

GEO 卫星机会源近岸海面高度测量性能评估

王 峰^{1,2}, 杨东凯^{2*}

(1. 地理信息工程国家重点实验室, 陕西西安 710054; 2. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要: 基于同步地球轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星的机会源技术已被证明其在近岸海面高度测量中的应用潜力,但目前研究主要围绕可行性论证展开,极少开展全方位的测量性能评估。为此,从仿真和试验两个角度评估了信号带宽、非相干累加次数、信噪比及波形峰值跟踪算法对GEO卫星机会源海面测高性能的影响。评估结果表明当非相干累加次数和信噪比大于最优非相干累加次数和最优信噪比时,测高性能将不再显著提升。因此,通过选择最优非相干累加次数,以及设计合理的接收天线增益、射频增益及接收机带宽使信噪比大于最优信噪比对GEO卫星机会源海面测高至关重要。通过对比插值和拟合两种波形跟踪算法发现拟合法能提供比插值法更高的测量精度。利用北斗B3I信号和ASTRA 19.2 E卫星信号开展GEO卫星海面测高的试验评估。试验结果表明:在非相干累加次数大于10 000、信噪比大于7 dB时,北斗B3I信号和ASTRA 19.2 E卫星信号可分别提供精度约为0.20 m和0.10 m的海面高度。针对GEO卫星多频或多通道传输特点,提出了基于信号频谱合成提高海面测高精度的方法。当利用中卫1号卫星10个通道信号进行合成时,插值法和拟合法的仿真测距精度分别为3.50 cm和0.69 cm。

关键词: 地球同步轨道卫星;机会源遥感;海面高度;信号带宽;信噪比;非相干累加

基金项目: 地理信息工程国家重点实验室基金(No.SKLGIE2020-Z-1-1);中国博士后科学基金(No.2021M700319)

中图分类号: P237;TN959.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2024)03-0719-10

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220826

Performance Assessment of Coastal Sea Surface Height Measurement Using Opportunity-Source Signal from GEO Satellite

WANG Feng^{1,2}, YANG Dong-kai^{2*}

(1. State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: It is potential to measure sea surface height using opportunity of source from geostationary earth orbit (GEO) satellites. Most studies focus on the experimental demonstrations, but few works comprehensively assess its performance. Based on this, the paper evaluates the influence of the signal bandwidth, incoherent integration number, signal-to-noise ratio (SNR) and retracking algorithm on the oceanic altimetry performance. It is found that once the incoherent integration number and SNR are over the optimal incoherent integration number and SNR, the improvements of the altimetry performances are insignificant. Therefore, choosing optimal incoherent average number, and designing the receiver antenna gain, radio-frequency gain, and receiver bandwidth to obtain optimal SNR are needed. The fitting method can provide a better precision than the interpolation method. The data from the BeiDou B3I signal and ASTRA 19.2 E satellite experiments are used to assess the GEO opportunity-source altimetry. The experiment results show that for the incoherent average number and SNR over 10 000 and 7 dB, respectively, the altimetry precision of about 0.20 m and 0.10 m can be obtained, respectively. Due to multi-frequency or multi-channel transmission, the spectral synthesis is proposed to improve the altimetry precision. The simulation results show that the synthesized signal from 10-channel signals of Zhongwei-1 satellite provides a precision of 3.50 cm and 0.69 cm for the interpolation and fitting method.

Key words: GEO satellite; opportunity-source remote sensing; sea surface height; signal bandwidth; signal-to-noise ratio (SNR); incoherent integration

Foundation Item(s): Foundation of State Key Laboratory of Geo-Information Engineering (No.SKLGIE2020-Z-1-

1); China Postdoctoral Science Foundation (No.2021M700319)

1 引言

随着沿海人口持续增多和经济不断发展,监测近岸海域的高度变化对海洋工程、灾害预警及安全生产等具有重要意义. 验潮站等原位测量手段因建设成本高而不利于在近海岸广泛部署,且易受地表垂直运动影响. 无线电测距技术的发展使星载高度计等手段被提出^[1],但在近海岸由于陆地对微波信号的影响,使其接收的回波波形发生改变,测量精度下降,且无法实时监测近海潮汐^[2]. 岸基平台的观测区域固定、且支持长期稳定观测,作为星载观测的补充提供了近海信息. 欧美国家已在沿海区域部署了各自的岸基海洋雷达监测网络^[3]. 高度计需成本高、功率大的发射装置,不宜在供电受限的偏远海岸或岛屿部署. 此外,频谱资源日益成为一种稀缺资源. 通过利用已有的非己信号实现附加功能是解决频谱紧缺的有效手段. GNSS-R(Global Navigation Satellite System-Reflectometry)以 GNSS 作为照射源,通过协同接收、处理直达和经地表反射的信号遥感地表物理参数^[4-9]. 被动无源的特点使其功耗和成本低,便于在供电受限的偏远海岸和岛屿部署.

从测量载体进行分类,GNSS-R测高技术分为载波高度计和码高度计. 载波高度计可提供厘米级精度^[6],但需反射信号为相干信号,无法在复杂的高海况场景应用. 码高度计应用场景广泛,但测高精度相对载波高度计低. 文献[10,11]的结果均表明星载场景下的 GPS L1 Coarse/Acquisition (C/A)码的海面测高精度为米级. 机载和岸基平台的 GPS L1 C/A 和北斗 B1I 信号的测高精度也仅为分米级^[12,13]. 尽管利用 GNSS 全频谱的方法^[14-16]可提高测高精度,但由于基于直射和反射信号的互相关处理,使其在岸基场景易受星间串扰的影响^[17]. 此外,导航卫星以中轨道卫星(Medium Earth Orbit, MEO)为主,在岸基场景由于观测几何随时间变化使得海面测高偏差具有时变性^[15]. 这为偏差校正带来了困难.

