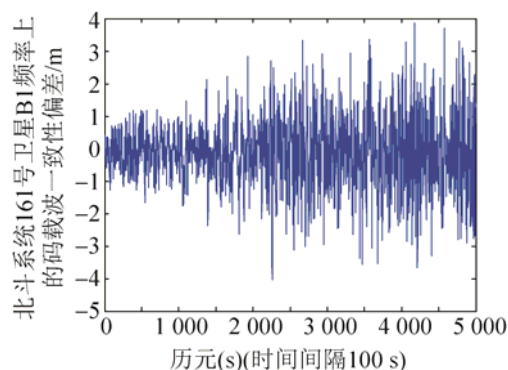


图5 北斗系统161号卫星B1频率上的码载波一致性偏差曲线(时间间隔100 s)

Fig. 5 Deviations of code-carrier coherence in the frequency B1 on BDS 161 satellite (time interval=100 s)

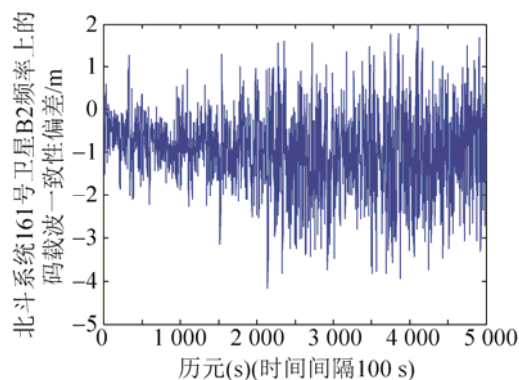


图6 北斗系统161号卫星B2频率上的码载波一致性偏差曲线(时间间隔100 s)

Fig. 6 Deviations of code-carrier coherence in the frequency B2 on BDS 161 satellite (time interval=100 s)

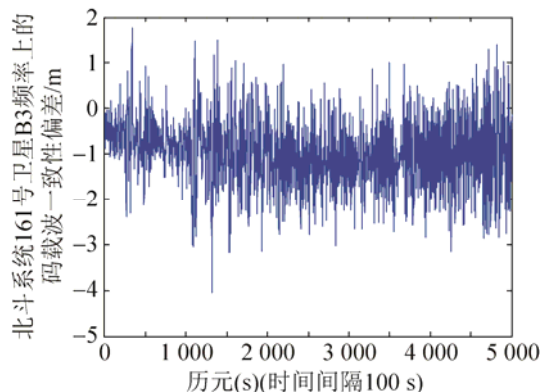


图7 北斗系统161号卫星B3频率上的码载波一致性偏差曲线(时间间隔100 s)

Fig. 7 Deviations of code-carrier coherence in the frequency B3 on BDS 161 satellite (time interval=100 s)

表2给出了实验中北斗系统13颗卫星分别在

B1、B2 和 B3 频率上的时间间隔为 100 s 的码载波一致性偏差的范围。从表中可以看出, 北斗系统大部分卫星不同频率上的码载波一致性偏差范围的绝对值均小于 6.1 m, 个别卫星不同频率上的码载波一致性偏差范围的绝对值超出了 6.1 m。

表 2 北斗各颗卫星码载波一致性偏差结果(时间间隔 100 s)
Tab. 2 Deviations of code-carrier coherence on BDS satellites (time interval=100 s)

卫星编号 PRN	码载波一致性偏差范围/m		
	B1 频率	B2 频率	B3 频率
161	-4.03~4.63	-5.01~3.66	-3.55~3.1
162	-1.35~1.22	-1.18~1.11	-1~0.91
163	-1.19~1.16	-2.21~1.8	-2.56~1.47
164	-5.6~5.27	-6~6	-6~5.6
165	-0.86~0.72	-1.43~1.59	-1.26~1.25
166	-6.1~11	-3~2.5	-6.1~5.1
167	-6.1~3	-7.5~5	-7.5~3.5
168	-9.5~3.4	-6~10.5	-6~9.5
169	-9~9	-6~4	-6~4
170	-8~5	-6~5	-6~5
171	-6~8	-5~8	-2~8
172	-8~10	-10~9	-10~9
174	-7~8	-8~10	-8~10

