0254-6124/2022/42(3)-0492-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Dongwei, SUN Yueqiang, WANG Xianyi, BAI Weihua, DU Qifei, XIA Junming, HAN Ying. A New GNSS-R Interferometric Ocean Altimetry Using Beidou-3 Signal (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(3): 492–499. DOI:10.11728/cjss2022.03.210315029

一种基于北斗三号系统的 GNSS-R 海面干涉测高技术*

王冬伟[1,2,3,4,5] 孙越强[1,2,3,4,5] 王先毅[1,2,3,4,5]
白伟华[1,2,3,4,5] 杜起飞[1,3,4,5] 夏俊明[1,2,3,4,5] 韩 英[6]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(天基空间环境探测北京市重点实验室 北京 100190)

4(中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室 北京 100190)

5(掩星探测与大气气候应用国际联合实验室 北京 100190)

6(北京石油化工学院数理系 北京 102617)

摘 要 GNSS-R 干涉测高技术可用于中尺度海面高度观测，具有空间分辨率高、测量精度高等优势。与传统的 GNSS-R 本地码测高技术相比，GNSS-R 干涉测高技术可以有效提升高度测量精度。虽然 GNSS-R 干涉测高技术已有一些研究，但是基于北斗三号的干涉测高应用还很少。本文根据 GNSS-R 干涉测高技术优势，针对北斗三号系统在干涉测高技术上的应用，研发了支持北斗三号的 GNSS-R 干涉测高接收机并描述了整体架构及实现。利用所研发的接收机进行水面干涉测高试验，首次获取了北斗三号 B1 和 B2 干涉测高波形，与传统 GPS L1 和北斗 B1 本地码测高波形进行对比。对两种方法计算出的水面高度进行对比，结果显示北斗三号干涉测高精度明显优于 GPS L1 和北斗 B1 传统本地码测高精度。

关键词 GNSS-R，北斗三号，干涉测高技术，本地码测高技术

中图分类号 TN98

A New GNSS-R Interferometric Ocean Altimetry Using Beidou-3 Signal

WANG Dongwei[1,2,3,4,5] SUN Yueqiang[1,2,3,4,5] WANG Xianyi[1,2,3,4,5]
BAI Weihua[1,2,3,4,5] DU Qifei[1,3,4,5] XIA Junming[1,2,3,4,5] HAN Ying[6]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

* 国家自然科学基金项目（41505030, 41606206, 41775034），中国科学院科研装备研制项目（YZ201129）和中国科学院青年创新促进会基金（2018180）共同资助

2021-03-13 收到原稿，2022-01-15 收到修定稿

E-mail：wangdongwei@nssc.ac.cn

2(*University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049)

3(*Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration*, *Beijing* 100190)

4(*Key Laboratory of Environmental Space Situation Awareness Technology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

5(*Joint Laboratory on Occultations for Atmosphere and Climate*, *Beijing* 100190)

6(*Department of Mathematics and Physics*, *Beijing Institute of Petrochemical Technology*, *Beijing* 102617)

Abstract GNSS-R interferometric altimetry can be used for meso-scale sea level observation with the advantages of high spatial resolution and high measurement accuracy. Compared with the traditional GNSS-R which uses local code tracking for altimetry, GNSS-R interferometric could effectively improve the altimetry accuracy. Although a lot of researches had been carried out in GNSS-R interferometric altimetry around the world, there are few researches in the application of interferometric altimetry using Beidou-3 signal. This article introduces the basic theory of GNSS-R interferometric altimetry technology and its advantages. Aiming at the application of Beidou-3 signal in interferometric altimetry, a GNSS interferometric altimetry instrument had been developed. The overall architecture and implementation of this new instrument is introduced in this paper. An open-field GNSS-R water surface altimetry experiments was conducted using this instrument. In the experiment, the interferometric waveforms generated from Beidou-3 B1 and B2 signal were obtained for the first time, and were compared with the traditional GPS L1 and Beidou-2 B1 local code tracking waveforms. Finally, the inversion results of the water surface height calculated by the two approaches are compared. The comparison results show that the precision of Beidou-3 system's interferometric measurement is significantly better than that of GPS L1 and Beidou-2 B1 traditional local code altimetry.