由于地球同步轨道(GEO)卫星相对地球表面固定,因此在岸基场景下可提供稳定的观测几何,使得测高偏差相对稳定而易于校正. 北斗系统的地球同步轨道(GEO)、电视和广播通信卫星等 GEO 卫星已被作为照射源进行了海面高度测量的试验验证^[18-21]. 除了观测几何,影响测高性能的因素还有信号带宽、非相干累计次数、信噪比、跟踪算法等. 目前的工作大部分为试验验证,而针对全方位的性能评估较少. 本文从仿真和试验两个角度全方位开展基于 GEO 卫星的岸基海面高度测量技术的性能评估,重点评估信号带宽、非相干累加次数、信噪比及跟踪算法对海面测高精度的影响,并

针对 GEO 卫星多频点或多通道传输特性,提出信号频谱合成提高测高精度的方法.

2 测高模型

2.1 几何构型

如图 1 所示为岸基场景的坐标系. 坐标系原点位于镜面反射点 S , Z 轴指向法向方向, Y 轴在反射面内指向接收机方向, X 、 Y 和 Z 轴构成笛卡尔坐标系. 接收机 R 和 GNSS 卫星 T 坐标为:

$$\mathbf{R} = \left[0, \frac{h_r}{\tan \theta}, h_r \right] \quad (1)$$

$$\mathbf{T} = \left[0, -\frac{H_t}{\tan \theta}, H_t \right] \quad (2)$$

其中, h_r 和 H_t 分别为接收机 R 和 GNSS 卫星 T 相对于海面的高度; θ 为 GNSS 卫星高度角.

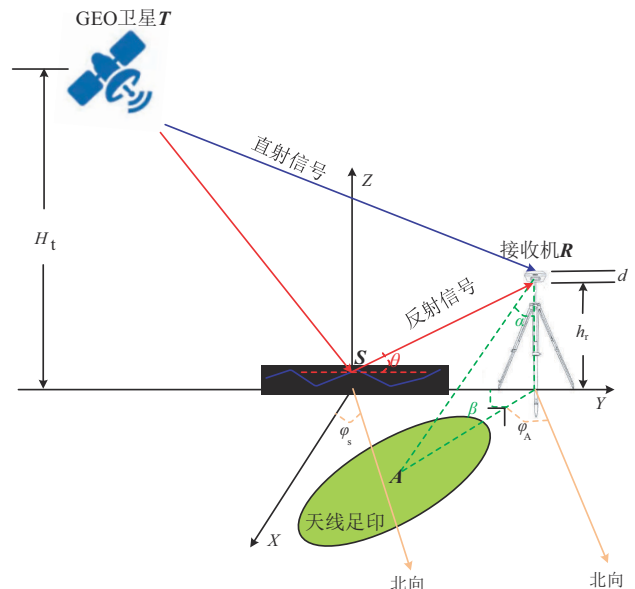


图 1 岸基机会源探测几何构型

2.2 测量模型

海面高度定义为:

$$h_{ss} = H_t - h_r \quad (3)$$

其中, H_t 为 GNSS 反射天线相对于大地参考面的高度. GNSS 反射天线相对于海面的高度 h_r 可表示为:

$$h_r = \frac{1}{2} \left(\frac{c \cdot \tau_{\text{geo}}}{\sin \theta} - d \right) \quad (4)$$

其中, d 为直射和反射天线的垂直距离; c 为电磁波传播速度; τ_{geo} 为反射相对于直射信号的几何时延,在岸基场景下可表示为:

$$\tau_{\text{geo}} = \tau_{\text{spec}} - \Delta_{\text{ins}} - b_{\text{spec}} + \varepsilon_r \quad (5)$$

其中, τ_{spec} 为测量反射相对于直射信号的时延; Δ_{top} 为对流层偏差; Δ_{ins} 为直反射通道偏差; b_{spec} 为时延偏差; ε_r 为随机误差. 通道误差 Δ_{ins} 为系统误差, 可通过对接收机定标确定. b_{spec} 定义为跟踪器输出时延和镜点时延差.

2.3 波形跟踪

反射信号通常采用确定时延波形特征点在相关窗内的位置跟踪反射信号. 典型特征点为波形峰值:

$$\tau_{\text{spec}} = \arg \max_{\tau} \{W_N(\tau)\} \quad (6)$$

其中, τ 为时延; $W_N(\tau)$ 为归一化时延波形. 为精确跟踪波形, 一种方法是通过对实测波形插值, 并对插值波形进行遍历寻找波形峰值的位置; 另一种是利用解析函数对实测波形的峰值区域进行最优拟合, 通过解析方法估计波形峰值位置. 本文采用二次多项式拟合实测波形的峰值区域.

$$f(t) = a_2 \tau^2 + a_1 \tau + a_0 \quad (7)$$

波形峰值位置对应波形斜率为 0 的位置:

$$\tau_{\text{spec}} = -\frac{a_1}{2a_2} \quad (8)$$

其中, a_1 和 a_2 分别为拟合多项式的一阶和二阶项系数.

3 信号处理模式

机会源遥感技术的信号处理采用相关处理. 根据参考信号的不同, 有自相关和互相关两种模式. 由于 GEO 卫星相对于岸基接收机固定, 直射和反射信号的多普勒频率小, 无需闭环跟踪估计直射信号多普勒频率, 因此 GEO 卫星信号的处理比 MEO 卫星信号简单. GEO 卫星信号的自相关处理, 以本地重构信号为参考信号, 用于信号体制已知的信号, 首先产生和 GEO 卫星信号频率一致的本地载波, 并利用产生的载波对直射和反射信号进行载波剥离; 然后根据信号体制产生本地参考信号分别和载波剥离后的直射和反射信号完成频域并行相关处理得到直射和反射信号的复数相关值. GEO 卫星的互相关处理以直射信号为参考信号, 用于信号体制未知或重构复杂度的信号, 对载波剥离后的直射和反射信号直接进行频域并行相关处理得到反射信号复数相关值.

4 仿真评估

由式(4)可知, 海面测高精度与时延估计精度成正比:

$$\sigma_h = \frac{\sigma_{\tau_{\text{spec}}}}{2 \sin \theta} \quad (9)$$

其中, $\sigma_{\tau_{\text{spec}}}$ 为时延距离的估计精度. 本文利用蒙特卡洛

仿真估计 GEO 卫星信号的时延波形的测距标准差, 衡量测量精度.

$$\tau_{\text{spec}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i - \bar{\tau})^2}{n-1}} \quad (10)$$

其中, n 为测量次数; τ_i 为第 i 次测量的时延距离; $\bar{\tau}$ 为 n 次测量的算术平均值.