图 8~10 显示给出了北斗系统 161 号卫星在 B1 频率上时间间隔分别为 500 s、2 000 s 和 5 000 s 的码载波一致性偏差随历元变化规律曲线。从图中可以看出, 在大部分历元时刻, 161 号卫星不同频率上的码载波一致性偏差均在 -6.1 m ~ +6.1 m 范围内波动, 只有个别历元时刻卫星的码载波一致性偏差较大。

实验结果显示个别卫星的码载波一致性偏差较大, 主要原因是: (1) 由于周跳修复不够彻底, 导致卫星的码载波一致性偏差出现异常; (2) 由于各颗卫星所在运行轨道不同, 以及卫星仰角和方位角的不同, 导致其在传输过程中的码载波一致性偏差出现不一致; (3) 接收机性能并不是很好, 其接收卫星的原始信号精度不是很理想, 将数据进行处理之后得到的卫星的码载波一致性偏差偏大。

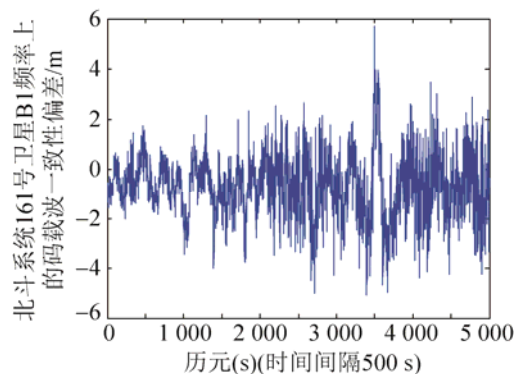


图 8 北斗系统 161 号卫星 B1 频率上的码载波一致性偏差曲线(时间间隔 500 s)

Fig. 8 Deviations of code-carrier coherence in the frequency B1 on BDS 161 satellite (time interval=500 s)

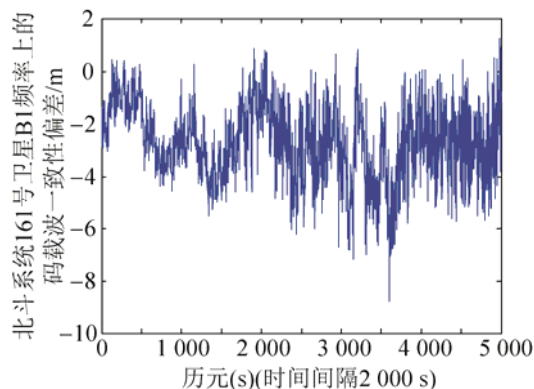


图 9 北斗系统 161 号卫星 B1 频率上的码载波一致性偏差曲线(时间间隔 2 000 s)

Fig. 9 Deviations of code-carrier coherence in the frequency B1 on BDS 161 satellite (time interval=2 000 s)

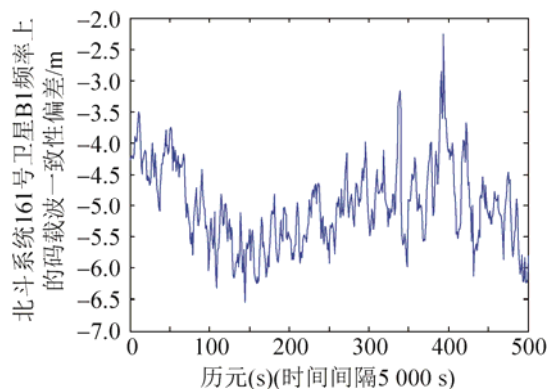


图 10 北斗系统 161 号卫星 B1 频率上的码载波一致性偏差曲线(时间间隔 5 000 s)

Fig. 10 Deviations of code-carrier coherence in the frequency B1 on BDS 161 satellite (time interval=5 000 s)

4 结论

本文建立北斗系统测距码与载波一致性监测与评估系统,考虑到电离层出现的异常现象,设计 CCD 监测器以更好地消除电离层延迟误差模型,实验测得北斗系统 13 颗卫星分别在 B1、B2 和 B3 频率上的不同时间间隔的码载波一致性偏差范围,验证了北斗系统大部分卫星在不同频段上的码载波一致性满足国际民航组织对卫星导航系统空间信号的性能要求。本文研究结论将对北斗系统应用于民航导航提供理论依据。

