

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2017.01.005

引用格式:刘建成,高皓,曹子春.利用参考波形估计导航信号测距偏差[J].电讯技术,2017,57(1):27-32.[LIU Jiancheng,GAO Hao,CAO Zichun.Navigation signal ranging bias estimation using reference waveform[J].Telecommunication Engineering,2017,57(1):27-32.]

利用参考波形估计导航信号测距偏差*

刘建成**,高皓,曹子春

(北京卫星导航中心,北京 100094)

摘要:针对卫星导航信号存在的微小信号畸变,研究了因导航信号畸变而引起的测距偏差的估计问题。基于理想矩形脉冲波形和真实信号波形的上升沿零交叉点信息,给出参考波形定义,并以此为基础估计测距偏差。该方法可用于定量评估卫星导航信号波形畸变对测距偏差的影响及比较卫星之间的测距差异。以二阶模型为基础产生畸变波形,验证了该方法的有效性,并分析了估计精度与信噪比关系。通过大口径天线采集“北斗”卫星 B1 频点信号,利用该方法获得了 B1 频点 I/Q 支路信号的测距偏差,表明该方法可用于在轨卫星信号的测距性能评估。

关键词:导航信号;信号质量监测;测距偏差;波形畸变;参考波形;2OS 模型

中图分类号:TN96 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2017)01-0027-06

Navigation Signal Ranging Bias Estimation Using Reference Waveform

LIU Jiancheng,GAO Hao,CAO Zichun

(Beijing Satellite Navigation Center,Beijing 100094,China)

Abstract:Aiming to the tiny distortion of satellite navigation signal,estimation of ranging bias caused by signal distortion is studied. Based on ideal rectangular pulse waveform and zeros crossing points of real signal waveform,a reference waveform is defined. According to the working principle of delay lock loop,a ranging bias estimation method based on reference waveform is proposed,which can be used to quantitatively estimate the impact of waveform distortion on ranging and compare the ranging differences among satellites. Ranging bias of the distorted signal waveform of second-order step(2OS) model verifies that the method is efficient,and relationship between estimation accuracy and signal-to-noise ratio(SNR) is analyzed. Finally the method is applied to collect navigation signals of Beidou or COMPASS satellites,which shows that the method can be used to ranging performance evaluation of in-orbit satellite signals.

Key words:navigation signal;signal quality monitoring;ranging bias;waveform distortion;reference waveform;second-order step model

1 引言

对于在轨卫星的导航信号质量监测,传统的方法包括频谱图、眼图、星座图、相关峰等,这些方法对于评估明显的信号异常是有效的^[1-3]。在轨健康卫星存在着微小信号异常^[4-5],但传统的信号质量监测方法无法分辨,而这些微小的信号异常导致的测距偏差将影响高精度应用的效果,因此,研究微小信号异常导致的测距偏差具有重要意义。

二阶模型(Second-Order Step model,2OS 模型)是国际民航组织认可的卫星导航信号畸变模型,该

* 收稿日期:2016-06-03;修回日期:2016-08-04 Received date:2016-06-03;Revised date:2016-08-04

** 通信作者:ljc-mymail@163.com Corresponding author:ljc-mymail@163.com

模型把数字电路故障、模拟电路故障和混合电路故障引起的畸变波形分别称为 TMA(Threat Model A)模型、TMB(Threat Model B)模型和 TMC(Threat Model C)模型,由超前/滞后参数、振荡频率和衰减因子等 3 个可变参数来定义^[6]。文献[7] 基于 2OS 模型研究了参数变化范围内的波形畸变引起的码跟踪偏差。如果能对在轨卫星发播信号的波形异常参数进行精确估计,则可完成对在轨卫星信号的测距性能评估。文献[6,8]在获得清晰脉冲波形的基础上,根据上升沿零交叉点和下降沿零交叉点之间距离与理论脉冲宽度的差异,获得了对 2OS 模型中超前/滞后参数的估计,给出了 GPS 在轨卫星 L1C/A 信号的 TMA 模型的超前/滞后参数。但目前没有文献描述 TMB 模型参数的估计方法,而且实际卫星信号波形与 TMB 模型之间存在明显差异^[8],因此,通过估计实际卫星信号波形的 2OS 模型参数无法实现对卫星信号的测距性能评估。