Key words GNSS-R, Beidou-3, Interferometric altimetry, Local code altimetry

0 引言

随着全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的不断发展,基于 GNSS 反射信号的对地遥感探测技术(GNSS-Reflectometry)得到越来越广泛的应用[1]。GNSS-R 利用反射信号的功率、相位与遥感要素间的统计关系,反演海面风场[2,3]、土壤湿度[4,5]、海冰厚度[6] 等环境参数。1993 年 GNSS 反射信号首次被提出可以用于中尺度海面高度测量[7],进而为全球重力场观测提供了有力的数据支持,该技术被称为 GNSS-R 测高技术(GNSS-R Altimetry)。该技术具有低功耗、低成本、信源丰富、空间分辨率高、覆盖范围广等优点。GNSS-R 干涉测高技术是 GNSS-R 测高技术中最为关键的技术,在 GNSS-R 测高技术优势基础上,将海面高度测量精度提升至分米量级。若干涉测高技术在海面高度探测中得到广泛应用,全球海面高度观测精度会得到显著提升。当前中国北斗三号导航系统已经面向全球提供服务,GNSS-R 干涉测高技术在全球海面高度探测领域的重要性越发突显。

国际上多个国家和机构已相继对 GNSS-R 干涉测高技术开展深入研究,并取得一些研究结果。2011 年,有研究首次提出了星载 GNSS-R 干涉测高技术的详细设计方案[8],包括天线设计、接收机设计及测量精度评估。Camps 等[9] 针对干涉测高技术提出了详细的在轨校准方案,使得干涉测高技术中的系统误差得到有效消除。文献 [10] 描述了一种软件方式的 GNSS-R 干涉接收机,利用该接收机成功接收到 GPS 和 GAL 的干涉测高波形。Rius 等[11] 在荷兰基于干涉测高技术并利用高增益天线首次在岸边测量得到河面高度,取得了较高的测量精度。ESA 正在开展 GEROS-ISS 项目研究,该项目将在国际空间站上安装 GNSS-R 干涉测高仪,实现全球海面高度观测[12],目前正处于工程研制阶段。

虽然 GNSS-R 干涉测高技术已得到深入研究和应用，但是目前的研究均基于 GPS 和 GALILEO 导航卫星系统，中国北斗三号系统在干涉测高技术方面的应用研究较少。本文利用研发的北斗三号 GNSS-R 干涉测高接收机验证了北斗三号系统在干涉测高技术中应用的可行性。外场试验首次接收到北斗三号 B1 和 B2 信号的干涉测高波形且反演了海面高度，并与传统的本地码测高结果进行了对比分析。

1 GNSS-R 干涉测高技术原理

GNSS-R 测高技术是利用被海面反射的 GNSS 信号与直射信号之间的路径延迟，结合接收机与发射机之间几何路径反演海面高度的一种新型探测技术。通常情况下，GNSS-R 接收机一般需要配置两副天线，朝上的右旋圆极化天线用于接收直达信号，朝下的左旋圆极化天线用于接收反射信号。接收机获取反射信号的方式有两种：本地码测高技术和干涉测高技术。

本地码测高技术是指接收机本地生成 GNSS 卫星伪码，与输入信号相关来获取反射相对直射信号的延迟信息。图 1 为本地码测高技术实现，目前大多数导航接收机均采用该方式获取导航信号。

干涉测高技术是指接收机利用直射信号与反射信号直接进行干涉相关，进而获取反射相对直射信号延迟信息。反射信号被海洋表面反射后，信号极性、延迟和多普勒均会发生变化，但信号组成、信号带宽与直射信号完全一致，二者存在非常一致的相干性。因此，若将延迟与多普勒补偿后的直射信号与反射信号进行干涉相关，理论上可以获取更为理想的测高波形。图 2 给出了干涉测高技术原理。

虽然本地码测高技术可以实现信号的稳定跟踪，然而该技术受限于导航信号的公开性。例如，普通用户在 L1 频段只能跟踪码速率极低的 L1C/A 码信号（带宽 2.046 MHz），而高速的 P 码（带宽 20.46 MHz）和 M 码（带宽 32 MHz）却无法使用，使得海面高度的测量精度一直无法得到有效提升。

