

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, doi:10.3969/j.issn.0253–4193.2020.03.015

Zhang Yun, Zhang Yangyang, Meng Wanting, et al. Research on sea surface altimetry model of airborne GNSS reflected signal[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(3): 149–156, doi:10.3969/j.issn.0253–4193.2020.03.015

机载 GNSS 反射信号海面测高模型的研究

张云¹, 张杨阳¹, 孟婉婷², 杨树瑚¹, 韩彦岭¹

(1. 上海海洋大学 信息学院, 上海 201306; 2. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘要: 相对于岸基 GNSS-R 技术, 机载 GNSS-R 优势在于其空间分辨率高、监测范围广, 可对特定区域范围进行高分辨率监测, 兼具了灵活的高度和方位调节的同时保障了更高的数据质量。本文主要研究了机载 GNSS-R 测高模型, 依据岸基 GNSS-R 码测高原理, 针对大气延迟、天线距离等进行修正, 优化机载测高模型, 同时采用 DTU10 全球海面平均高度及潮汐模型验证机载 GNSS-R 测高模型的精度。通过分析 2011 年 11 月 11 日, CSIC-IEEC 在芬兰波罗的海的 GNSS-R 机载数据, 针对不同仰角下的实验数据进行反演, 成功地实现了亚米级机载海面高度反演, 得出仰角大小会对测高结果精度产生较大影响的结论, 定性分析了仰角大小所引起的误差范围。本文的结果证明了机载 GNSS-R 的海面测高的可行性。

关键词: GNSS-R; 机载实验; 海面测高; 精度分析

中图分类号: P228.3

文献标志码: A

文章编号: 0253–4193(2020)03–0149–08

1 引言

海面高度是物理海洋、地球物理学、大地测量学等领域的基础数据。全球海面高度数据可以用于大洋环流的确定、大洋潮汐模型的建立以及中尺度气候模型的研究等, 因此获取高精度海面高度对气象学和海洋学都非常重要^[1]。GNSS-R(Global Navigation Satellite Systems Reflectometry)技术是目前海面测高中的新兴遥感技术, 属于被动接收技术, 通过接收经由反射面反射的反射信号与直射信号之间的差异进行物理量的反演。该技术在 1993 年, 由 Martin-Neira 教授首次提出^[2], 并迅速在国内外成为研究热点。GNSS-R 技术有众多优点, 例如拥有大量信号源、不受天气(云、雾)影响、低成本实时监测等^[3–4]。

机载 GNSS-R 较岸基 GNSS-R 相比, 其优势在于其空间分辨率高、监测范围广, 可对大范围的区域进行监测, 同时机载测高已经成为了星载测高技术的预

研技术, 因此 GNSS-R 机载测高正在被得到广泛的研究。目前 GNSS-R 机载测高技术主要包括码测高^[5–7]、载波相位测高^[8–13]、干涉测高^[14]、时延多普勒图(Delay-Doppler-Map, DDM)测高^[15–16]及信噪比测高^[17–18]等。国外团队对机载 GNSS-R 测高进行了相关研究, 取得了一定的研究成果^[19–20], 而国内大部分测高研究大部分集中于岸基开展的^[17, 21], 关于机载 GNSS-R 海面测高方面的研究较少, 缺少必要的实验成果及分析。

码测高技术是目前最常用的 GNSS-R 机载测高技术, 相对于其他技术, 具有实现方便, 抗干扰能力强的特点, 因此在 GNSS-R 移动平台的海面监测领域有着广泛的应用。本文在 GNSS-R 岸基码测高技术研究^[22]的基础上, 分析了 2011 年 11 月 11 日, CSIC-IEEC(Consejo Superior de Investigaciones Científicas(CSIC)—Institut d'Estudis Espacials de Catalunya(IEEC))在芬兰波罗的海进行的机载实验数

收稿日期: 2019–02–22; 修订日期: 2019–09–06。

基金项目: 国家自然科学基金(41376178, 41401489); 上海市大学青年教师基金(ZZHY13033)。

作者简介: 张云(1974—)男, 上海市人, 教授, 主要从事卫星导航定位和 GNSS-R 技术研究。E-mail: y-zhang@shou.edu.cn

据,在岸基反演的基础上,针对大气延迟、天线距离、海洋潮汐模型等进行修正,优化了GNSS-R机载海面测高模型,成功地反演了海面高度,证明了机载GNSS-R技术海面测高的可行性,在分析过程中,关于反射仰角的测高精度的影响做了定性的分析,得出了低反射仰角对测高结果精度产生较大影响的结论。