利用实际卫星信号直接估计其测距偏差的方法有文献[9-10]。文献[9]以码相关间距是 1 码片时的测距为基准,比较了其他相关间距下多颗卫星的测距差异,即所有卫星的测距均以相关间距为 1 个码片时的测距为参考获取其他相关间距的测距差异。实际上不同卫星在相关间距为 1 个码片时的测距仍是有偏差的,因此不能评估卫星间的测距差异。文献[10]利用伪码的周期性特征,基于 Vernier 采样原理对采集信号进行数据处理获得 1 个伪码周期的脉冲波形。在此基础上,对该波形起点位置进行精确估计,根据该起点位置产生超前和滞后本地波形,获得 E-L 鉴相器曲线,最后估计鉴相器曲线的零交叉点偏差,即为卫星导航信号畸变导致的测距偏差。该方法获得了“北斗”卫星 I 支路信号的测距偏差,但无法实现对无周期长码信号的测距偏差。

本文根据理想矩形脉冲和卫星发播信号波形的上升沿交叉点信息,定义了一种参考波形,为评估不同卫星测距偏差建立了一个参考基准,在此基础上给出了测距偏差估计方法。该方法既可用于估计 I 支路信号的测距偏差,也可用于估计无周期长码信号的测距偏差,且获得的测距偏差可用于评估卫星之间的测距差异。

2 参考波形定义

实际在轨卫星发播的导航信号均为非理想信

号,与理想矩形脉冲信号之间存在着差异,相对理想脉冲信号测量存在测距偏差。如果不同卫星间测距偏差是相同的,则对定位、定轨、时间同步等应用没有影响,因此,评估不同卫星间测距偏差的差异更为重要。这需要在不同卫星之间建立一个参考波形,所有卫星的测距偏差均基于该波形,因此,本文基于理想脉冲波形定义了一种参考波形,通过评估实际在轨卫星信号相对参考波形的测距偏差,来评估整个卫星星座的测距偏差差异。

本文定义的参考波形是一种理想矩形脉冲波形,且把实际在轨卫星信号波形的上升沿零交叉点作为参考波形上升沿零交叉点,脉冲宽度由伪码速率决定。参考波形与理想波形之间可能存在超前或滞后,但不同卫星之间的超前或滞后差异相对测距偏差而言可以忽略,即假设不同卫星之间上升沿从 -1 到 0 的持续时间是相同的。根据文献[1]给出的多颗 GPS 卫星 L1 信号的模拟畸变波形,不同卫星之间的差异主要表现在振荡波形的后期部分,而上升沿部分是一致的,因此,上述假设是合理的。

为直观表示参考波形与理想波形及实际卫星信号的关系,本文以 2OS 模型代表实际卫星信号,分析了参考波形、理想波形及 2OS 模型的差异。参考波形片段与 TMB 模型的关系如图 1 所示。参考波形与理想波形相比,均是理想矩形脉冲,但存在滞后偏差。参考波形与 TMB 模型相比,上升沿和下降沿的零交叉点位置均相同,但前者是平坦波形,后者是振荡波形。

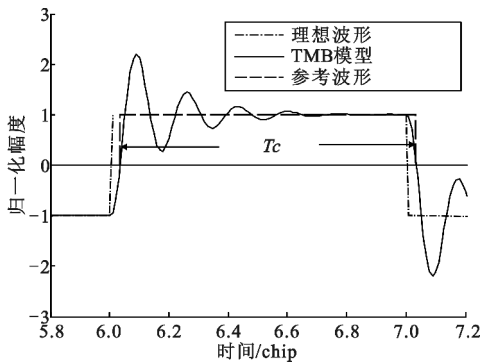


图 1 TMB 模型对应的参考波形
Fig.1 Reference waveform based on TMB model

参考波形片段与 TMC 模型的关系如图 2 所示。参考波形与 TMC 模型相比,上升沿零交叉点位置相同,下降沿零交叉点位置不同,且前者是平坦波形,后者是振荡波形。