GNSS-R 干涉测高技术继承了 GNSS-R 测高的

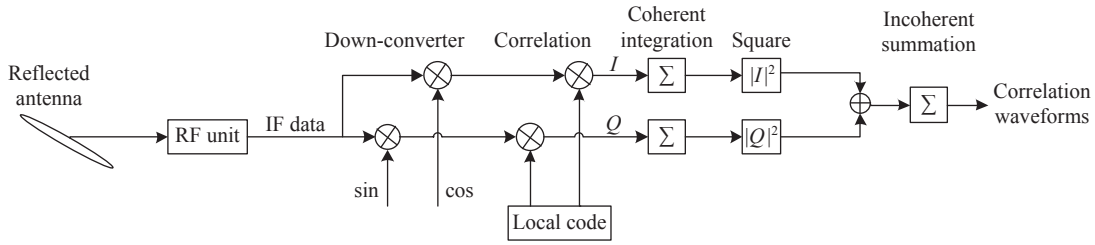


图 1 本地码测高技术工作原理

Fig. 1 Diagram of local code tracking technology

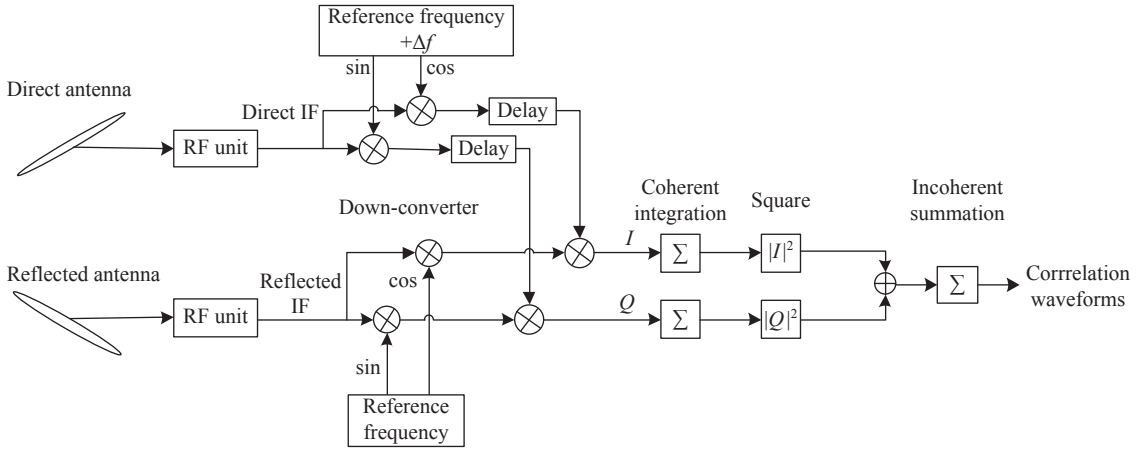


图 2 干涉测高技术工作原理

Fig. 2 Diagram of interferometric tracking technology

所有技术优势, 且有效提升了高度测量精度。该技术有效利用了导航信号中所有带宽的信号, 使得可利用的信号带宽更宽, 测量精度更高。以 GPS 为例, 图 3 给出了 GPS L1 频段混合码干涉测高波形与 GPS L1C/A 本地码测高波形的对比。结果表明, GPS L1 频段的干涉测高波形比单独 GPS L1C/A 本地码测高波形更加陡峭, 使得波形峰值处的分辨能力更强, 测量精度更高[13,14]。

虽然干涉测高技术相比本地码测高技术优势明显, 然而干涉测高技术对输入信号的强度要求比较苛刻, 只有足够强的直射与反射信号才能相关得出理想的干涉测高波形。复杂海况对反射信号的信噪比影响较大, 因此在相对平静的海面上, 干涉测高技术更能充分展现其优越的测高性能。复杂海况对干涉测高的精度会造成一定程度影响。