当海面发生非相干散射时, 最常用的时延波形为 Z-V 模型^[22]. 反射信号时延波形通常包含乘性和加性两种噪声. 本文利用如下模型产生加噪后的复数时延波形^[21]:

$$W_c(\tau) = \frac{\sqrt{W(\tau)}}{2} \cdot Z_S(\tau) + P_N \cdot Z_N(\tau) \quad (11)$$

其中, $Z_S(\tau)$ 和 $Z_N(\tau)$ 为服从标准正态分布的噪声; P_N 为噪声功率; $W(\tau)$ 为 Z-V 模型产生的纯净时延波形. 仿真流程和仿真场景由图 2 和表 1 给出.

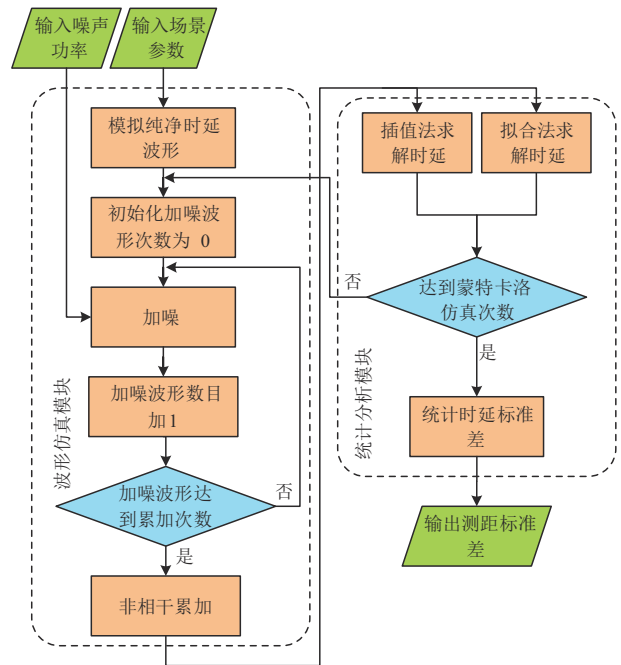


图 2 仿真评估流程

表 1 仿真评估场景

参数	数值
卫星高度	36 000 km
接收机高度	100 m
高度角	30°
接收天线增益	12 dB
接收机波束宽度	±30°
相干积分时间	1 ms

如图 3 所示为当非相干累加次数为 10 000 次时, 测距标准差随信号带宽的变化. 随信号带宽的增加, 测距

标准差减小. 拟合法比插值法有更小的测距标准差, 即拟合法能提供更高精度的海面测高结果. 北斗 GEO 播发的 B3I 带宽为 10.23 MHz, 利用插值法仅能达到约 0.30 m 的测距精度, 而拟合法的测距精度为 0.13 m. 由于 Akima 插值方法和三次样条 (cubic spline) 插值方法提供了相似的测距标准差, 因此本文在后续的仿真和试验中仅采用三次样条插值方法进行分析.

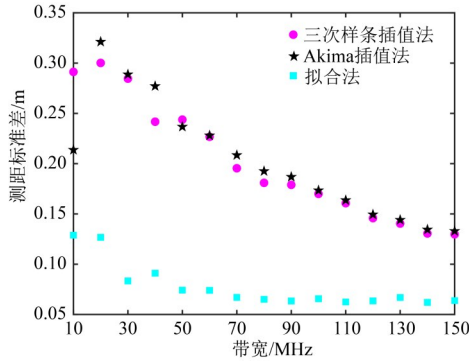


图3 反射信号测距标准差和信号带宽的关系

如图4所示, 随着非相干累加次数的增加, 测距标准差减小. 非相干累加次数越大, 增加非相干累加次数使测距标准差减小的幅度越小. 为衡量非相干累加次数对测距标准差的影响, 定义测距标准差相对变换率:

$$R_{\text{incoh}} = \frac{\partial \sigma_{\tau_{\text{spe}}}}{\partial T_{\text{incoh}}} \times 100\% \quad (12)$$

其中, T_{incoh} 为非相干累加次数. 相对变换率越小表明非相干累加次数增加使测距标准差下降的能力越低. 当相对变化率低于某一阈值时, 预示继续增加非相干累加次数将无法获得有效的性能提升. 将阈值对应的非相干累加次数定义为最优非相干累加次数. 如图5所示为测距标准差相对变化率与非相干累加次数的关系. 随非相干累加次数的增加, 测距标准差相对变化率减小. 当非相干累加次数大于 8 000 时, 100 MHz 信号的测距标准差的相对变化率小于 5%, 测距标准差的减小幅度趋于稳定; 而对于 10 MHz 信号, 非相干累加次数大于 10 000 次时, 减小幅度趋于稳定. 这说明不同带宽的信号的最优非相干累加次数不同, 相比于宽带信号, 窄带信号的最优非相干累加次数较小.

时延波形的信噪比定义为:

$$\text{SNR} = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_S - P_N}{P_N} \right) \quad (13)$$

其中, P_S 为信号波形峰值功率; P_N 为底噪功率. 如图6所示, 随着信噪比增加, 测距标准差越小; 当信噪比大于 7 dB 时, 测距标准差趋于稳定, 继续增加信噪比将无