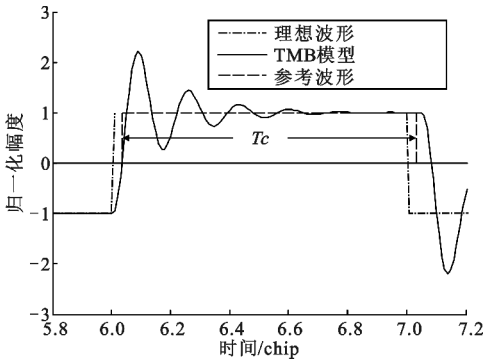


图2 TMC 模型对应的参考波形
Fig.2 Reference waveform based on TMC model

3 测距偏差估计方法

对于理想波形,其测距偏差是 0,但实际卫星发播信号波形相对参考波形存在测距偏差。该测距偏差可用于评估卫星发播信号的质量,是评估信号波形异常对测距影响程度的重要参数。

典型的导航接收机测距是通过延迟锁定环对接收信号的伪码跟踪来实现的。延迟锁定环由相关器、鉴相器、环路滤波器等构成。导航接收机的延迟锁定环尽可能地跟踪鉴相器曲线的零交叉点,使输入的码跟踪误差最小。如果导航接收机接收到正常导航信号,环路滤波器达到稳态时鉴相器输出为零,码跟踪误差也为零。但是,卫星导航波形畸变使鉴相曲线零交叉点偏离了码跟踪误差为零的位置,那么这个偏离量就是导航波形畸变引起的测距偏差的大小,即

$$\varepsilon = \arg \left\{ D_m(\hat{\tau}_0 - \tau_0) = 0 \right\} . \tag{1}$$

式中: ε 为测距偏差, $D_m(\hat{\tau}_0 - \tau_0)$ 为鉴相函数。

根据上述原理,测距偏差的估计方法如下:

- (1)根据码速率确定欠采样速率,对采集数据进行欠采样,通过判读符号产生本地码。
- (2)由采样数据的正负号变化确定所有零交叉点的粗略位置,以粗略位置为中心进行线性拟合,获得精确的零交叉点位置。
- (3)计算不同脉冲上升沿与第一个数据点的距离,并对码片宽度求模,求得不同上升沿对应的第一个数据点与伪码周期起点的距离。对不同上升沿对应的距离值进行平均,即为第一个数据点与伪码周期起点的距离估计值。
- (4)产生本地超前信号和本地滞后信号,分别与采集数据进行相关运算,然后求其差为鉴相器

曲线。

(5)对鉴相器曲线进行线性拟合,获得零交叉点位置。

(6)零交叉点与鉴相器曲线中心位置的距离即为测距偏差。测距偏差大于 0 为滞后,小于 0 为超前。

4 仿真分析

为验证基于参考波形的测距偏差估计方法,本文以 2OS 模型为基础产生畸变波形,并对估计精度进行分析。

4.1 2OS 模型畸变波形的测距偏差

4.1.1 TMB 模型

假设伪码码速率为 1.023 Mchip/s。考虑 3 种 TMB 模型参数:(1) $f_d = 2\text{ MHz}$, $\sigma = 4\text{ Mn/s}$; (2) $f_d = 2\text{ MHz}$, $\sigma = 6\text{ Mn/s}$; (3) $f_d = 6\text{ MHz}$, $\sigma = 6\text{ Mn/s}$ 。不同 TMB 模型参数可对应不同卫星的发播信号状态。图 3 给出了 3 种 TMB 模型参数下的测距偏差。可以看出,同一个 TMB 模型参数,测距偏差与相关间距有关,且不同 TMB 模型参数对应的测距偏差也不同。