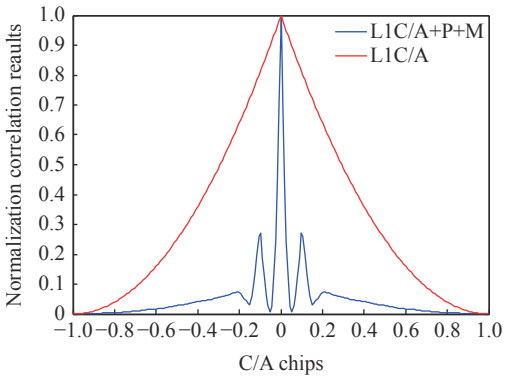


图 3 GPS L1 频段干涉测高与 GPS L1 本地码测高波形

Fig. 3 GPS L1 C/A and L1 interferometric ACF results

表 1 列举了 GNSS-R 干涉测高技术与本地码测高技术可利用的码型及带宽。从表 1 可以看出, GNSS-R 干涉测高技术充分利用了各个导航系统分配的信号带宽, 每种导航系统的信号利用率达到最大。

北斗三号系统在 4 个频段上调制了多种带宽的码信号, 适用于不同用户的多种使用要求, 具有非常强的可用性。北斗三号系统在 B2 频段调制了 B2A 和 B2B 两种码型, 本地码测高技术只能对其中一种码型进行跟踪, 可利用带宽最大仅为 20.46 MHz。干涉测高技术可利用的信号带宽最高达 51.15 MHz。自从北斗三号系统对全球提供服务以来, 其目前在轨卫星数量已超过 32 颗, 使得同一时间可观测的反射卫星数量显著提升。

2 GNSS-R 干涉测高精度评估

为评估 GNSS-R 干涉测高技术的测高精度, 文献 [8] 从信号的相关理论出发, 推导了测高波形形状、信噪比及非相干累加次数与测量精度之间的关系, 即

$$\sigma_h = \frac{1}{2\cos\theta}\frac{\overline{P}}{\overline{P}'}\frac{1}{\sqrt{N_{\text{inc}}}}\sqrt{\left(1+\frac{1}{S/N}\right)^2+\left(\frac{1}{S/N}\right)^2}, \tag{1}$$

$$K = \frac{\overline{P}}{\overline{P}'}. \tag{2}$$

表 1 本地码测高技术与干涉测高技术可利用的 GNSS 信号对比

Table 1 Available GNSS signals using interference and local code tracking technology

导航系统	频段	码型及带宽/MHz	本地测高技术可使用码型	本地测高技术可利用带宽/MHz	干涉测高技术可使用码型	干涉测高技术可利用带宽/MHz
GPS	L1	L1C/A+L1P(授权)+M(授权)(32.736)	L1C/A	2.046	L1C/A+L1P+M	32.736
	L2	L2C+L2P(授权)(20.46)	L2C	2.046	L2C+L2P	20.46
	L5	L5I+L5Q(20.46)	L5I+L5Q	20.46	L5I+L5Q	20.46
BDS	B1I	B1I(4.092)	B1I	4.092	B1I	4.092
	B1C	B1C(32.736)	B1C	32.736	B1C	32.736
	B2	B2A+B2B(51.15)	B2A或B2B	20.46	B2A+B2B	51.15
	B3I	B3I(20.46)	B3I	20.46	B3I	20.46
GAL	E1	E1B+E1C(32)	E1B或E1C	4.092	E1B+E1C	32
	E5	E5a+E5b(51.15)	E5a或E5b	20.46	E5a+E5b	51.15
	E6	E6B+E6C(40.92)	授权	–	E6B+E6C	40.92

式中：θ为信号入射角；$\overline{P}$为测高波形的峰值功率，$\overline{P}'$为测高波形导数的峰值功率；K为波形因子，表征了波形的陡峭度，其值越小，跟踪曲线越陡峭，测量精度越高。式(1)和式(2)同样适用于本地码测高技术的高度精度评估。图 4 为相同信噪比和相同非相干累加次数情况下，GPS L1 干涉波形、北斗三号 B1 干涉测高波形、北斗三号 B2 干涉测高波形与 GPS L1 本地码测高波形理论估算的K值与高度精度之间的关系。结果表明，北斗干涉测高波形的高度精度明显优于 GPS L1 本地码测高精度。