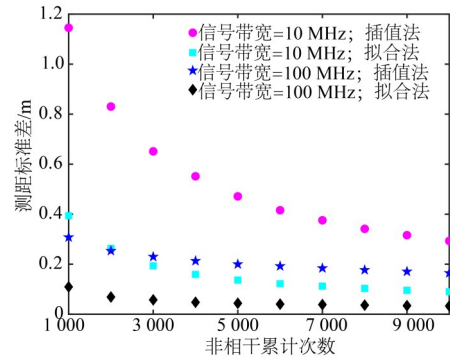


图4 反射信号测距标准差和非相干累加的关系

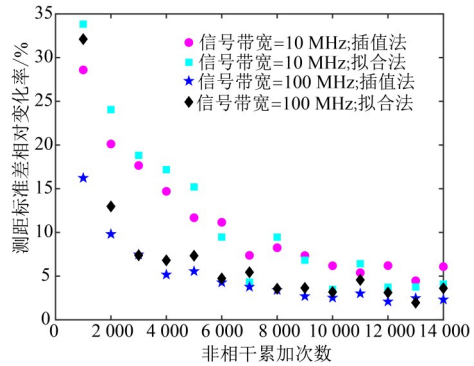


图5 测距标准差相对变换率和非相干累加次数的关系

法获得性能的显著提升. 将测距标准差趋于稳定的信噪比称为最优信噪比. 海面反射信号链路主要由发射段、传输段和海面反射段构成. 卫星发射功率和发射天线增益在整个生命周期内相对稳定. 岸基场景下, GEO 卫星几何构型稳定, 信号传输路径相对固定. 在不考虑电离层闪烁等异常现象导致的信号功率变化时, GEO 海面反射信号的信噪比主要受海面粗糙度影响. 此外, 海面反射信号的加性噪声功率和接收机带宽相关. 因此, 在设计和部署 GEO 反射信号接收机时, 可根据 GEO 卫星参数、接收机位置及最大海洋粗糙度确定最优信噪比, 进而设计和优化接收机天线增益、射频增益及接收机带宽等系统指标.

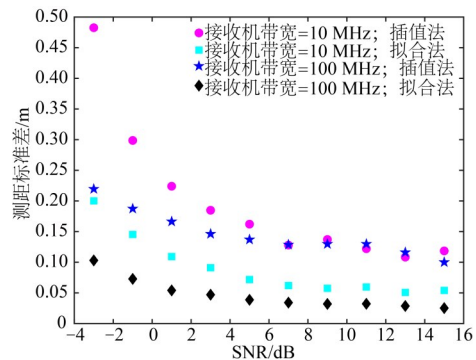


图6 反射信号测距标准差和信噪比的关系

5 试验论证

5.1 北斗 B3I 试验

5.1.1 试验场景

为了验证北斗 GEO 卫星反射信号海面测高,在山东省东营市青东五验潮站(北纬 37°26'51";东经 119°0'36")开展了外场试验. 试验时间为 2021 年 6 月 16 日 16 时至 6 月 19 号 18 时. 如图 7 所示,直射和反射天线距海面约 12 m. 直射天线采用通用的右旋圆极化全频段导航天线. 反射天线采用增益为 9.4 dB,波束宽度为 60°的方向性左旋圆极化天线,向下 45°指向海面. 北斗 GEO 卫星 PRN 01, PRN 02 及 PRN 03 位于反射天线视场内被长期稳定接收. 试验设备为 4 通道中频数据信号采集器. 量化位数、采样率及中频分别为 4 bit, 32.738 MHz 和 0.127 1 MHz. 信号处理采用自相关模式.



图 7 北斗 B3I 试验场景

5.1.2 结果分析

如图 8 所示为 2021 年 6 月 16 日 16:28 采集的 GEO 03 号卫星的直射和反射信号时延波形. 由于天线架设高度低,反射信号闪耀区小于第一码延迟区域,使得反射和直射信号的时延波形均呈三角函数平方分布. 经三次样条插值后的波形和二阶多项式拟合的波形均具备光滑特性,可精细描述波形峰值区域,用于精确估计峰值位置.

试验数据和仿真数据不同,潮汐影响海面高度. 为确保在计算反射信号相对于直射信号的时延距离的标

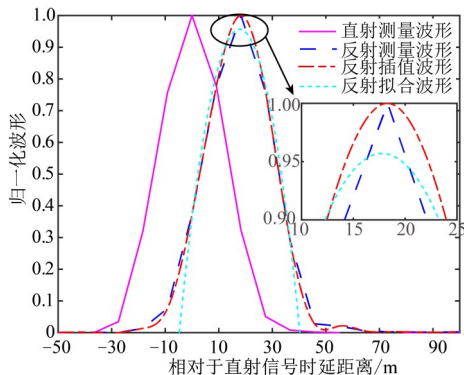


图 8 北斗 B3I 直射和反射信号时延波形

准差时,海面高度不发生显著变化,本文对试验期间的数据进行分段处理,具体流程如图 9 所示. 在非相干累加次数 T_{incoh} × 相干积分时间 T_{coh} 的周期内计算反射信号相对于直射信号的时延距离;在时延距离标准差计算周期内(本试验采用 2 min),利用所有估计的时延距离通过式(10)计算时延距离标准差;在整个试验周期内,利用所有估计的时延距离标准差计算其均值和均方差.

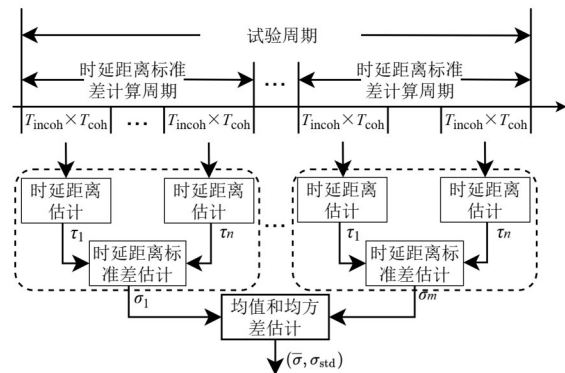


图 9 试验数据评估流程

图 10 为试验期间实测的北斗 B3I 反射信号相对于直射信号的时延距离的标准差的均值和均方差与非相干累加次数的关系. 随着非相干累加次数增加,实测的测距标准差和图 4 所示的仿真表现了相同变化趋势,且当非相干累加次数为 10 000 时,测距标准差的变化趋于稳定,即增加非相干累加次数,测距性能不再显著提升. 尽管拟合法提供了比插值法更高的测距精度,但由于采样率较低使得提升幅度较图 4 仿真结果小.

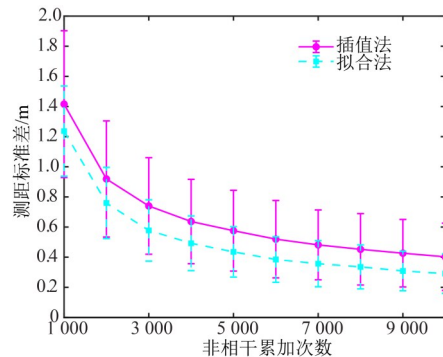


图 10 北斗 B3I 反射信号测距标准差的均值和均方差与非相干累加次数的关系

如图 11 所示,随信噪比增加,测距标准差减小. 和仿真结果不同,当信噪比高于 7 dB 时,实测测距标准差仍随信噪比的增加而减小. 需注意的是采集到的信噪比高于 7 dB 的数据较少,统计结果不一定准确.