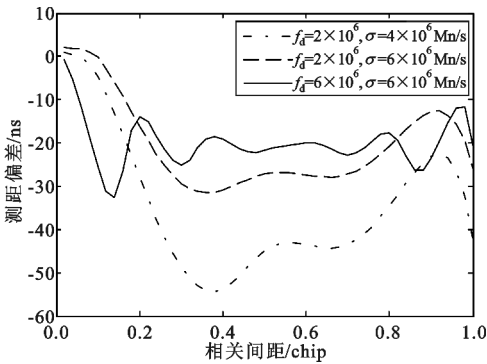


图3 TMB 模型的测距偏差
Fig.3 Ranging bias of TMB model

4.1.2 TMC 模型

伪码码速率参数同上,3 种 TMC 模型超前/滞后参数 Δ 均为 0.05,3 种 TMC 模型振荡频率和衰减因子参数 f_d 和 σ 同上节的 TMB 模型。不同 TMC 模型参数可对应不同卫星的发播信号状态。图 4 给出了 3 种 TMC 模型参数下的测距偏差。可以看出,同一个 TMC 模型参数,测距偏差与相关间距有关,且不同 TMC 模型参数对应的测距偏差也不同。比较图 3 和图 4 可以看出,后者相对前者滞后 25 ns 左

右,这是 TMC 模型超前/滞后参数 Δ 的影响。

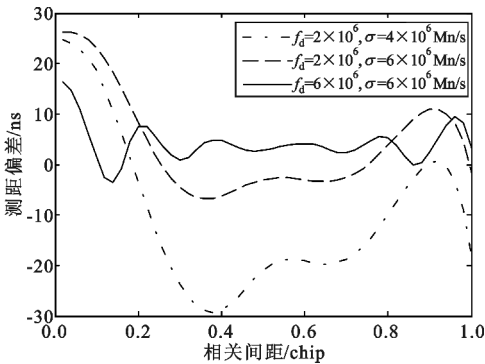


图 4 TMC 模型的测距偏差
Fig.4 Ranging bias of TMC model

4.2 测距偏差估计精度分析

为分析噪声对估计精度的影响,在产生畸变波形信号时,加上高斯白噪声,从估计精度与信噪比的关系、估计精度与信号长度的关系两个方面进行分析。

4.2.1 估计精度与信噪比的关系

伪码码速率参数同 4.1.1 节,畸变波形采用 TMC 模型,其参数为 $\Delta = 0.05, f_d = 6\text{ MHz}, \sigma = 6\text{ Mn/s}$ 。固定信号长度,即脉冲数为 1 000,图 5 给出了 3 种信噪比下的测距偏差估计精度。可以看出,相同信噪比下,测距偏差估计精度随相关间距变化;信噪比越高,测距偏差估计精度越高,且随相关间距变化越小。因此,为提高估计精度,应尽可能增加采集数据用的地面接收天线增益,并降低低噪声放大器的噪声电平。

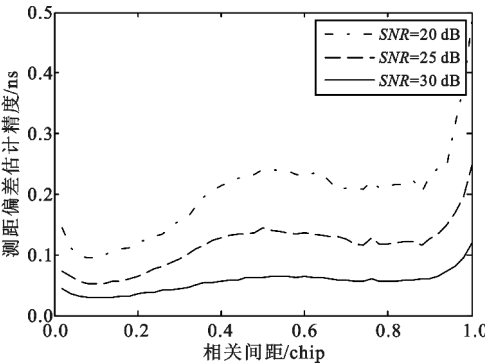


图 5 不同信噪比下的测距偏差估计精度
Fig.5 Ranging bias estimation accuracy for different SNRs

4.2.2 估计精度与信号长度关系

伪码码速率参数同 4.1.1 节,畸变波形参数同 4.2.1 节。固定信噪比为 25 dB,信号长度用脉冲数

表示,图 6 给出了 3 种信号长度下的测距偏差估计精度。可以看出,在相同信号长度下,测距偏差估计精度随相关间距变化,且信号长度越大,测距偏差估计精度越高。因此,当采集信号的信噪比较低时,可通过增加参与数据处理的信号长度,提高测距偏差的估计精度。