N_{inc}为非相关累加次数，其值越大，噪声越小，测量精度越高，如图 5 所示。然而受测高分辨率和接收机动态的限制，非相干累加次数无法达到无限增加。

S/N为干涉测高信噪比，其值越大则高度测量精度越高，图 6 仿真了信噪比与测高精度之间的关系。

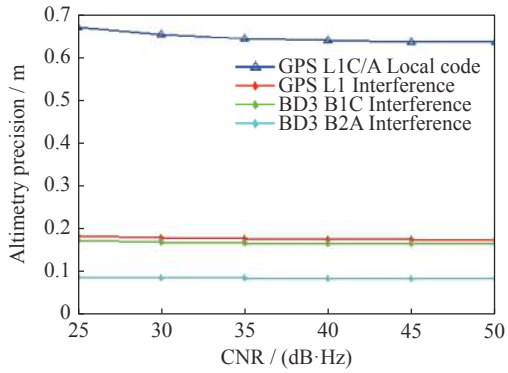


图 4 不同波形因子 K 和信号载噪比 CNR 与测高精度的关系

Fig. 4 Relationships between K, CNR and the height precision

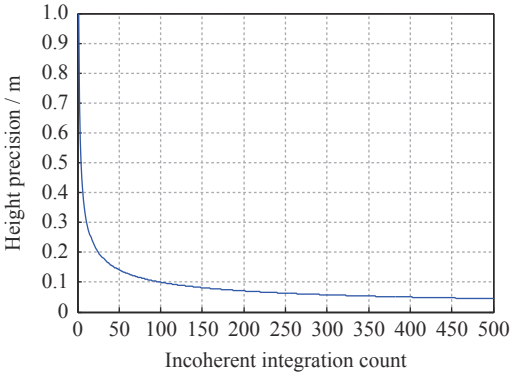


图 5 非相干累加次数与测高精度的关系

Fig. 5 Relationship between incoherent integration count and the height precision

信噪比大于 1 dB 以后，信噪比的增加已对测高精度不再敏感。

接收信号带宽对测高精度的影响需要综合考虑。信号带宽越宽，噪声越大，信噪比越低，不利于精度提升；但带宽越宽，包含的信号越多，干涉测高波形更加陡峭，反而有助于提高测高精度。图 7 仿真了北斗三号 B1 频段带宽与测高精度的关系。结果表明，北斗三号 B1 频段的信号带宽处于 33 MHz 时测高精度达到最优，该值恰好为 B1 频段的全部信号带宽。

3 GNSS-R 干涉测高接收机设计

GNSS-R 干涉测高接收机用于收集直射信号和海面反射信号，并进行干涉相关处理。接收机支持北斗 B1、B2 频段，GPS L1、L5 频段，GAL E1、E5 频段的干涉相关。该接收机在硬件设计上与普通

