

伪距波动原因中的星体多径因素排除

高 帅 徐 赟 杨华峰 刘建成

(北京卫星导航中心 北京 100094)

摘 要 针对卫星可视弧段内伪距测量异常波动现象,从信号质量监测角度研究了卫星可视弧段内导航信号测距偏差变化问题,确认伪距波动是否由星体多径引起。利用大口径天线跟踪北斗卫星,采用两套采集设备实现了卫星可视弧段内的 B1 频点信号多次高载噪比采集,根据基于参考波形的测距偏差估计方法分别处理多组采集数据,获得了不同仰角上的测距偏差。在一个仰角下的采集数据,当滤波器带宽远远大于信号带宽时,采样率与下变频器均不同的两套采集设备获得的测距偏差相同,且测距偏差均与相关间距及滤波器带宽有关,但当滤波器带宽超过 15 MHz 后,测距偏差的差异可以忽略。比较不同仰角下的测距偏差,在卫星可视弧段内测距偏差变化很小,因此认为星体多径引起卫星可视弧段内信号质量的变化不是伪距测量异常波动的原因。

关键词 信号质量监测, 伪距波动, 测距偏差, 星体多径

中图分类号 TN 95

Exclusion of Spacecraft Internal Multipath among Pseudorange Variation Reasons

GAO Shuai XU Yun YANG Huafeng LIU Jiancheng

(Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094)

Abstract For the code pseudorange variations in the satellite's visible range, ranging bias variation of navigation signal is studied from the point of view of signal quality monitoring, and its consistency with the code pseudorange variations is confirmed. By using of large antenna to track COMPASS satellite, multiple high CNR B1 signal are collected by two data acquisition platforms. The collected data are processed separately according to ranging bias estimation method based on reference waveform, and ranging biases in different elevation angles are obtained. For one elevation angle, when filter bandwidth is much larger than signal bandwidth, the ranging biases are same for the two data acquisition platforms with different sampling rate and down converter. The ranging biases are both related with correlator spacing and filter bandwidth. However, the difference of ranging bias can be omitted when filter bandwidth is larger than 15 MHz. Furthermore, ranging biases of different elevation angle is compared, and the results show that the difference of ranging biases is tiny. Therefore, signal quality changes in satellite's visible range induced by spacecraft internal multipath is excluded from pseudorange variations.

Key words Signal quality monitoring, Pseudorange variation, Ranging bias, Spacecraft internal multipath

0 引言

卫星导航信号畸变对导航接收机伪距测量具有重要影响^[1-3]。在轨的健康卫星存在着微小信号畸变^[4-6],但传统的信号质量监测方法无法分辨,这些微小信号异常导致的测距偏差将影响高精度应用的效果。

卫星可视弧段内导航信号可能存在伪距测量异常波动现象,可通过单频伪距测量和双频载波相位测量的特殊线性组合即多径观测值对此现象进行分析。多径观测值抵消了电离层延迟、对流层延迟和所有影响几何距离的因素,因此理想情况下卫星过境期间多径观测值的变化主要反映测距偏差的变化。文献[7]研究表明,北斗卫星过境期间的多径观测值存在波动现象,且与仰角有关。文献[8]利用1.8m天线发现, GPS卫星在过境期间多相关器测距差也存在波动现象。卫星过境期间的伪距测量波动将降低卫星轨道参数及电离层参数等导航业务数据的估计精度,影响高精度用户的应用效果。因此需要分析伪距测量异常波动形成的原因,为解决该问题提供依据。

文献[7]认为伪距测量异常波动是由星体多径引起导航信号畸变引起的,卫星过境期间信号质量的变化是导致多径观测值波动的原因。文献[8]给出了多相关器测距差与温度随时间变化的匹配关系,认为多相关器测距差变化与温度变化有关,因此引起伪距测量异常波动的原因未有定论。文献[9]根据理想矩形脉冲和卫星信号波形上升沿交叉点信息定义了一种参考波形作为理想波形,在此基础上给出了测距偏差估计方法。参考波形不存在测距偏差,而实际卫星发播信号波形相对参考波形存在测距偏差,因此参考波形为评估不同卫星测距偏差建立了一个参考基准。由于卫星可视弧段内的参考波形是一致的,因此该方法获得的测距偏差也可用于评估卫星可视弧段内的测距偏差变化。如果卫星可视弧段内信号质量发生变化,则测距偏差必然随仰角变化,并导致伪距波动随卫星信号质量产生变化。