2 机载GNSS-R海面高度反演原理

2.1 GNSS-R码测高技术

码测高技术对直射信号的本地码进行适当延迟和多普勒频移补偿后,再生成反射信号^[23],它通过反射信号与直射信号之间的路径延迟进行高度反演。GNSS-R码测高技术基本概念如图1所示,其中延迟距离为 D_p 。

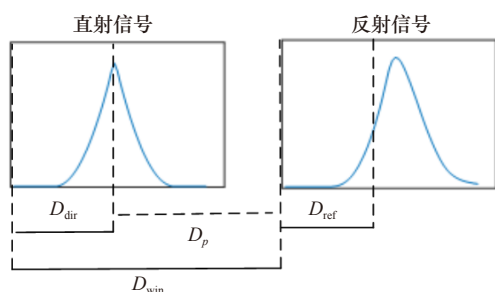


图1 GNSS-R码测高技术基本概念

Fig. 1 GNSS-R group delay altimetry basic concept

2.2 延迟路径模型

图1中的反射信号相对于直射信号的延迟路径 ρ 由下式给出,

$$\rho = D_{win} + D_{ref} - D_{dir} - D_{atm} - D_{ins}, \quad (1)$$

式中, D_{win} 为直射信号开始窗口至反射信号开始窗口距离; D_{dir} 为直射信号峰值位置; D_{ref} 为反射信号导数最大位置; D_{atm} 为大气延迟; D_{ins} 为反射天线和直射天线之间的距离。

通过对机载实验中使用反射信号峰值位置及导数最大位置反演出的结果进行对比,结果表明,在机载实验中,采用反射信号导数最大值位置时的误差比采用直射信号峰值位置时的误差小^[19]。因此,本文中选用反射信号导数最大位置作为反射信号的延迟位置。

在机载测高模型中,将考虑到大气延迟的干扰。由于本次实验中飞机高度处于大约3 km的高度,所以不对电离层进行考虑,只考虑对流层延迟进行误差修正。本文中,大气层的延迟 D_{atm} 使用下式计算^[24],

$$D_{atm} = \frac{4.6}{\sin e} \left(1 - e^{-\frac{H_a}{5000}} \right), \quad (2)$$

式中, e 为镜面反射点处仰角; H_a 为飞机上方直射接收天线所在的高度。

与岸基GNSS-R反演测高不同的是,由于直射接收天线与反射接收天线分别位于飞机的上方与下方,直射天线与反射天线位置不在同一个水平面上,所以在进行伪距测量时,对两个天线之间的距离(D_{ins})进行误差修正。由于缺少机载平台的姿态角信息,本文只选取飞机直线飞行时的数据进行分析,删除了飞机转向时的实验数据,在计算过程中,忽略了姿态角对天线距离的影响。

2.3 机载测高模型

结合延迟路径模型,机载测高模型如图2所示。

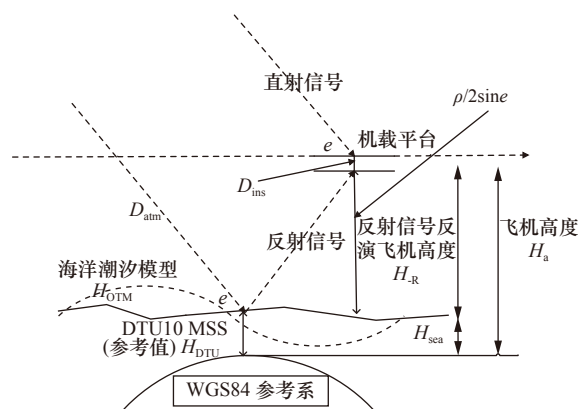


图2 机载测高模型

Fig. 2 Airborne altimetry model

本文在岸基GNSS-R测高模型^[22]的基础上,优化了机载GNSS-R测高模型,根据机载特点,增加了对大气延迟以及天线之间距离的修正,如图2中的 D_{atm} 及 D_{ins} 所示。同时,增加了对低仰角下反演结果的阈值判断。

根据公式(1)计算出延迟路径之后,通过下式得出GNSS-R反演的直射天线到海面的高度 H_{-R} ,

$$H_{-R} = \frac{\rho}{2\sin e} + D_{ins}. \quad (3)$$

通过接收机接收到的位置信息,可以得到飞机上方直射接收天线的高度(H_a)。通过计算飞机上方直射接收天线的高度(H_a)与GNSS-R反演的直射天线到海面的高度(H_{-R})之间的距离差,以及通过潮汐模型 H_{OTM} 的修正,可以得到海面高度(H_{sea}),

$$H_{sea} = H_a - H_{-R} + H_{OTM}. \quad (4)$$

3 实验介绍

3.1 实验环境介绍

本次实验数据为2011年11月11日,CSIC-IEEC在芬兰波罗的海进行的机载实验数据。本次机载实验采用接收机GOLD-RTR(GPS Open Loop Differential Real-Time Receiver)进行数据收集,它的采样率为