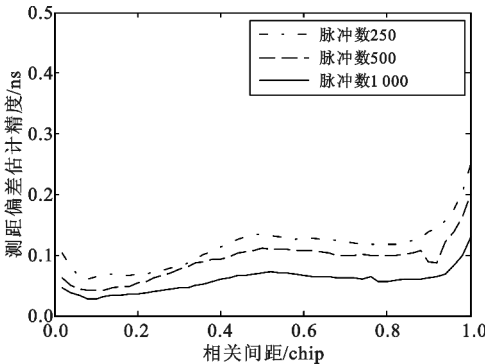


图 6 不同脉冲数下的测距偏差估计精度
Fig.6 Ranging bias estimation accuracy for different pulse numbers

5 在轨卫星信号测距偏差

采用 13 m 大口径抛物面天线分别对“北斗”卫星导航系统的 1 号、3 号、4 号、6 号、7 号和 9 号卫星进行跟踪,利用具有矢量信号分析功能的 Agilent E4445A 实现了 B1 频点信号的采集,采样率为 102.259 08 MHz。为排除径向运动对脉冲的压缩或拉伸作用,选择在卫星径向速度为 0 时进行信号采集。

对于 QPSK 调制而言,接收信号在消除初相时存在 π 相位模糊,而对 TMA 模型参数估计和测距偏差估计均参考上升沿,因此存在两种不同的结果。要解该初相只能根据子帧的同步头来解决,但目前的采集数据长度只有 0.5 s,子帧周期是 6 s,因此无法解决 π 相位模糊。对于 TMA 模型参数估计而言,两种结果的符号正好相反,即超前或滞后,而文献[5]给出的 GPS 卫星 L1C/A 信号的 TMA 模型参数均为滞后,因此假设“北斗”卫星 B1 频点 I 支路信号的 TMA 模型参数也均为滞后,并把 TMA 模型参数为滞后的信号相位为发射信号相位一致,以此信号为基础进行数据处理获取其他信息。

5.1 TMA 模型滞后参数

首先对采集信号进行数据处理获得了码片波形,然后对 6 颗“北斗”卫星 B1 频点 I/Q 支路信号

的 TMA 模型参数进行了估计,结果见表 1(保留小数点后 2 位)。

表 1 “北斗”卫星 TMA 模型参数估计
Tab. 1 TMA model parameter estimation of COMPASS satellites

卫星	滞后偏差/ns	
	I	Q
No. 1	2. 13	-3. 28
No. 3	2. 16	-1. 95
No. 4	1. 36	-2. 08
No. 6	2. 42	-1. 37
No. 7	1. 64	-2. 27
No. 9	1. 57	-1. 99

从表 1 可以看出,6 颗卫星 I 支路均存在滞后偏差,6 颗卫星之间最大差异为 1. 06 ns,导致卫星间测距差为 0. 53 ns;6 颗卫星 Q 支路均存在超前偏差,6 颗卫星之间最大差异为 1. 91 ns,导致卫星间测距差为 0. 96 ns。