本文利用大口径天线跟踪北斗卫星,跟踪期间等

间隔采集该卫星 B1 频点信号,在多个仰角上获得多段高载噪比采集数据,进而利用文献[9]提出的数据处理方法提取不同仰角上的测距偏差,比较不同仰角上的测距偏差是否发生变化。

1 基于参考波形的测距偏差估计方法

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差异,相对理想脉冲信号测量存在测距偏差。如果不同卫星测距偏差相同,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。因此文献[9]基于理想矩形脉冲波形定义了一种参考波形。

文献[9]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,即假设不同卫星上升沿从-1到0的持续时间是相同的。对于理想波形,其测距偏差为0。但实际卫星发播信号波形相对参考波形存在测距偏差,通过评估卫星信号相对参考波形的测距偏差,评估整个卫星星座不同卫星之间的测距差异。

导航接收机测距通过延迟锁定环对接收信号的伪码跟踪来实现。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跟踪鉴相器曲线的零交叉点,使输入码跟踪误差最小。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0,码跟踪误差也为0。但是卫星导航信号的波形畸变使鉴相曲线零交叉点偏离码跟踪误差为0的位置,此偏离量即为导航信号波形畸变引起测距偏差的大小,即

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

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,对在轨卫星发播的导航信号测距偏差估计步骤如下.

步骤 1 利用大口径天线采集具有高载噪比的导航信号.

步骤 2 消除残余频率和初相,获得高清晰时域波形.

步骤 3 根据码速率确定欠采样速率,对采集数据进行欠采样,通过判读符号获得伪码、二次编码、信息码等.

步骤 4 根据信息码获得帧同步头信息,若与已知帧同步头的符号相反,则返回步骤 2,并根据解析周内秒信息进行确认.

步骤 5 利用步骤 2 获得的采样数据,根据其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.

步骤 6 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.

步骤 7 根据步骤 3 获得的伪码产生本地超前信号和滞后信号,分别与步骤 2 获得的采样数据进行相关运算,求其差作为鉴相器曲线.

步骤 8 对鉴相器曲线进行线性拟合,获得零交叉点位置.

步骤 9 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.

2 两套采集设备采集信号测距偏差比较

为分析卫星可视弧段导航信号测距偏差,选择北斗系统中的一颗 MEO 卫星,即北斗 14 号卫星为例说明.采集平台包括 9 m 抛物面天线、低噪声放大器、分路器、高性能频谱仪 E4445A (具有 80 MHz 分析带宽的矢量信号分析组件)、下变频器、专用信号采集设备.高性能频谱仪 E4445A 的采样率随径向速度变化,以保证码周期内的采样点数为整数.采集信号时长为 1 s.专用采集设备的下变频器中心频率设置为 1560 MHz,带宽为 25 MHz.采样率为 240 MHz,

采集信号时长为 30 s.两套采集设备在采集时,高性能频谱仪 E4445A 的采集时间应处于专用采集设备的采集时间内.2015 年 12 月 19 日,对北斗 14 号卫星在可视弧段内共完成 20 次采集 (大约 20 min 采集一次).

北斗 B1 频点 I 支路信号的帧同步头周期为 6 s,只有专用采集设备能够获得帧同步头,以解决接收信号的 π 相位模糊问题,而高性能频谱仪 E4445A 采集数据的 π 相位模糊问题只能通过 Q 支路伪码与专用采集设备采集数据的 Q 支路伪码相匹配来解决.

下面比较在不同滤波器带宽和不同相关间距条件下,两套采集设备采集北斗 14 号卫星 B1 频点信号的测距偏差.