北斗 GEO 01, 02 和 03 卫星的高度角分别约为 39°,

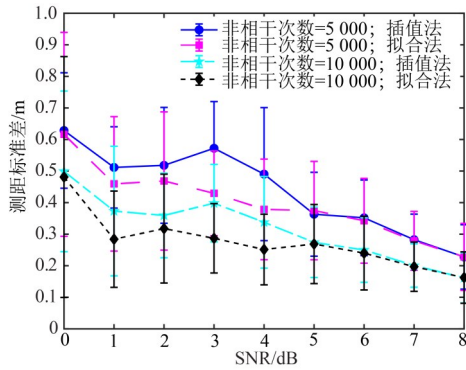


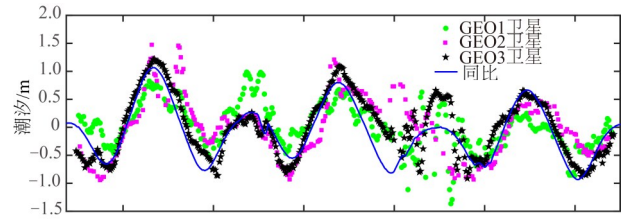
图 11 北斗 B3I 反射信号测距标准差的均值和均方差与信噪比的关系

31° 和 44° , 对流层偏差小于 0.01 m , 因此对流层偏差忽略. 偏差主要由时延偏差和射频通道偏差组成. 由于时延偏差和射频通道偏差均未定标, 因此本文重点利用 B3I 反射信号时延波形测量潮汐. 测量值和同比潮位对比评估时均减均值处理, 即 $h_{ss} = h_{ss} - \langle h_{ss} \rangle$, $h_{true} = h_{true} - \langle h_{true} \rangle$ (其中, $\langle h_{ss} \rangle$ 和 $\langle h_{true} \rangle$ 为 h_{ss} 和 h_{true} 的均值). 如图 12(a) 所示为利用三颗卫星的 B3I 反射信号通过插值法测量的潮汐和同比潮汐的时序. 三颗卫星的测量结果和同比潮位均呈现了相似的变化, 相关系数分别为 $0.60, 0.64$ 和 0.87 . 利用验潮站数据作为真值, 计算测量高度的同比均方根误差, 即:

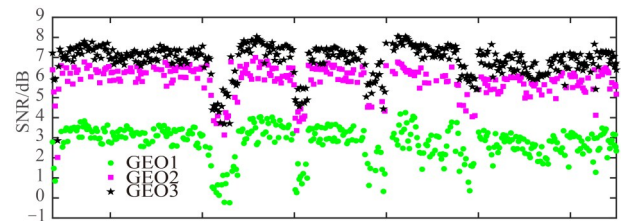
$$\sigma_{\text{rmse}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h_{\text{meas}i} - h_{\text{insitu}i})^2}{N}} \quad (14)$$

其中, N 为测量的样本数; $h_{\text{meas}i}$ 为测量高度; $h_{\text{insitu}i}$ 为验潮站测量高度. 均方根误差如表 2 所示. 插值法的均方根误差分别为 $0.36\text{ m}, 0.53\text{ m}$ 和 0.28 m . 相比于插值法, 拟合法的测量精度更高, 分别为 $0.36\text{ m}, 0.44\text{ m}$ 和 0.27 m . GEO 01, 02 和 03 号卫星的时延波形的平均信噪比分别为 $2.75\text{ dB}, 5.87\text{ dB}$ 和 6.85 dB . 主要原因是 GEO 02 和 03 号卫星的镜面反射点位于反射天线主瓣范围, 而 GEO 01 号卫星的镜面反射点位于反射信号天线旁瓣范围. 由式(9)可知, 海面测高误差和 $\sin\theta$ 成反比例关系, 且由上述分析可知, 测高误差和信噪比成反比例关系, 由于 GEO 03 卫星的高度角和信噪比较另外两颗卫星高, 因此 GEO 03 号卫星的测量精度最高. 如图 12(b) 和图 12(c) 所示, 6 月 17 日 14:00 左右由于 GEO 01 号卫星信噪比降至 0 dB , 且风速急速减小, 使其严重偏离同比数据. 同理, 6 月 18 日 14:00 的三颗卫星的测量精度也较其他时刻差. 当信噪比大于 6 dB 时, GEO 03 号卫星的测高精度约为 0.20 m . 可通过增加天线增益提高时延波形信噪比提高测高精度. 对比文献[20]分别给出的北斗 BIC 和 QZSS L1 信号测量结果, B3I 具有相对较宽的信号带宽, 提供了更高精度的测量结果. 此外, 由

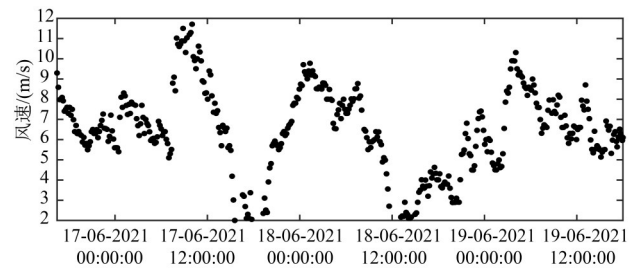
于在岸基场景下 GEO 卫星能够提供稳定的观测几何, 测量精度相对稳定, 避免了文献[12]所述的测量精度对高度角的依赖.