5.2 I 支路和 Q 支路测距偏差

在获得码片波形基础上,采用本文方法获得了 6 颗卫星 I 支路信号的测距偏差和 Q 支路信号的测距偏差,分别如图 7 和图 8 所示。

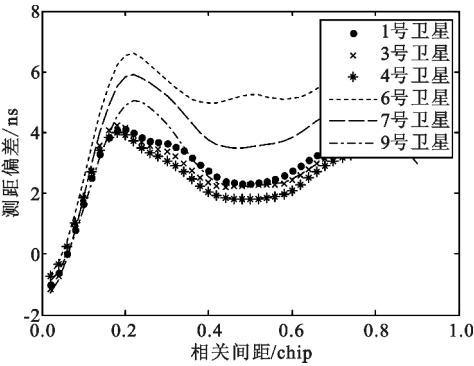


图 7 I 支路信号测距偏差
Fig. 7 Ranging biases of I component signals

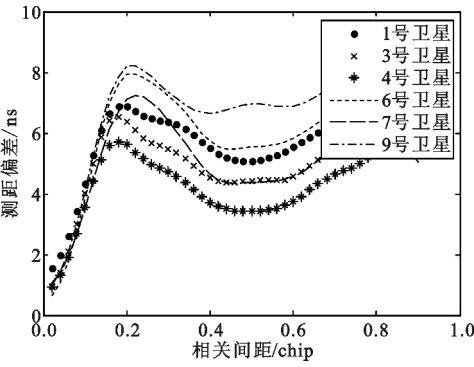


图 8 Q 支路信号测距偏差
Fig. 8 Ranging biases of Q component signals

从图 7 可以看出,任何一颗卫星的 I 支路信号的测距偏差均与相关间距有关。对于相同的相关间距,6 颗卫星之间,I 支路信号的测距偏差不同。在相关间距是 0. 5 码片时,4 号卫星与 9 号卫星之间的测距差异最大,约为 3. 2 ns。不同卫星测距偏差差异是由于不同卫星发播信号的微小差异造成的,与卫星载荷的信号完整性设计及不同卫星发射链路电性能的一致性有关。

从图 8 可以看出,任何一颗卫星的 Q 支路信号的测距偏差均与相关间距有关,对于相同的相关间距,6 颗卫星之间,Q 支路信号的测距偏差不同;同一颗卫星的 I 支路和 Q 支路的测距偏差不同,存在 I/Q 支路测距的不一致性。

由于测距偏差的估计是基于该接收信号的上升沿,I 支路信号的测距偏差是基于 I 支路信号上升沿,Q 支路信号的测距偏差是基于 Q 支路信号上升沿,实际上 I/Q 支路信号的上升沿是不一致的,因此,I/Q 支路测距一致性偏差 ε_{IQ} 可表示为

$$\varepsilon_{IQ}=(\varepsilon_Q+t_Q)-(\varepsilon_I+t_I)。(2)$$

式中: ε_I 为 I 支路测距偏差, ε_Q 为 Q 支路测距偏差, t_I 为 I 支路信号上升沿位置, t_Q 为 Q 支路信号上升沿位置。

图 9 给出了 6 颗“北斗”卫星 B1 频点 I/Q 支路测距一致性偏差。从图 9 可以看出,任何一颗卫星 I/Q 支路信号的测距一致性偏差随相关间距变化较小,但不同卫星之间 B1 频点 I/Q 支路信号的测距一致性偏差有差异,其中 3 号星与 6 号星差异最大,约为 1. 5 ns。

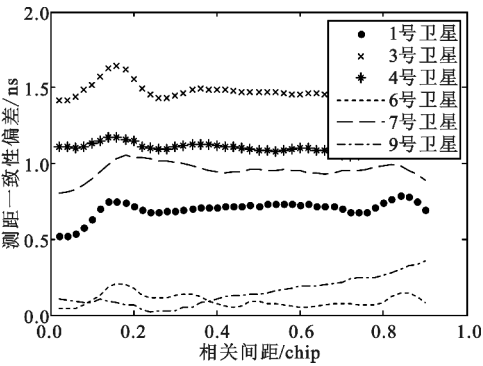


图 9 I/Q 支路信号测距一致性偏差
Fig. 9 Ranging coherency biases of I/Q component signals

为验证图 9 所示结果,采用两个不同厂家生产的导航接收机 2015 年 4 月 2 日的 B1 频点宽相关和窄相关输出的伪距测量,选择高仰角跟踪弧段,以排

除地面多径影响,获得 I/Q 支路伪距测量差的均值。以 6 号星为基准,获得其他卫星 I/Q 支路伪距测量差的均值见表 2(保留小数点后 2 位)。

表 2 导航接收机 I/Q 支路测距差均值
Tab.2 Ranging difference mean of I/Q for two GNSS receivers

卫星	接收机 1		接收机 2	
	宽相关	窄相关	宽相关	窄相关
No. 1	0.50	0.50	0.44	0.46
No. 3	1.35	1.34	1.38	1.34
No. 4	1.27	1.27	1.20	1.19
No. 6	0.00	0.00	0.00	0.00
No. 7	0.87	0.85	0.79	0.80
No. 9	0.18	0.22	0.21	0.16