2.1 E4445A 采集数据测距偏差

当导航卫星发播信号带宽固定后,接收链路的滤波器带宽会带来信号质量变化,因此任意选择其中一次采集数据研究不同滤波器带宽条件下的测距偏差.北斗 B1 频点信号的码速率为 2 Mcps,为覆盖信号的多个旁瓣范围,考虑的滤波器带宽分别为 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz, 25 MHz.图 1 给出了 E4445A 采集数据在 5 种滤波器带宽下的 I 支路测距偏差、Q 支路测距偏差和 I/Q 支路测距一致性偏差, T_c 为表示时间长度的相关间距.

从图 1 可以看出:无论滤波器带宽大小如何,测距偏差均与相关间距有关;滤波器带宽在 15 MHz 以下时,测距偏差不同,特别是滤波器带宽更窄时,测距偏差差异更大;当滤波器带宽超过 15 MHz 后,测距偏差的差异很小,可以认为测距偏差与滤波器的带宽无关.

2.2 专用采集设备采集数据测距偏差

图 2 给出了专用采集设备采集数据在 5 种滤波器带宽下的 I 支路测距偏差、Q 支路测距偏差和 I/Q 支路测距一致性偏差.从图 2 可以看出,专用采集设备采集数据获得的结论与 E4445A 相同.

2.3 两套采集设备测距偏差估计结果比较

为更精确比较两套采集设备获得的测距偏差差异,需要固定滤波器带宽,并在同一幅图里比较两套采集设备采集数据的测距偏差.图 3 给出了当滤波器带宽为 25 MHz 时两套采集设备采集数据的 I 支路测距偏差、Q 支路测距偏差和 I/Q 支路测距一致性偏差.可以看出,两套采集设备获得的 I 支路和 Q

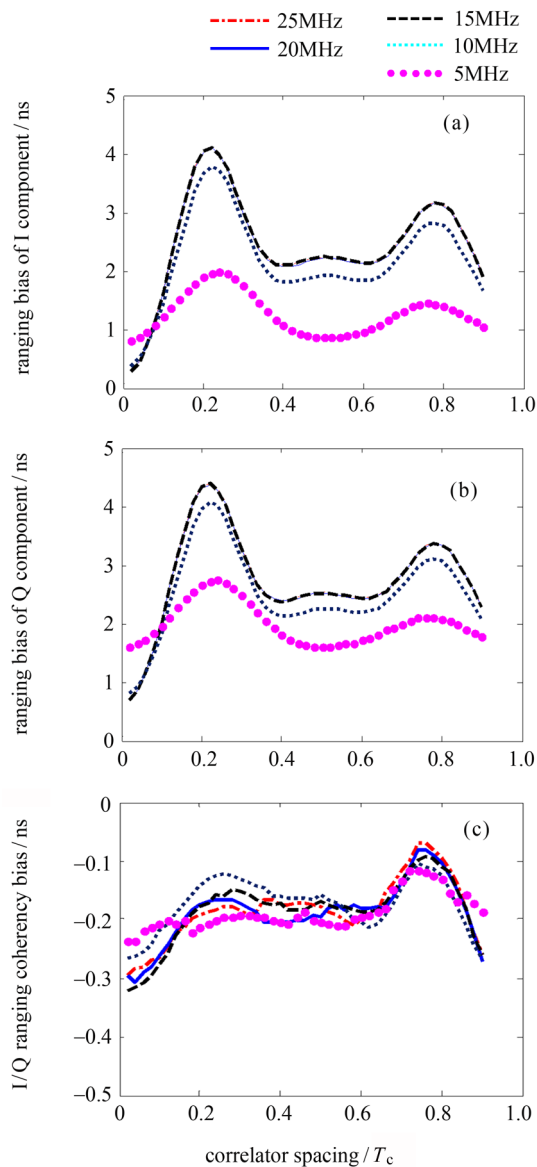


图 1 不同滤波器带宽条件下 E4445A 采集数据的测距偏差

Fig. 1 Ranging bias of collected data obtained by E4445A with various filter bandwidth