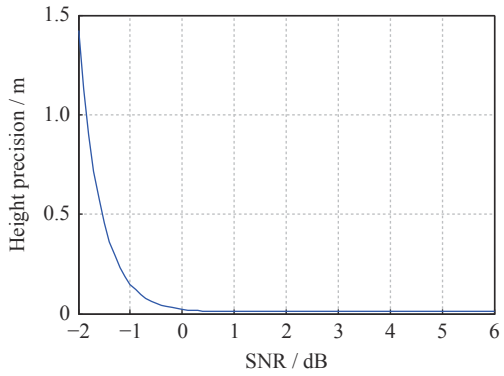


图 6 干涉信噪比 SNR 与测高精度的关系

Fig. 6 Relationships between SNR and the height precision

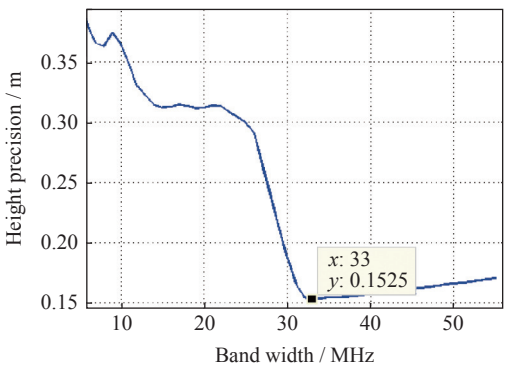


图 7 B1 频段信号带宽与测高精度的关系

Fig. 7 Relationship between the B1 bandwidth and height precision

GNSS 导航接收机类似, 由射频单元、基带数据处理单元和控制单元构成。

射频单元完成信号放大、下变频, 最终得到模拟中频信号, 该信号进入 A/D 采集单元后转变为数字中频信号。

数据处理单元由可编程 FPGA 实现, 完成数字中频信号处理, 信号处理包括两部分, 即导航信号处理和反射信号处理。导航信号处理实现了导航信号的捕获与跟踪。将捕获跟踪到的导航卫星信息送至控制模块进行定位解算。定位解算完成后, 导航信号处理模块向反射处理单元提供准确的同步信号。

反射信号处理单元为干涉测高接收机的核心单元, 实现直射与反射信号的干涉相关, 干涉相关通道中包含直射、反射信号的接收处理, 以及直/反信号的干涉相关处理。处理产生的干涉测高波形输出至控制单元。

控制单元负责接收机的全局控制, 包括导航信号的捕获跟踪控制、定位解算、反射预测、干涉通道控制以及数据转发等功能。图 8 为接收机的整体结构。

4 试验验证

4.1 试验设计

为验证北斗三号系统在 GNSS-R 干涉测高技术中应用的可行性, 2019 年 9 月利用上述自研 GNSS-R 干涉测高接收机在怀柔水库进行了 4 天的岸基测试。

本试验使用了两副天线, 一副为直/反干涉天线, 另一副为导航天线。直/反干涉天线固定在水面上方平台支架上, 用于接收直射与反射信号; 导航天线固定在支架最上方, 用于接收机定位和时间同步。两副天线输出均连接至 GNSS-R 干涉测高接收机。

4.2 测高波形

本次岸基试验利用 GNSS-R 干涉测高接收机成功实现了多种 GNSS 信号跟踪, 并首次接收到北斗三号 B1 频段和 B2 频段的干涉测高波形。图 9(a)给出了接收机首次接收到的北斗三号 B1 和 B2 干涉测高波形。图 9(b)为 GPS L1 与 L5 信号的干涉测高波形, 从跟踪波形可以看出, L1 干涉测高的波形顶端部分形状与 L5 基本一致, 是由于 L1 频段中混合了 C/A、P 及 M 码, 虽然 P 码与 M 码均属于授权码, 普通用户无法使用, 但是干涉测高技术仍可利用这些授权码提升波形的陡峭度, 进而提升测量精度。图 9(c)为 GAL E1 与 E5 的干涉测高曲线。图 10 为 BD、GPS 与 GAL 的本地码测高曲线, 对比最明显的是中间 GPS L1 与 L5 本地码测高曲线, L5 本地码测高曲线明显比 GPS L1 本地码测高曲线更加陡峭。图 11 为北斗三号 B1 和 B2 干涉测高与北斗 B1 本地码测高