1 ms。其中, 直射信号接收天线位于飞机上方, 反射信号接收天线位于飞机下方, 天线增益均为 15 -dBi。其中在飞机上方, 安装了 Novatel 接收机用于提供时间、位置等信息。

3.2 实验数据介绍

本文采用了两个时间段的数据进行了分析, 同时选取镜面反射点仰角大于 75°的时间段作为高仰角, 小于 60°的时间段作为低仰角进行分析。

第一个实验数据时间段全球定位系统(Global Positioning System, GPS)时间为 452 008~453 350 s, 飞机的轨迹图如图 3a 所示。高仰角数据选取伪随机噪声码(Pseudo Random Noise code, PRN)12 号卫星, 镜面反射点仰角为 80.51°~84.29°; 低仰角数据选取 PRN25 号卫星, 镜面反射点仰角为 46.60°~56.78°。为了避免飞机转向所造成的影响, 去除了 GPS 时间 452 608~452 750 s 的转向时间, 只选取飞机沿直线飞行时的数据作为本次实验分析数据, 此时间段仰角变化如图 4a 所示。

第二个实验数据时间段 GPS 时间为 456 700~458 099 s, 飞机的轨迹图如图 3b 所示。高仰角数据选取 PRN25 号卫星, 镜面反射点仰角为 76.82°~79.93°;

低仰角数据选取 PRN12 号卫星, 镜面反射点仰角为 47.30°~58.30°。为了避免飞机转向所造成的影响, 去除了 GPS 时间 457 300~457 499 s 的转向时间, 选取飞机沿直线飞行时的数据作为本次实验分析数据, 此时间段仰角变化如图 4b 所示。

两个实验数据总结如表 1 所示。

3.3 模型验证数据介绍

在进行机载测高分析时, GNSS-R 获取的是瞬时海面高度, 因此需要消除波浪影响, 进行潮位改正, 获得海面高度(H_{sea})。本文选取丹麦技术大学(Technical University of Denmark, DTU10)全球海洋潮汐模型(Global Ocean Tide Model)作为本次实验的潮汐模型 $H_{OTM}^{[25]}$ 。

同时, 本文选取 DTU10 海洋平均海面高度^[26-28]作为本次实验的参考值 H_{DTU} 。公式(4)求得的结果(H_{sea})与 DTU10 海洋平均海面高度 H_{DTU} 进行对比, 可以验证 GNSS-R 反演的海面高度结果(H_{sea})的精度。

4 反演结果分析

4.1 镜面反射点

第一段实验时间期间, PRN12 和 PRN25 的镜面

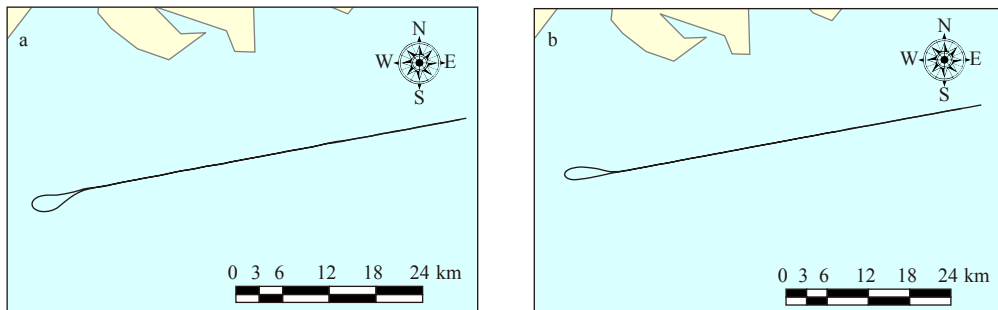


图 3 飞行轨迹图

Fig. 3 Flight trajectory

a. 第一个实验期间飞行轨迹; b. 第二个实验期间飞行轨迹

a is the flight trajectory during the first experiment; b is the flight trajectory during the second experiment

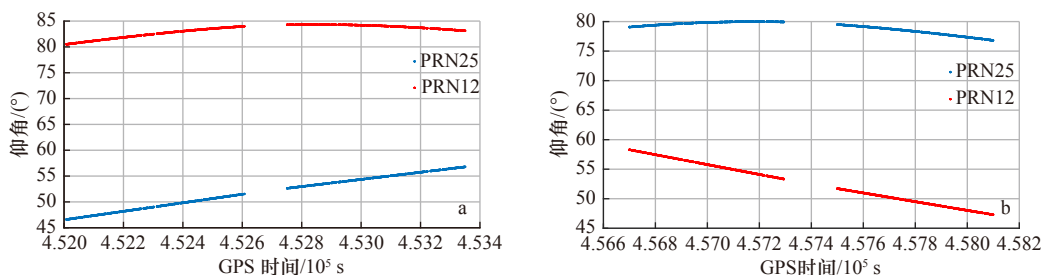


图 4 PRN12 号卫星(红)及 PRN25 号卫星(蓝)仰角变化

Fig. 4 Variation of PRN12 satellite (red) and PRN25 satellite (blue) elevation angle

a. 第一个实验期间仰角变化; b. 第二个实验期间仰角变化

a is the elevation angle change during the first experiment; b is the elevation angle change during the second experiment