支路测距偏差随相关间距变化曲线近似重合, 而 I/Q 支路测距一致性偏差由于本身量值比较小, 其随相关间距变化曲线没有重合, 但仅有 0.1ns 左右的差异, 而个别北斗卫星 I/Q 支路测距一致性偏差大于 1ns^[9], 因此两套采集设备的 I/Q 支路测距一致性偏差的差异可忽略。

为比较不同滤波器带宽条件下两套采集设备采集数据的测距偏差是否有差异, 图 4~7 给出了滤波器带宽分别为 20 MHz, 15 MHz, 10 MHz, 5 MHz 时两

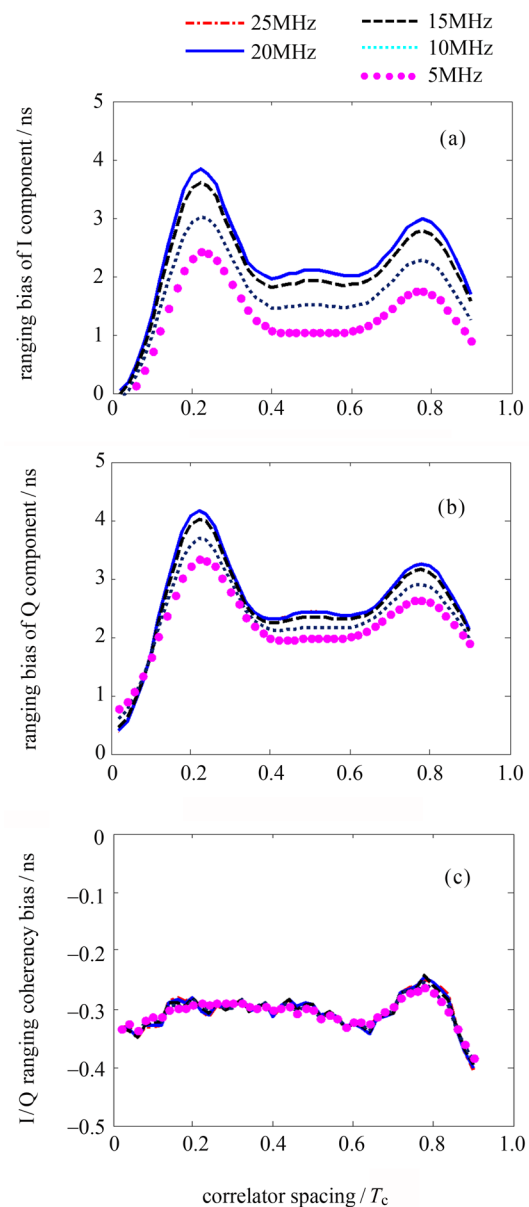


图 2 不同滤波器带宽条件下专用采集设备采集数据的测距偏差

Fig. 2 Ranging bias of collected data obtained by specialized platform with various filter bandwidth

套采集设备采集数据的 I 支路测距偏差、Q 支路测距偏差和 I/Q 支路测距一致性偏差。可以看出, 滤波器带宽越大, 两套采集设备采集数据的测距偏差差异越小。因此滤波器带宽远远大于信号带宽时, 采样率和下变频器均不同的两套采集设备获得的测距偏差相同, 这表明文献 [9] 提出的测距偏差估计方法在同一颗卫星不同的采集数据上获得的结果是一致的。