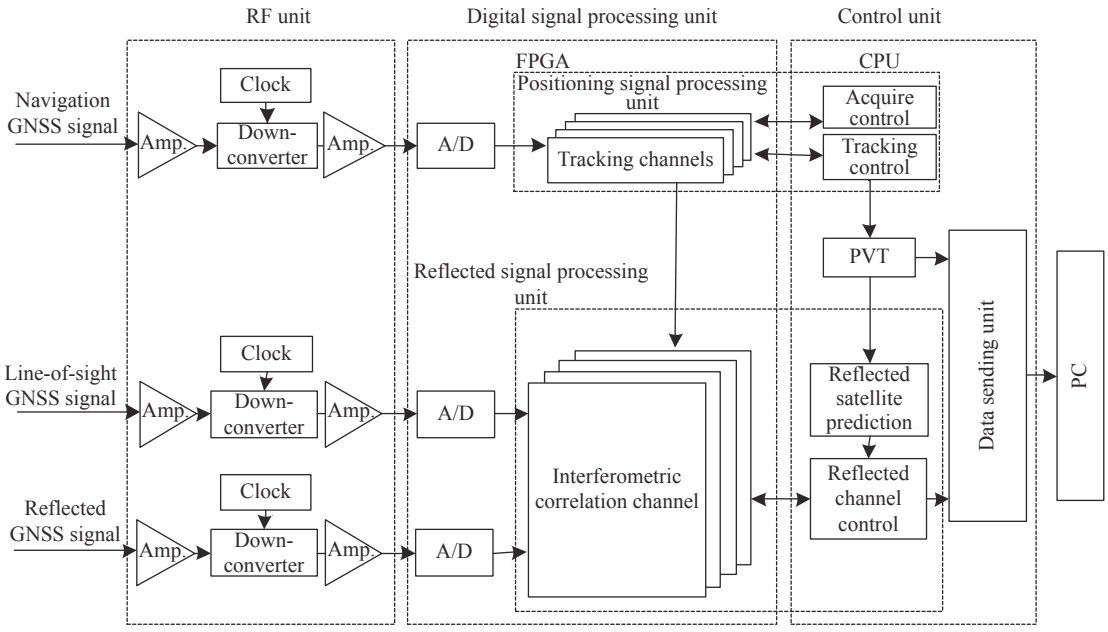


图 8 GNSS-R 干涉测高接收机整体结构

Fig. 8 GNSS-R interferometric altimeter receiver structure

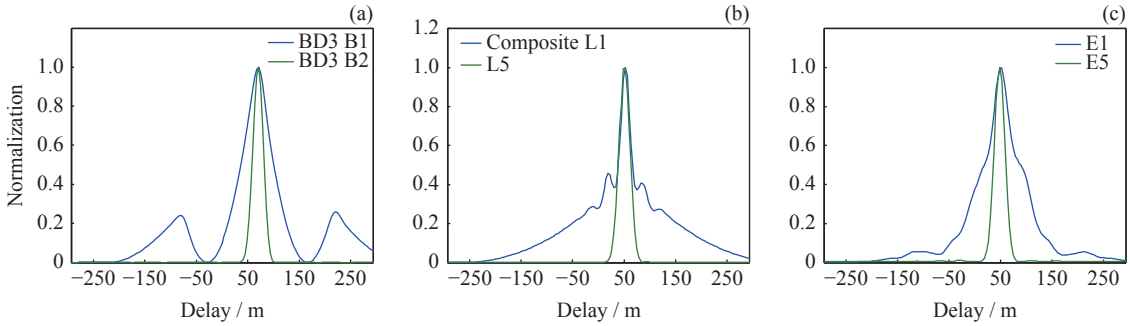


图 9 BD (a), GPS (b) 和 GAL (c) 实测干涉测高波形

Fig. 9 Received BD (a), GPS (b) and GAL (c) interferometric tracking waveforms

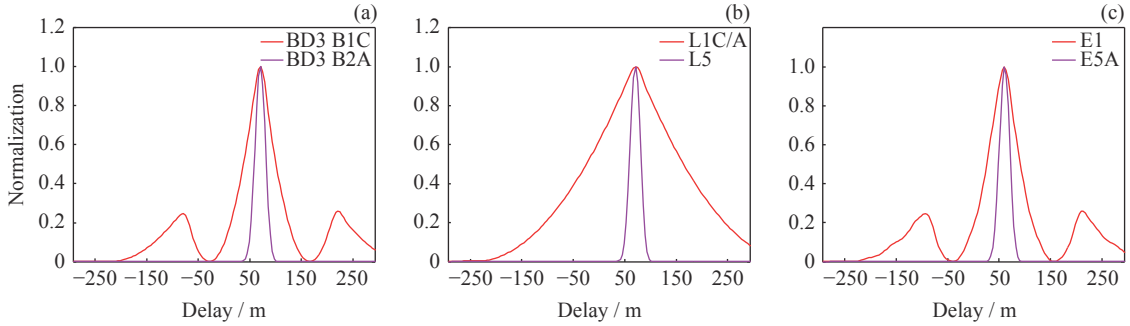


图 10 BD (a), GPS (b) 和 GAL (c) 实测本地码测高波形

Fig. 10 Received BD (a), GPS (b) and GAL (c) local code tracking waveforms

的结果对比。结果表明：北斗三号 B1 和 B2 干涉测高曲线明显比北斗 B1 本地码测高曲线更加陡峭，根据第 2 节精度分析公式，北斗三号 B1 和 B2 干涉测高性能优于北斗 B1 本地码测高性能。