(a) 测量和同比潮汐



(b) 信噪比时序



(c) 风速时序

图 12 测量、同比潮汐、信噪比及风速时序

表 2 测量的潮汐变化的同比均方根误差 单位: m

GEO1		GEO2		GEO3	
插值法	拟合法	插值法	拟合法	插值法	拟合法
0.36	0.36	0.53	0.44	0.28	0.27

5.2 通信卫星试验

5.2.1 试验场景

西班牙 IEEC (Institut d'Estudis Espacials de Catalunya) 在地中海克雷乌斯海角 (北纬 41.950 ° ; 东经 3.231 °) 开展了通信 GEO 卫星信号的机会源遥感试验^[21]. 如图 13 所示, 试验中直射和反射天线分别对准 ASTRA 19.2 E 卫星 (高度角: 38.9° ; 方位角: 156.8°) 和其接收机构成的镜面反射点. 天线距海面的垂直距离约为 105 m . 试验以 4 MHz 为步进采集了带宽为 $4\sim 40\text{ MHz}$ 信号的时延波形. 采样频率为 80 MHz , 量化位数为 10 bit , 相关积分时间为 1 ms . 试验时间从 2012 年 7 月 18 日~20 日三天. 由于 18 日和 20 日采集的数据质量较差, 因此本文仅利用 19 日采集的数据进行分析. 信号

处理采用互相关模式.



图 13 通信卫星信号试验场景

5.2.2 结果分析

图 14 为 7 月 19 日 09:24 和 10:22, 接收机带宽分别为 4 MHz 和 24 MHz 时, 接收机采集的 ASTRA19.2E 卫星反射信号的时延波形. 24 MHz 信号带宽更宽, 具有比 4 MHz 带宽信号更窄的时延波形. 利用归一化波形的 3 dB 宽度衡量时延波形的时延范围. 4 MHz 和 24 MHz 带宽的信号时延范围分别为 22.30 m 和 14.60 m. 由于入射信号在粗糙海面发生漫反射, 反射信号中同时含有镜向信号分量和其他散射点信号分量, 因此, 时延波形向更大时延处延伸, 产生拖尾现象. 本文利用时延波形后沿和前沿距峰值的距离比值处衡量拖尾程度. 距离比值越大, 表示拖尾现象越严重. 当取时延波形 0.5 分位点前沿和后沿时, 4 MHz 和 24 MHz 的距离比值分别为 1.19 和 1.15, 而当取 0.2 分位点时, 距离比值分别变为 1.38 和 1.45. 这说明 4 MHz 信号的拖尾现象较 24 MHz 信号严重. 主要原因是 4 MHz 信号在海面上的第一码延迟区大于闪耀区, 其信号集中于第一码延迟区内, 时延波形近似呈三角函数平方分布. 24 MHz 信号的第一码延迟区小于闪耀区. 由于除第一码延迟区域的信号, 更大码延迟区域的信号也对时延波形产生贡献, 因此 24 MHz 信号的时延波形向更大时延范围延伸, 其后沿发生较严重拖尾现象. 拖尾程度与海面粗糙度相关, 可用于反演海面粗糙度.

如图 15(a) 所示, 当接收机带宽小于 12 MHz 时, 随着接收机带宽的增加, 插值法和拟合法的测距标准差均减小, 即信号的测距精度提升. 一方面由于随接收机带

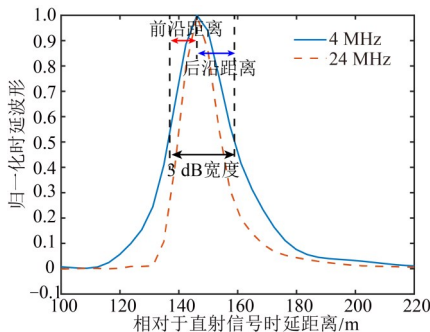
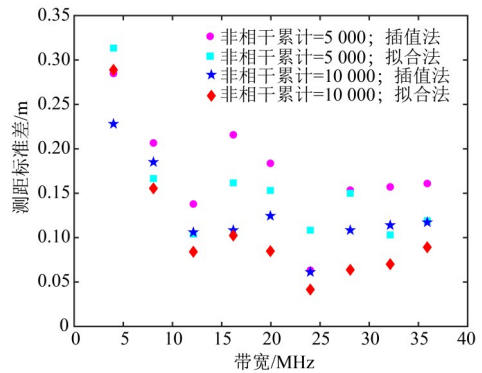
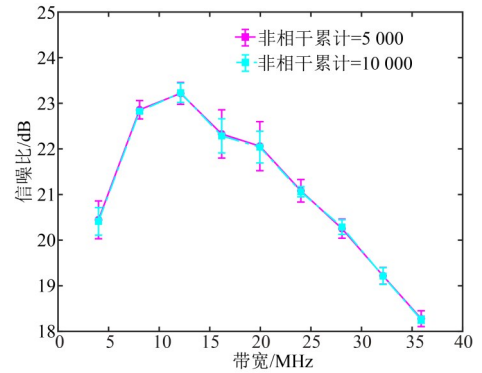


图 14 ASTRA 19.2 E 卫星反射信号时延波形

宽增加, 更高带宽的信号分量被接收, 使得时延波形变窄; 另一方面如图 15(b), 由于接收机带宽小于 12 MHz 时, 随接收机带宽增加, 信噪比增加. 当接收机带宽大于 12 MHz 而小于 25 MHz 时, ASTRA 19.2 E 卫星的主瓣信号被全部接收, 尽管随接收机带宽增加, 噪声功率增加, 信噪比下降, 但随旁瓣信号被接收, 更多的波形峰值细节被接收, 测距标准差仍呈微小下降趋势. 当接收机带宽大于 25 MHz 时, 接收机带宽的增加使信噪比下降, 测距标准差呈微小增大趋势.



(a) 测距标准差与带宽的关系



(b) 信噪比与带宽的关系

图 15 实测的 ASTRA 卫星反射信号测距标准差及信噪比均值与接收机带宽的关系

如图 16 所示为实测的 20 MHz 和 36 MHz 的 ASTRA 19.2 E 反射信号测量标准差随非相干累加次数的变化. 由图可知, 和仿真结果类似, 当非相干累加次数为 10 000 时, 测距标准差随非相干累加次数的变化趋于稳定.