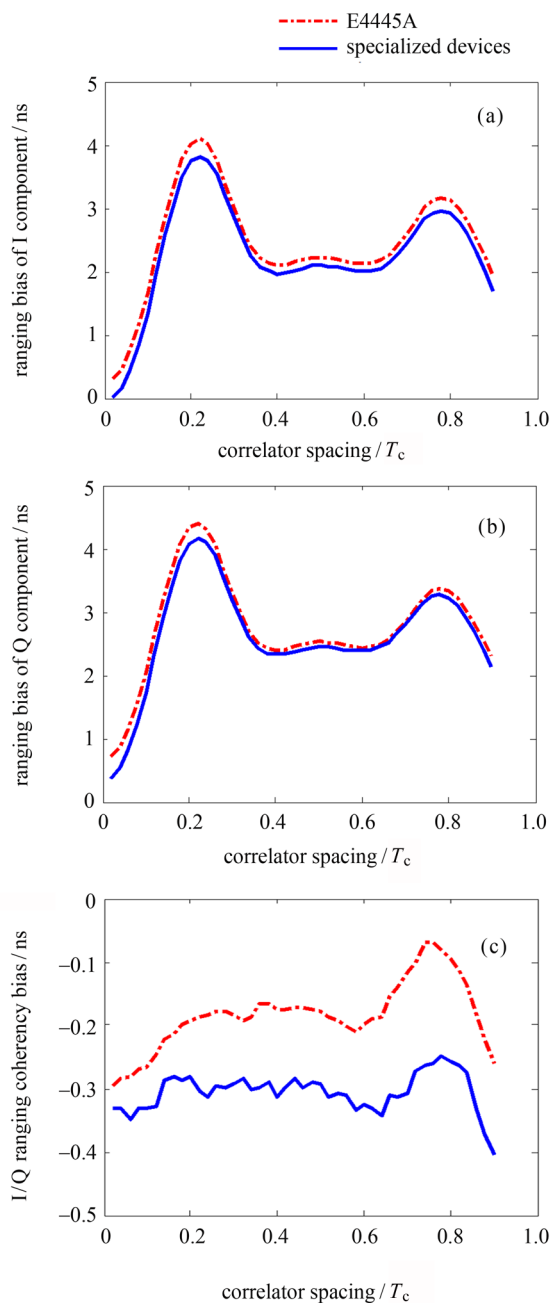


图3 滤波器带宽为 25 MHz 时两套采集设备采集数据的测距偏差
Fig. 3 Ranging bias of two collected data when filter bandwidth is 25 MHz

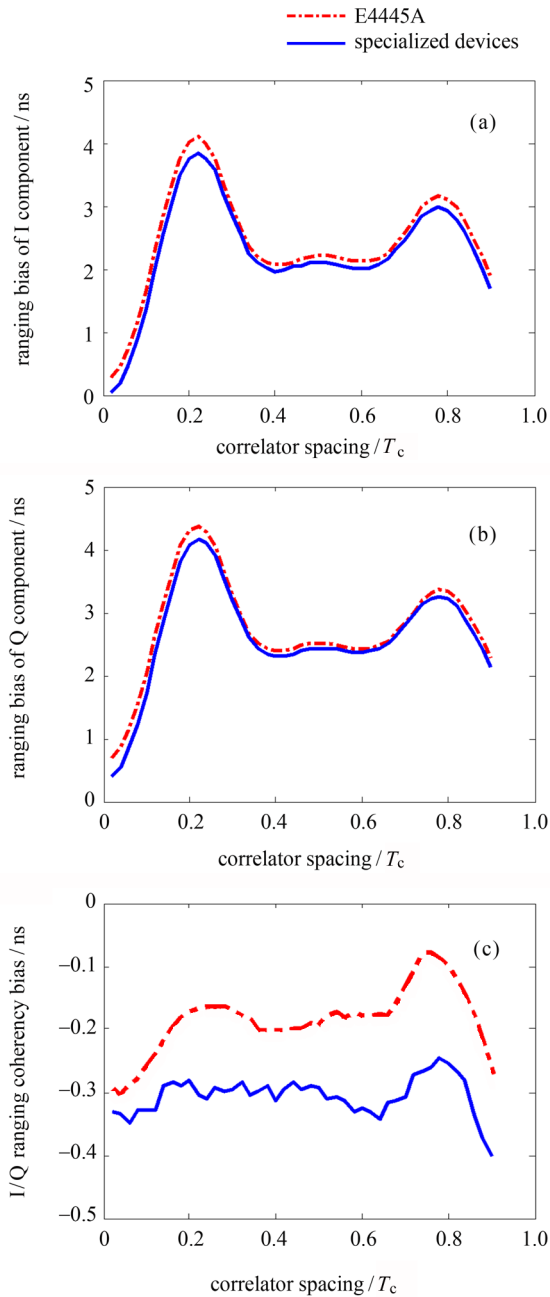


图4 滤波器带宽为 20 MHz 时两套采集设备采集数据的测距偏差
Fig. 4 Ranging bias of two collected data when filter bandwidth is 20 MHz