表1 实验数据结果

Table 1 Result of experimental data

数据	GPS时间	仰角	卫星号	低/高仰角
第一个数据时间段	452 008~453 350 s	80.51°~84.29°	12	高
		46.60°~56.78°	25	低
第二个数据时间段	456 700~458 099 s	76.82°~79.93°	25	高
		47.30°~58.30°	12	低

反射点轨迹如图5a所示,第二段实验时间期间,PRN12和PRN25镜面反射点轨迹如图5b所示。从图5可知,所有的反射信号数据都落在海面范围内。

4.2 海面高度反演

以GPS时间452 008 s, PRN12的数据分析为例。首先,获取直射信号与反射信号原始I/Q波形之后,对1 s的数据长度进行筛选。本次实验中数据采样频率为1 kHz,基于大量数据分析所得到的结论,为了考虑数据的完整性,选取1 s数据包含大于800个原始数据进行分析,这个范围可以剔除掉由于波形异常从而导致结果不准确的情况。在选取数据之后,对它们进行1 ms相干累加及1 s非相干累加操作。至此,得出1 s的直射/反射信号功率波形,接着对直射/反射信号波形分别计算直射信号峰值位置 D_{dir} 及反射信号导数最大位置 D_{ref} 。此时通过1 ms相干累加及1 s非相干累加操作以后的直射信号/反射信号图如图1中的直射信号及反射信号所示。

通过了误差模型,以及已知的设置,利用公式(4),得到了该时刻通过反射信号反演的海面高度是18.04 m,该时刻的海面高度值是16.79 m。

4.3 第一段实验结果

第一段实验时间期间,在高仰角情况下,即PRN12号卫星作为观测卫星,通过反射信号反演的海面高度如图6a所示。在低仰角情况下,即PRN25号卫星作

为观测卫星,通过反射信号反演的海面高度如图6b所示。得出1 s结果之后,对结果进行20 s平均处理。进行平均操作之后的结果如图7所示,图7a是20 s平均后(PRN12号卫星)反演的高度图,图7b是20 s平均后(PRN25号卫星)反演的高度图。

4.4 第二段实验结果

第二段实验时间期间,发现在低仰角的情况下,GPS时间段456 700~457 299 s(PRN12号卫星)期间,反演的海面高度出现几百米误差的异常值,异常反演海面高度如图8a所示。经过分析,发现在这个时间段PRN12号卫星接收到的直射信号异常,导致所得的波形无法计算出准确的结果。

图9a是直射信号正常功率波形,图9b是GPS时刻456 793 s的直射信号功率波形,通过比较图9a与图9b的波形,发现在图9b时刻的直射功率波形异常,推测在低仰角时,直射天线可能受到了机身的干扰,导致直射信号异常。实验采用的接收机的直射信号采样总共有64个相关器,采样步长为15 m,通常情况下直射信号的相关峰值位置在第34个相关器正负1个步长距离间波动,直射信号的峰值位置范围(D_{dir})为480~510 m。所以,本文在低仰角数据反演前,对直射信号的峰值位置范围进行阈值判断($480 < D_{dir} < 510$),不满足条件的数据将不参与高度反演计算,经过筛选之后的海面高度如图8b所示,与图8a比较后可以发现,经过筛选后,异常值得到了有效的删除,反演的可靠性得到了提高。

在高仰角情况下,即PRN25号卫星作为观测卫星,通过反射信号反演的海面高度如图10a所示。在低仰角情况下,即PRN12号卫星作为观测卫星,经过对异常数据删除之后的反演高度如图10b所示。在得出1 s结果之后,对数据进行20 s平均处理。进行平均操作之后的结果如图11所示。图11a是20 s平