参考文献:

- [1] 吕小平. “北斗”在我国民用航空的发展和应 [J]. 中国民用航空, 2011, 128(8): 39-42.
Lv Xiaoping. The development and application of “BeiDou” in China’s civil aviation [J]. China Civil Aviation, 2011, 128(8): 39-42.
- [2] 吴海玲, 薛瑞, 王志鹏. 北斗卫星导航系统的国际民航标准化之路 [J]. 高科技与产业化, 2014, 217(6): 54-59.
Wu Hailing, Xue Rui, Wang Zhipeng. The path of International standardization of BeiDou Navigation Satellite System (BDS) [J]. High-Technology and Industrialization, 2014, 217(6): 54-59.
- [3] 贺成艳. GNSS 空间信号质量评估方法研究及测距性能影响分析 [D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2013.
He Chengyan. Research on Evaluation Methods of GNSS Signal Quality and the Influence of GNSS Signal on Ranging Performance [D]. Xi’an, China: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [4] 谢钢. GPS 原理与接收机设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 77.
Xie Gang. Principles of GPS and Receiver Design [M]. Beijing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 77.
- [5] 杨再秀, 郭晓峰, 杨丽云. GNSS 信号质量关键指标测试方法研究 [J]. 无线电工程, 2015, 45(6): 55-58.
Yang Zaixiu, Guo Xiaofeng, Yang Liyun. Measurement Methods of GNSS Signal Quality Key Assessment Indexes [J]. Radio Engineering, 2015, 45(6): 55-58.
- [6] Global Positioning System (GPS) Civil Monitoring Performance Specification [S]. Department of Transportation, United States, 2009: 12.
- [7] 魏传军. 基于地基 GNSS 观测数据的电离层延迟改正研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.
Wei Chuanjun. Study of Ionospheric delay Correction Based on GNSS Observations [D]. Xi’an, China: Chang’an University, 2014.
- [8] 刘东. 利用电离层延迟改正模型提高 GPS 高程测量值的精度的研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
Liu Dong. Study of measuring accuracy of GPS in elevation control by using ionospheric delay model [D]. Kunming, China: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [9] 原波. 基于 GPS 三频非差相位精密单点定位算法研究及程序实现 [D]. 北京: 清华大学, 2012.
Yuan Bo. The Algorithms and Program Implementation of Precise Point Positioning Based on GPS Tri-frequency Carrier Phase Observations [D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2012.
- [10] 熊伟, 伍岳, 孙振冰, 等. 多频数据组合在周跳探测和修复上的应用 [J]. 武汉大学学报, 2007, 32(4): 319-322.
Xiong Wei, Wu Yue, Sun Zhenbing, et al. Application of Cycle Slip Detecting and Repairing Using Multi-frequency Combination Observation [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 32(4): 319-322.
- [11] 李强, 冯曼, 张东和, 等. 基于单站 GPS 数据的 GPS 系统硬件延迟估算方法及结果比较 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(1): 149-156.
Li Qiang, Feng Man, Zhang Donghe, et al. Methods of Estimation of GPS Instrumental Bias from Single Steps GPS Data and Comparative Study of Results [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 44(1): 149-156.
- [12] Li L, Yang W X, Yang F X, et al. Code-Carrier Divergence for Ground Based Augmentation System: A Comparative Analysis Study [C]// Proceedings of the 34th Chinese Control Conference, Hangzhou, China, 2015. USA: IEEE, 2015: 5354-5358.
- [13] Dwarakanath V Simili, Boris Pervan. Code-Carrier Divergence Monitoring for the GPS Local Area Augmentation System [J]. Position, Location, and Navigation Symposium, 2006 IEEE/ION. USA: IEEE Xplore, 483-493.
- [14] Hiroyuki Konno, Sam Pullen, Jason Rife, et al. Ionosphere Monitoring Methodology for Hybrid Dual-Frequency LAAS [C]// Institute of Navigation (ION) Global Navigation Satellite Systems Conference, 2006. Texas, USA: Fort Worth Convention Center, 2006: 409-424.