3 卫星可视弧段内测距偏差变化分析

分析导航卫星在整个可视弧段内多组采集数据的测距偏差, 查看其是否发生变化. 由于两套采集设备采集数据的测距偏差结果相同, 因此仅给出根据专

用采集设备采集数据获得的结果, 图 8 给出了滤波器带宽是 25 MHz 时卫星过境期间采集的 20 组数据对应的 I 支路测距偏差、Q 支路测距偏差和 I/Q 支路测距一致性偏差. 一条曲线代表一次采集的处理结果, 因此所有 20 条曲线代表卫星过境期间 20 次采集对应的处理结果.

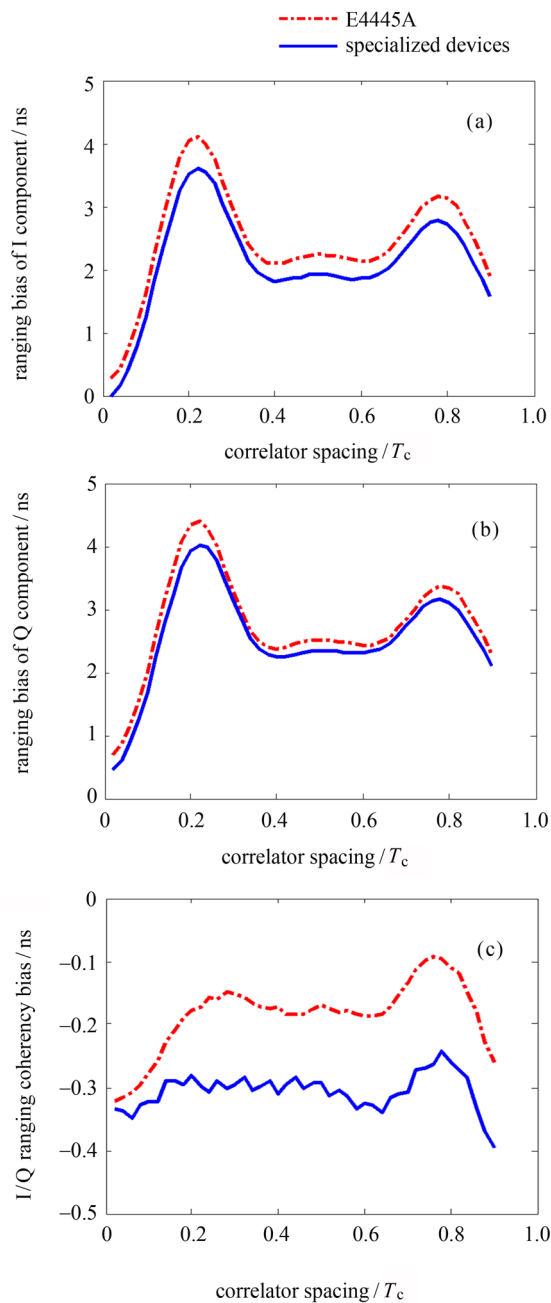


图 5 滤波器带宽为 15 MHz 时两套采集设备采集数据的测距偏差

Fig. 5 Ranging bias of collected data when filter bandwidth is 15 MHz