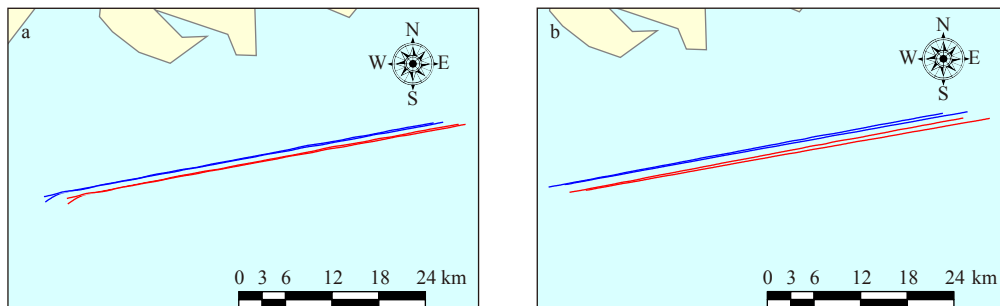


图5 PRN12(红色)和PRN25(蓝色)卫星镜面反射点轨迹

Fig. 5 PRN12 (red) and PRN25 (blue) satellite specular reflection point trace

a. 第一个实验期间镜面反射点轨迹; b. 第二个实验期间镜面反射点轨迹

a is the specular reflection point trajectory during the first experiment; b is the specular reflection point trajectory during the second experiment

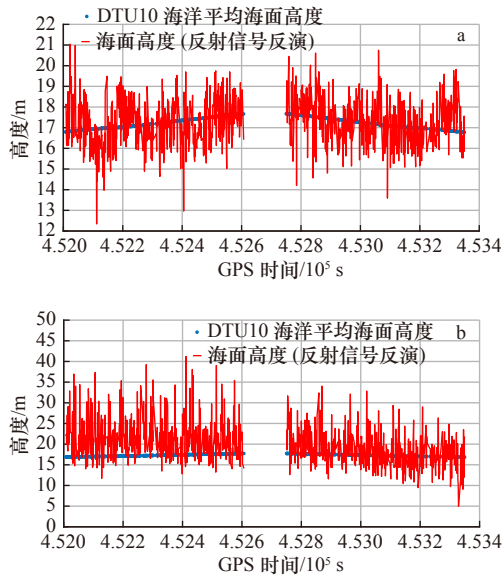


图6 第一个数据时间段 1 s 高度对比
Fig. 6 The first data period 1 s height comparison

a. 高仰角情况下高度对比; b. 低仰角情况下高度对比
a is height comparison for high elevation angles; b is height comparison for low elevation angles

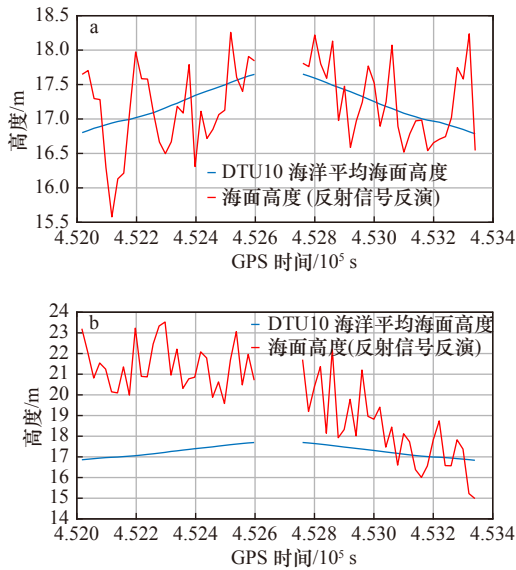


图7 第一个数据时间段 20 s 平均后高度对比
Fig. 7 The first data period after 20 s average height comparison

a. 高仰角情况下高度对比; b. 低仰角情况下高度对比
a is height comparison for high elevation angles; b is height comparison for low elevation angles

均后 (PRN25 号卫星) 反演的高度图, 图 11b 是 20 s 平均后 (PRN12 号卫星) 反演的高度图。

4.5 数据分析总结

本文将以偏差 (Bias)、平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 和平均绝对误差的标准偏差 (Stand-

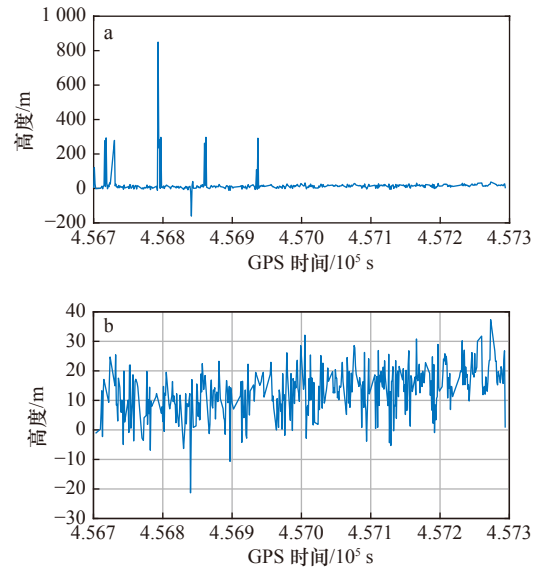


图8 反演高度异常值(a)及筛选过后高度值(b)
Fig. 8 Inversion of height anomaly values(a) and filtered height values(b)

ard Deviations, STD) 作为实验的评估标准。三者的计算公式如下式所示,

$$\text{Bias} = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n (\tilde{x}_a - x_a), \quad (5)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n (|\tilde{x}_a - x_a|), \quad (6)$$

$$\text{STD} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{a=1}^n (|\tilde{x}_a - x_a| - \text{MAE})^2}, \quad (7)$$