从表 2 可以看出,虽然导航接收机生产厂家不同,相关间距也不同,但获得的 I/Q 支路伪距测量差均值基本一致。与图 9 比较可以看出,通过大口径天线获得的不同卫星 I/Q 支路信号的测距一致性偏差与导航接收机的 I/Q 支路伪距测量差的均值基本一致。

6 结束语

影响卫星导航测距误差的因素包括电离层、对流层、信号质量、环境干扰、接收机热噪声、接收机本地钟性能等,卫星钟性能的影响最终体现在信号质量上。本文研究了卫星导航信号质量引起的测距偏差的估计问题:首先提出了基于参考波形的测距偏差估计方法,用于评估同一卫星星座不同卫星之间的测距差异,然后以 2OS 模型为基础产生畸变波形,验证了该方法的有效性;通过大口径天线采集在轨“北斗”卫星 B1 频点信号,利用该方法获得了 B1 频点 I/Q 支路信号的测距偏差,表明该方法可用于在轨卫星信号的测距性能评估。本文采集信号长度小于 6 s,因此未讨论解决 π 相位模糊问题,这是下一步的研究内容。

参考文献:

[1] 卢晓春,周鸿伟. GNSS 空间信号质量分析方法研究[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2010,40(5):528-533.
LU Xiaochun,ZHOU Hongwei. Study on analysis method of GNSS space signal quality[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2010, 40 (5) : 528 - 533. (in Chinese)

[2] 刘建成,桑怀胜,徐赞,等. 卫星导航信号异常对信噪比的影响[J]. 电讯技术,2013,53(1):28-32.

LIU Jiancheng,SANG Huaisheng,XU Yun,et al. Effect of GNSS waveform distortions on SNR[J]. Telecommunication Engineering,2013,53(1):28-32. (in Chinese)

[3] PHELTS R E. Multicorrelator techniques for robust mitigation of threats to GPS signal quality[D]. Stanford, CA;Stanford University,2001.

[4] MITELMAN A M,PHELTS R E. Signal deformations on nominally healthy GPS satellites[C]//Proceedings of the Institute of Navigation National Technical Meeting (ION NTM 2004). San Diego,CA;ION,2004:1-5.

[5] WANNINGER L,BEER S. BeiDou satellite - induced code pseudorange variations diagnosis and therapy[J]. GPS Solutions,2014(11):1-10.

[6] MITELMAN A M. Signal quality monitoring for GPS augmentation systems[D]. Stanford,CA;Sandford University,2004.

[7] 徐赞,刘建成,桑怀胜. 卫星导航信号波形畸变引起的码跟踪偏差[J]. 全球定位系统,2014,39(2):5-8.
XU Yun,LIU Jiancheng,SANG Huaisheng. Receiver code tracking bias induced by GNSS waveform distortions[J]. GNSS World of China,2014,39(2):5-8. (in Chinese)

[8] MITELMAN A M,AKOS D M,PULLEN S P,et al. Estimation of ICAO threat model parameters for operational GPS satellites[C]//Proceedings of 2002 International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation(ION GPS). Portland,OR;ION,2002:12-19.

[9] HAUSCHILD A,MONTENBRUCK O. A study on the dependency of GNSS pseudorange biases on correlator spacing[J]. GPS Solutions,2016,20(2):159-171.

[10] 刘建成,范建军,冯晓超,等. 卫星导航信号畸变导致的测距偏差的估计方法[J]. 宇航学报,2015,36(11):1296-1302.
LIU Jiancheng,FAN Jianjun,FENG Xiaochao,et al. Estimation method of ranging bias caused by navigation satellite signal distortion[J]. Journal of Astronautics,2015,36(11):1296-1302. (in Chinese)

作者简介:



刘建成(1976—),男,河南虞城人,2007 年于国防科技大学电子科学与工程学院获信息与通信工程专业博士学位,现为工程师,主要研究方向为卫星导航信号处理;
Email:ljc-mymail@163.com

高 皓(1979—),男,四川宜宾人,2007 年获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为卫星导航信号质量评估;
曹子春(1984—),男,安徽宿州人,2005 年获学士学位,现为工程师,主要研究方向为导航接收机测量数据分析。