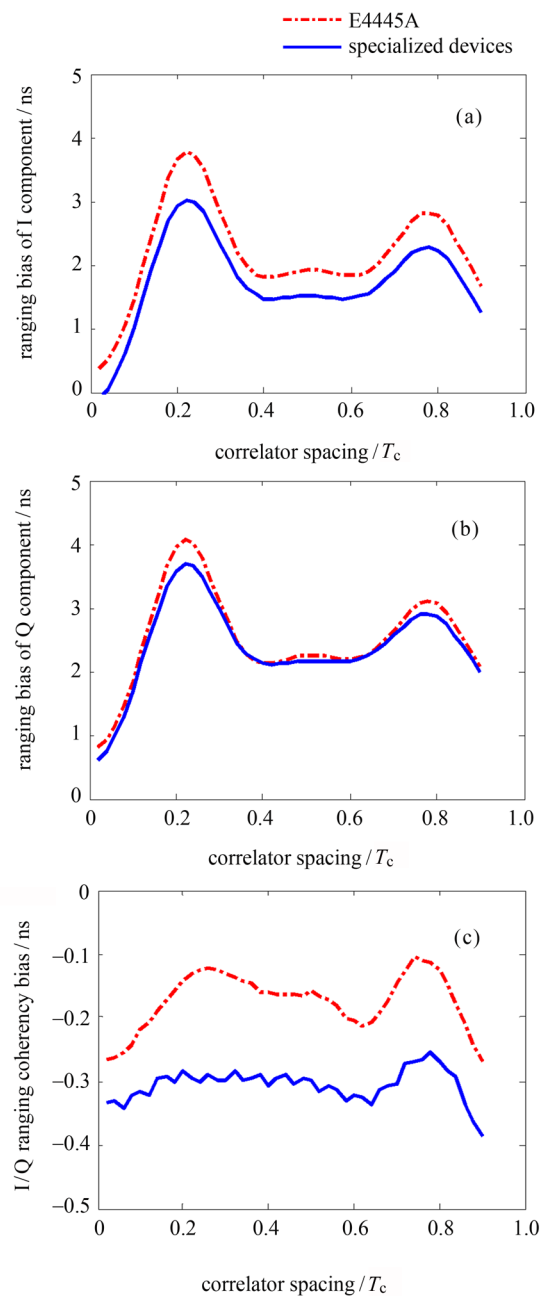


图 6 滤波器带宽为 10 MHz 时两套采集设备采集数据的测距偏差

Fig. 6 Ranging bias of collected data when filter bandwidth is 10 MHz

从图 8 可以看出, 卫星可视弧段内采集的多组数据对应的 I 支路测距偏差、Q 支路测距偏差和 I/Q 支路测距一致性偏差随相关间距的变化曲线近似重合, 即在卫星可视弧段内测距偏差差异很小, 可以认为是一致的, 因此卫星可视弧段内信号质量的变化不是引起伪距测量异常波动的原因。

4 结论

通过研究卫星可视弧段内的测距偏差变化情况, 分析了伪距测量异常波动的原因。利用大口径天线跟踪北斗卫星, 两套采集设备分别等间隔采集该卫星 B1 频点信号, 在多个仰角上获得多段高载噪比采