如图 17 所示为利用带宽大于 12 MHz 的时延波形测量的天线距海面的高度. 由于插值法和拟合法的跟踪偏差不同, 使反演的两个高度存在一个固定偏差. 在 UTC 9:40~10:40, 测量的高度缓慢增加, 在 UTC 10:40 后, 测量的高度开始下降. 插值法和拟合法的测高结果具有一致性. 插值法和拟合法的测量标准差分别为

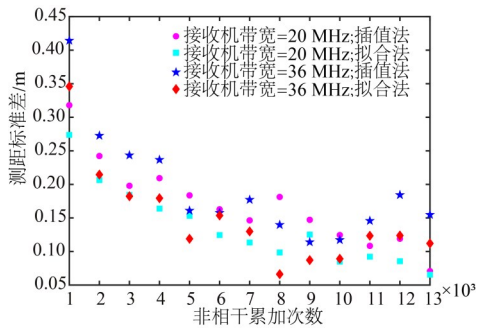
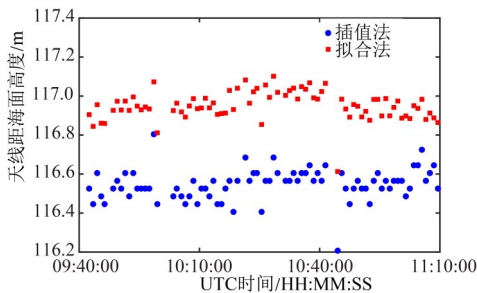
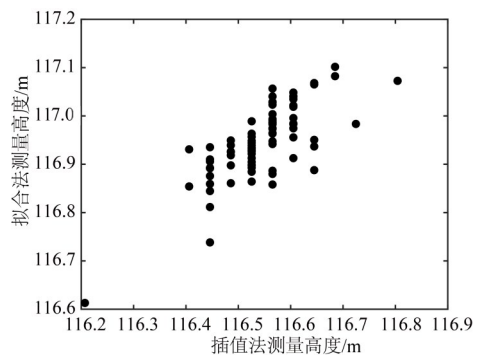


图 16 实测的 ASTRA 19.2 E 卫星反射信号测距标准差和非相干累加次数的关系

8.07 cm 和 7.61 cm. 去趋势项后,插值法和拟合法的测量标准差分别为 7.94 cm 和 6.84 cm. 这说明拟合法的测高精度比插值法更高.



(a) 测量的天线距离海面的高度时序



(b) 插值法和拟合法测量的天线距离海面的高度的散点关系

图 17 ASTRA 卫星反射信号测量的天线距海面的高度

6 超高精度测量

由上可知测距精度和信号带宽成正相关. 单个频点的信号带宽有限,限制了时延波形的测距精度. 同一颗卫星通常发射位于不同频点的多个独立的信号. 将多个频点的信号进行频谱合成组成一个信号进行测距可有效提高机会源测量精度. 如图 18 所示,频谱合成通过混频或频谱搬移的方法将同一颗卫星发射的具有不同射频频点的信号变换至相邻基频或中频当作一个信号进行处理. 由于海面高度测量需通过反射信号时

延波形估计反射信号相对于直射信号的时延距离,因此无论自相关还是互相关模式,重构的参考信号须和合成信号具有一致性. 此外,由于不同射频信号存在幅度差异,因此在频率合成的过程中需进行幅度均值.

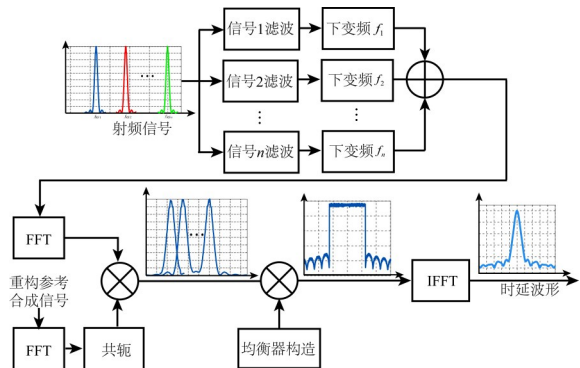
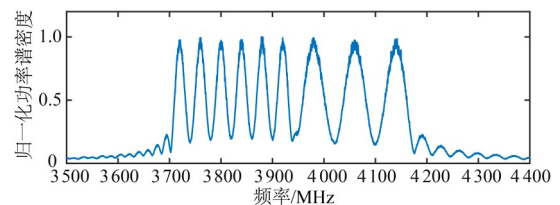
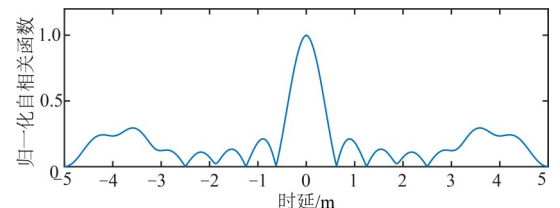


图 18 基于频谱合成的海面高度测量信号处理框架

本文以中卫 1 号卫星信号为例评估多信号频谱合成的测量优势. 中卫 1 号卫星是定点于东经 87.5° 的中国通信广播卫星,其发射的水平极化信号由 6 个 36 MHz 和 3 个 72 MHz 的信号通道组成,如图 19(a)所示,占据 3 700~ 4 200 MHz 频带. 自相关函数如图 19(b)所示, 3 dB 主瓣宽度为 0.37 m,远小于北斗 B3I 信号和 ASTRA 19.2 E 卫星的自相关函数宽度. 在如表 1 所示的场景,当非相干累加次数为 10 000,信噪比大于 7 dB 时,插值法和拟合法的测距标准差分别为 3.50 cm 和 0.69 cm.



(a) 频谱



(b) 自相关函数

图 19 中卫 1 号卫星水平极化信号频谱和自相关函数

7 结论

本文从仿真和试验两个角度评估了岸基场景下 GEO 卫星机会源海面测高性能. 仿真和试验结果均表明:

- (1) 信号带宽越宽,时延波形的测距越高,海面高

度测量精度越高,可根据任务需求选择合适的 GEO 卫星.

(2) 随非相干累加次数增加,海面测高性能提升幅度下降,并趋于稳定. 不同带宽的信号的最优非相干累加次数不同,需根据 GEO 卫星信号确定最优非相干累加次数.

(3) 当信噪比大于最优信噪比时,增加信噪比将无法提高测高性能. 通过设计合理的接收天线增益、接收带宽及射频增益等系统指标使信噪比大于最优信噪比可实现最优测高精度.