式中, \tilde{x}_a 为反演的海面高度值 H_{sea} ; x_a 为参考值 H_{DTU} 。

表 2 为 1 s 平均, 10 s 平均, 15 s 平均和 20 s 平均的实验结果。通过表 2 中的结果显示, 在低仰角情况下, 由于接收到的信号会受到干扰, 所以反演的海面高度结果比较不稳定, 在经过异常值处理之后, 仍然与参考值相比普遍偏大, 且离散度高; 高仰角下受到的干扰则较小, 通过反射信号反演的海面高度与参考值相比误差较小且离散较低, 通过一定时间的平均之后可以消除波浪的影响, 提高精度, 其中 20 s 平均的结果精度最高, 可以达到亚米级的精度, 特别是第一阶段的数据, 由于高仰角在 80° 以上, 甚至达到了厘米级的精度, 证明了 GNSS-R 机载海面测高的可行性。

5 结论

本文在岸基 GNSS-R 海面测高基础上, 建立了机载测高模型, 依据码延迟测高原理, 通过分析 2011 年 11 月 11 日的机载数据, 分别对两个时间段的试验数据段进行分析, 对高仰角 (75° 以上) 和低仰角 (60° 以

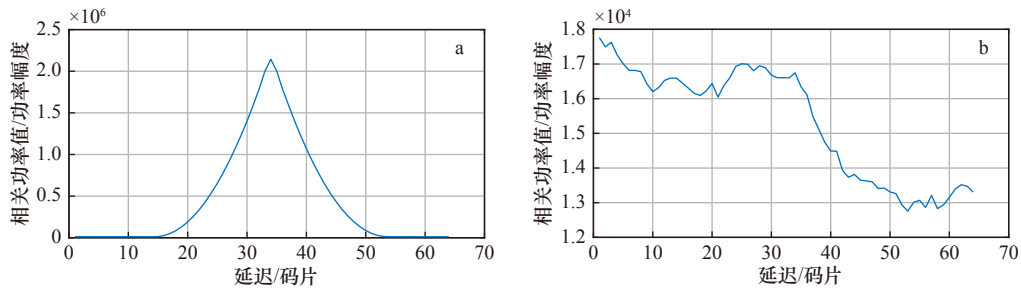


图 9 直射信号正常功率波形(a)及异常功率波形(b)

Fig. 9 Direct signal normal(a) and abnormal power waveform(b)

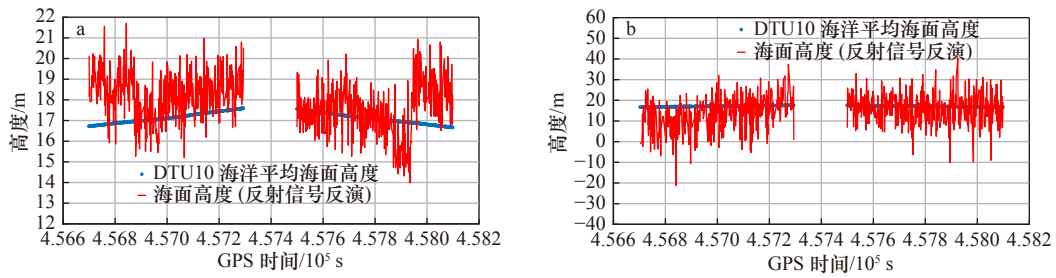


图 10 第二个数据时间段 1 s 高度对比

Fig. 10 The second data period 1 s height comparison

a. 高仰角情况下高度对比; b. 低仰角情况下高度对比

a is height comparison for high elevation angles; b is height comparison for low elevation angles