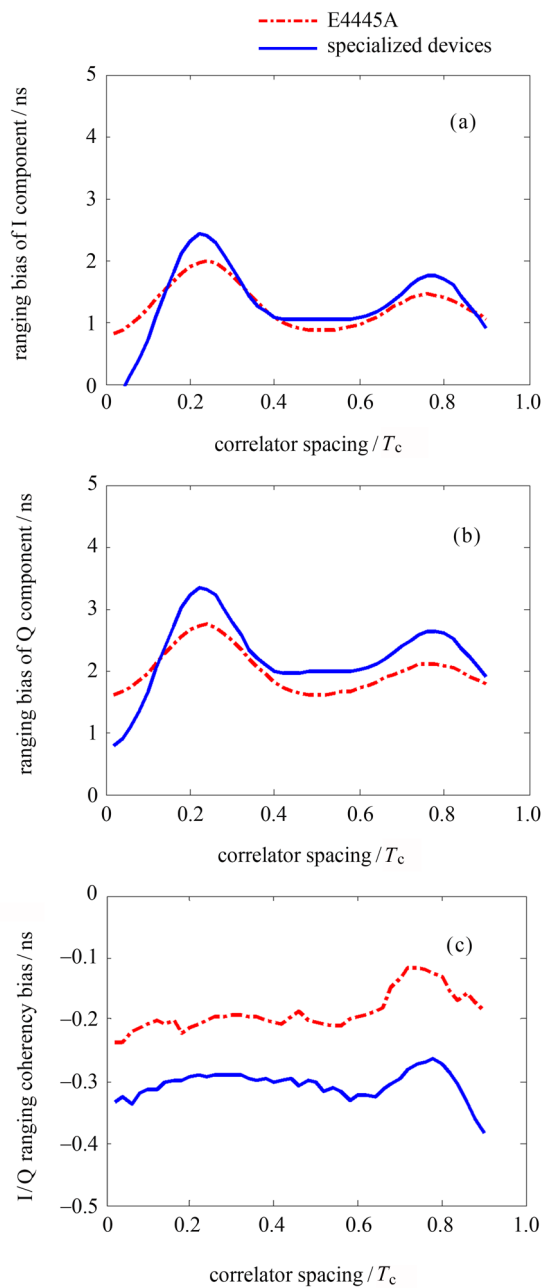


图7 滤波器带宽为 5 MHz 时两套采集设备采集数据的测距偏差

Fig. 7 Ranging bias of collected data when filter bandwidth is 5 MHz

集数据,采用基于参考波形的测距偏差估计方法获得了不同仰角上的测距偏差,结果如下。

- (1) 滤波器带宽远大于信号带宽时,采样率和下变频器均不同的两套采集设备获得的测距偏差相同。
- (2) 无论滤波器带宽大小如何,测距偏差均与相

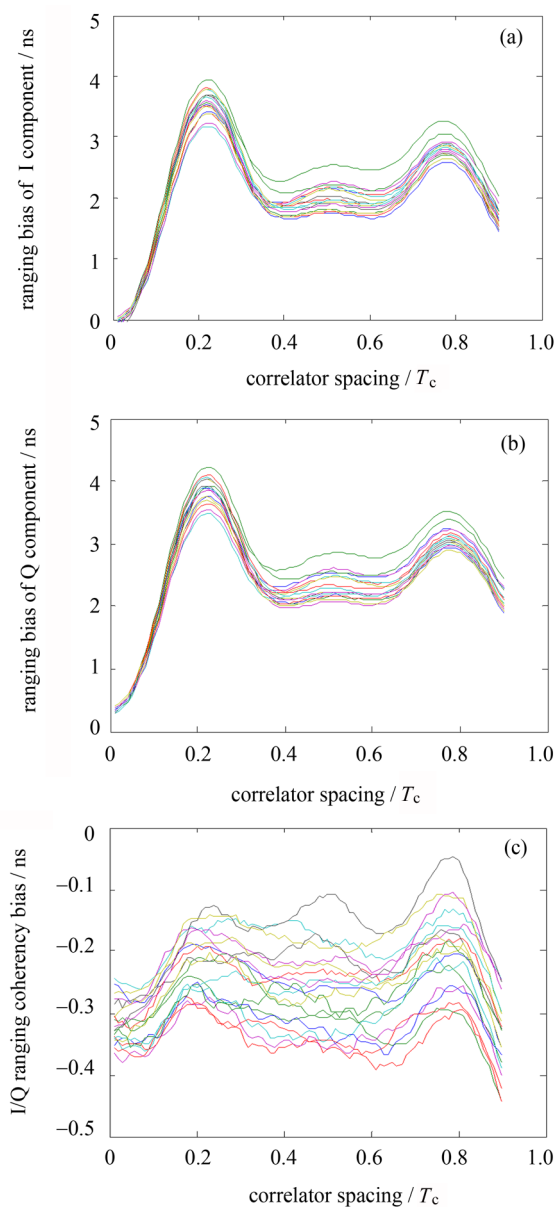


图8 卫星可视弧段内多组采集数据的测距偏差 (每条曲线代表一次采集的处理结果)

Fig. 8 Ranging bias of collected data in satellite's visible range (Each curve represents the results of one collected data)

关间距有关。滤波器带宽在 15 MHz 以下时,测距偏差有差异,但当滤波器带宽超过 15 MHz 后,测距偏差与滤波器带宽无关。

- (3) 在卫星可视弧段内测距偏差差异很小,因此认为星体多径引起的信号质量变化不是伪距测量异常波动的原因。