(4) 相比于插值法,拟合法的跟踪精度更高,能提供更高精度的海面测高.

通信卫星发射的信号功率较北斗卫星强,能提供更高信噪比的时延波形,在相同信号带宽下,可提供更精确的高度测量结果. 北斗和 ASTRA 19.2 E 卫星试验表明当非相干累加次数为 10 000 时,信噪比大于 7 dB 时,北斗 B3I 反射信号可提供同比均方根误差为~0.20 m 海面测高;而 ASTRA 19.2 E 卫星的测高精度为~0.10 m.

对多个频点或多个通道信号进行频谱合成可有效提高海面测高精度. 通过合成中卫 1 号卫星 10 个信号通道,在最优非相干累加次数和信噪比条件下,仿真的测距精度为 3.50 cm 和 0.69 cm.

致谢 感谢西班牙 IEEC 提供 ASTRA 19.2 E 卫星数据.

参考文献

- [1] 文汉江, 金涛勇, 朱广彬, 等. 卫星测高原理及应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2017: 1-14.
WEN H J, JIN T Y, ZHU G B, et al. Principle and Application of Satellite Altimetry[M]. Beijing: Sino Maps Press, 2017: 1-14. (in Chinese)
- [2] 米银霞. 卫星雷达高度计的海洋参数反演与近海重跟踪算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
MI Y X. The Study on Ocean Parameter Inversion and Off-shore Re-tracking Algorithm Based on Satellite Radar Altimeter[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [3] FUJII S, HERON M L, KIM K, et al. An overview of developments and applications of oceanographic radar networks in Asia and Oceania countries[J]. Ocean Science Journal, 2013, 48(1): 69-97.
- [4] WANG F, YANG D K, ZHANG B, et al. Waveform-based spaceborne GNSS-R wind speed observation: Demonstration and analysis using UK TechDemoSat-1 data[J]. Advances in Space Research, 2018, 61(6): 1573-1587.
- [5] SOULAT F, CAPARRINI M, GERMAIN O, et al. Sea state monitoring using coastal GNSS-R[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(21): L21303.
- [6] LIU W, BECKHEINRICH J, SEMMLING M, et al. Coastal sea-level measurements based on GNSS-R phase altimetry: A case study at the onsala space observatory, Sweden [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(10): 5625-5636.
- [7] YAN Q Y, HUANG W M. Sea ice remote sensing using GNSS-R: A review[J]. Remote Sensing, 2019, 11(21): 2565.
- [8] WU X R, DONG Z N, JIN S G, et al. First measurement of soil freeze/thaw cycles in the Tibetan Plateau using CYGNSS GNSS-R data[J]. Remote Sensing, 2020, 12(15): 2361.
- [9] TABIBI S, GEREMIA-NIEVINSKI F, VAN DAM T. Statistical comparison and combination of GPS, GLONASS, and multi-GNSS multipath reflectometry applied to snow depth retrieval[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(7): 3773-3785.
- [10] LI W Q, RIUS A, FABRA F, et al. Revisiting the GNSS-R waveform statistics and its impact on altimetric retrievals[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(5): 2854-2871.
- [11] LI W Q, CARDELLACH E, FABRA F, et al. Assessment of spaceborne GNSS-R ocean altimetry performance using CYGNSS mission raw data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(1): 238-250.
- [12] 张云, 张杨阳, 孟婉婷, 等. 机载 GNSS 反射信号海面测高模型的研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(3): 149-156.
ZHANG Y, ZHANG Y Y, MENG W T, et al. Research on sea surface altimetry model of airborne GNSS reflected signal[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(3): 149-156. (in Chinese)
- [13] ZHANG G D, XU Z C, WANG F, et al. Evaluation and correction of elevation angle influence for coastal GNSS-R ocean altimetry[J]. Remote Sensing, 2021, 13(15): 2978.
- [14] RIUS A, NOGUÉS-CORREIG O, RIBÓ S, et al. Altimetry with GNSS-R interferometry: First proof of concept experiment[J]. GPS Solutions, 2012, 16(2): 231-241.
- [15] CARRENO-LUENGO H, CAMPS A, RAMOS-PEREZ I, et al. Experimental evaluation of GNSS-reflectometry altimetric precision using the P(Y) and C/a signals[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(5): 1493-1500.
- [16] LI W Q, YANG D K, D'ADDIO S, et al. Partial interfer-

ometric processing of reflected GNSS signals for ocean altimetry[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(9): 1509-1513.

- [17] ONRUBIA R, PASCUAL D, PARK H, et al. Satellite cross-talk impact analysis in airborne interferometric global navigation satellite system-reflectometry with the microwave interferometric reflectometer[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(9): 1120.
- [18] SHAH R, GARRISON J L, EGIDO A, et al. Bistatic radar measurements of significant wave height using signals of opportunity in L-, S-, and ku-bands[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(2): 826-841.
- [19] 储倜, 贺凯飞, 高凡, 等. 基于 QZSS L1 信号的岸基 GNSS-R 码延迟海面测高[J]. *北京航空航天大学学报*, 2022, 48(4): 691-697.
CHU T, HE K F, GAO F, et al. Coastal GNSS-R ocean altimetry based on code delay of QZSS L1 signal[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2022, 48(4): 691-697. (in Chinese)
- [20] RIBO S, ARCO J C, OLIVERAS S, et al. Experimental results of an X-band PARIS receiver using digital satellite TV opportunity signals scattered on the sea surface[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(9): 5704-5711.
- [21] SHAH R, GARRISON J L, GRANT M S. Demonstration of bistatic radar for ocean remote sensing using communication satellite signals[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(4): 619-623.
- [22] ZAVOROTNY V U, VORONOVICH A G. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(2): 951-964.

作者简介



王 峰 男, 1989 年 10 月出生于甘肃省兰州市, 现为北京航空航天大学电子信息工程学院副教授, 从事卫星导航及其遥感应用研究。
E-mail: wangf.19@163.com



杨东凯 男, 1972 年 7 月出生于山东省莱芜市, 现为北京航空航天大学电子信息工程学院教授, 从事卫星导航及其应用研究. 中国电子学会会员编号: E190004554S.
E-mail: yangdongkai@buaa.edu.cn