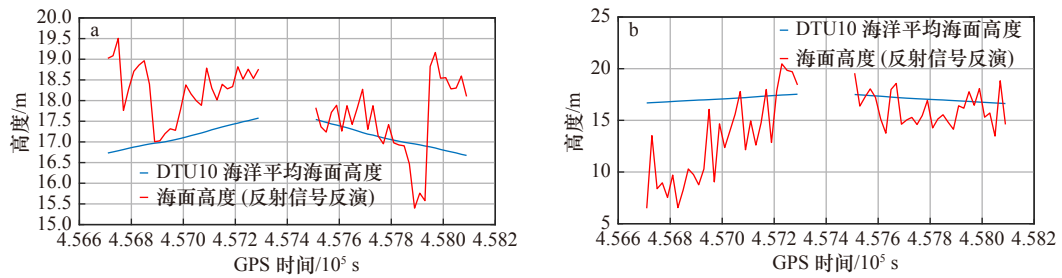


图 11 第二个数据时间段 20 s 平均后高度对比

Fig. 11 The second data period after 20 s average height comparison

a. 高仰角情况下高度对比; b. 低仰角情况下高度对比

a is height comparison for high elevation angles; b is height comparison for low elevation angles

表 2 实验数据结果

Table 2 Result of experimental data

实验数据	卫星号	仰角	评估标准	1 s	10 s	15 s	20 s
第一个数据时间段	12	高	Bias/m	0.009	0.012	-0.006	-0.007
			MAE/m	0.890	0.492	0.462	0.447
			STD/m	0.690	0.395	0.347	0.329
	25	低	Bias/m	2.600	2.595	2.581	2.578
			MAE/m	3.934	2.922	2.879	2.811
			STD/m	3.781	2.078	1.866	1.789
第二个数据时间段	25	高	Bias/m	0.798	0.792	0.789	0.792
			MAE/m	1.211	1.002	0.981	0.972
			STD/m	0.874	0.727	0.721	0.718
	12	低	Bias/m	-2.362	-2.544	-2.543	-2.533
			MAE/m	5.900	3.523	3.226	3.179
			STD/m	5.056	3.341	2.951	2.818

注: Bias表示偏差, MAE表示平均绝对误差, STD表示平均绝对误差的标准偏差。

下)的结果进行了对比分析。

经过数据分析,证明了 GNSS-R 机载技术可以实现高时间分辨率以及较大范围的海面高度反演,并且通过采用 20 s 的数据平均方法以后,可以有效地增加反演精度,达到亚米级精度。

通过分析同一时刻下,不同反射仰角的反射信号反演的海面高度的结果分析,高仰角的反演结果更加稳定、准确。基于实验结果,进行机载测高反演时,选取仰角大于 75°的数据可以减少噪声干扰以及机身对直射信号的干扰,得到更高精度的反演结果。同时

在低仰角下对直射信号异常现象进行了判断,对直射信号原始数据进行筛选后,提高了低仰角下反演结果的可靠性。本论文中所提出的 GNSS-R 海面测高模型也可以作为星载测高的理论基础。

致谢: 感谢 CSIC-IEEC 提供本次论文的分析数据,感谢北京航空航天大学杨东凯教授、CSIC-IEEC 的李伟强博士、上海航天电子技术研究所周勃高级工程师、秦瑾工程师在 GNSS-R 机载数据分析方法上提供的建议。

参考文献:

- [1] 孙剑. GNSS-R海洋反射接收机的控制设计及实现[D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2010.
Sun Jian. Design and realization of control system for the GNSS-R receiver[D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [2] Martin-Neira M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): application to ocean altimetry[J]. *ESA Journal*, 1993, 17(4): 331–355.
- [3] Park H, Valencia E, Camps A, et al. Delay tracking in spaceborne GNSS-R ocean altimetry[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(1): 57–61.
- [4] Ablain M, Cazenave A, Valladeau G, et al. A new assessment of the error budget of global mean sea level rate estimated by satellite altimetry over 1993–2008[J]. *Ocean Science*, 2009, 5(2): 193–201.
- [5] Cardellach E, Nogues-Correig O, Ribo S, et al. Centimeter-level group-delay altimetric precision using the new PARIS interferometric technique[C]//American Geophysical Union, Fall Meeting 2010. AGU, 2010.
- [6] Berry R, Mattos P G, Kale I. Group delay and phase delay in GNSS systems[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2013, 16(3): 210–219.
- [7] Guo Fei, Zhang Xiaohong, Wang Jinling. Timing group delay and differential code bias corrections for BeiDou positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(5): 427–445.
- [8] Semmling A M, Leister V, Saynisch J, et al. A phase-altimetric simulator: studying the sensitivity of earth-reflected GNSS signals to ocean topography[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(11): 6791–6802.
- [9] Cardellach E, Ao C O, De la Torre Juárez M, et al. Carrier phase delay altimetry with GPS-reflection/occultation interferometry from low Earth orbiters[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(10): L10402.
- [10] Germain O, Ruffini G. A revisit to the GNSS-R code range precision[C]//Proceedings of the GNSS-R'06 Workshop. The Netherlands, 2006.
- [11] Stosius R, Beyerle G, Semmling M, et al. Tsunami detection from space using GNSS Reflections: Results and activities from GFZ[C]//2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2010.
- [12] Carreno-Luengo H, Camps A, Ramos-Pérez 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.
- [13] Carreno-Luengo H, Camps A, Perez-Ramos I, et al. 3Cat-2: A P(Y) and C/A GNSS-R experimental nano-satellite mission[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Melbourne, VIC, Australia: IEEE, 2014.
- [14] Rius A, Fabra F, Ribó S, et al. PARIS Interferometric Technique proof of concept: Sea surface altimetry measurements[C]//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich, Germany: IEEE, 2012.
- [15] Park J, Johnson J T, O'Brien A, et al. Studies of TDS-1 GNSS-R ocean altimetry using a “full DDM” retrieval approach[C]//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Beijing, China: IEEE, 2016.
- [16] Mashburn J, Axelrad P, Lowe S T, et al. Global ocean altimetry with GNSS reflections from TechDemoSat-1[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(7): 4088–4097.
- [17] Zhang Yun, Li Binbin, Tian Luman, et al. Phase altimetry using reflected signals from BeiDou GEO satellites[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(10): 1410–1414.
- [18] Larson K M, Ray R D, Nievinski F G, et al. The accidental tide gauge: a GPS reflection case study from Kachemak bay, Alaska[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(5): 1200–1204.
- [19] Cardellach E, Rius A, Martín-Neira M, et al. Consolidating the precision of interferometric GNSS-R ocean altimetry using airborne experimental data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(8): 4992–5004.
- [20] Semmling A M, Beckheinrich J, Wickert J, et al. Sea surface topography retrieved from GNSS reflectometry phase data of the GEO-HALO flight mission[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(3): 954–960.

- [21] Zhang Yun, Tian Luman, Meng Wanting, et al. Feasibility of code-level altimetry using coastal BeiDou reflection (BeiDou-R) setups[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(8): 4130–4140.
- [22] 沈思明, 张云, 杨树瑚, 等. GNSS反射信号海面高度测量及风速对反演精度的影响分析[J]. *全球定位系统*, 2017, 42(4): 83–89, 101. Shen Siming, Zhang Yun, Yang Shuhu, et al. Sea surface altimetry using GNSS-R signal and analysis of retrieval accuracy influenced by wind speed[J]. *Gnss World of China*, 2017, 42(4): 83–89, 101.
- [23] Alonso-Arroyo A, Querol J, Lopez-Martinez C, et al. SNR and standard deviation of cGNSS-R and iGNSS-R scatterometric measurements[J]. *Sensors*, 2017, 17(12): 183.
- [24] Niell A E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, 101(B2): 3227–3246.
- [25] Stammer D, Ray R D, Andersen O B, et al. Accuracy assessment of global barotropic ocean tide models[J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, 52(3): 243–282.
- [26] Haddad M, Hachemi H, Taibi H. Assessment of Gravity Anomaly Surfaces (DTU10, EGM2008 and ITG-Goce02) in Western Mediterranean Sea[J]. *Mediterranean Journal of Modeling and Simulation*, 2015, 3(1): 87–99.
- [27] Clarizia M P, Ruf C, Cipollini P, et al. First spaceborne observation of sea surface height using GPS-Reflectometry[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(2): 767–774.
- [28] Li Weiqiang, Cardellach E, Fabra F, et al. First spaceborne phase altimetry over sea ice using TechDemoSat-1 GNSS-R signals[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(16): 8369–8376.

Research on sea surface altimetry model of airborne GNSS reflected signal

Zhang Yun¹, Zhang Yangyang¹, Meng Wanting², Yang Shuhu¹, Han Yanling¹

(1. College of Information, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Compared with shore-based GNSS-R technology, the airborne GNSS-R has the advantages of high spatial resolution, wide monitoring range, high-resolution monitoring of specific areas, and flexible height and azimuth adjustments. This paper mainly studies the airborne GNSS-R altimetry model, based on the shore-based GNSS-R code altimetry principle, corrects the atmospheric delay, antenna distance, etc., optimizes the airborne altimetry model, and uses the DTU10 global sea level average height and tide. The model verifies the accuracy of the onboard GNSS-R altimetry model. By analyzing the GNSS-R airborne data of the CSIC-IIEEC in the Baltic Sea in Finland on November 11, 2011, the inversion of the experimental data at different elevation angles was successfully carried out, and the inversion of the sub-meter airborne sea surface height was successfully achieved. The conclusion that the elevation angle has a great influence on the accuracy of the altimetry results qualitatively analyzes the error range caused by the elevation angle. The results of this paper demonstrate the feasibility of sea level altimetry for airborne GNSS-R.

Key words: GNSS-R; airborne experiment; sea surface altimetry; accuracy analysis