4.3 测高精度

本试验根据获取的测高波形成功估算出反射信号相对直射信号的延迟，再根据 GNSS 卫星位置信息和接收机位置反演水面高度，并对水面高度精度进行评估。本次岸基试验接收机处于静止状态，直射与反射信号之间的多普勒变化很小，因此可以适当提升非相干累加次数以达到理想的高度测量精度。综合 GNSS 卫星动态，本次水面高度反演采用了 300 s 的非相干积分时间。表 2 列出了北斗三号和 GPS 卫星计算的水面高度标准差。测量结果表明：实际测量高度精度与理论估算值相近，GPS L1 和北斗 B1 本地码测高技术测得的高度精度较差，北斗三号 B1 和 B2 干涉测高技术相比 GPS L1 和北斗 B1 本地码测高技术，高度精度有显著提升。由最差的 0.90 m 提升至 0.12 m，水面高度测量精度提升了 86%，提升效果明显。

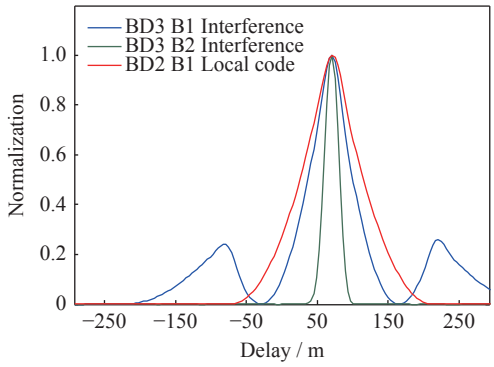


图 11 北斗三号干涉测高与本地码测高波形的对比

Fig. 11 Comparison between BD3 interference and BD2 B1 local tracking results

表 2 水面高度计算结果(单位 m)

Table 2 Results of the water surface height (unit m)

跟踪类型	卫星号	时间段(UT)	高度标准差
GPS L1本地码	G17	2019-09-27 01:14－1:44	0.78
北斗B1本地码	B13	2019-09-27 08:18－8:48	0.90
北斗三号B1干涉	B19	2019-09-27 09:10－9:40	0.14
北斗三号B2干涉	B22	2019-09-27 11:29－11:59	0.12

5 结论

GNSS-R 干涉测高技术相比本地码测高技术具有信号带宽大、测量精度高等优势。虽然关于干涉测高技术已有大量理论和试验结果,但是中国北斗三号系统应用于干涉测高技术的研究却较少。本文分析了干涉测高技术相对本地码测高技术的优势,介绍了北斗三号系统在干涉测高技术中应用。为验证北斗三号卫星干涉测高功能,自行研制了多系统 GNSS-R 干涉测高接收机,并进行外场水面高度干涉测高实验。实验首次接收到北斗三号 B1 和 B2 频段的干涉测高波形,并且与北斗 B1 和 GPS L1 本地码测高波形进行对比。结果显示,北斗三号 B1 和 B2 干涉测高波形比北斗 B1 和 GPS L1 的本地码测高波形具有更大的斜率,有利于测高精度的提升。利用测高波形对水面高度进行了反演,结果表明,北斗三号干涉测高精度明显优于本地码测高精度,测量精度提升显著。

参考文献

[1] FU Yang, ZHOU Zhaoming. Investigation of ocean remote sensing by using GNSS-R signal[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, **31**(2): 128-131 (符养, 周兆明. GNSS-R海洋遥感方法研究[J]. 武汉大学学报/信息科学版, 2006, **31**(2): 128-131)

[2] 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

[3] LUO Liming, BAI Weihua, SUN Yueqiang, *et al*. GNSS-R sea surface wind speed inversion based on tree model machine learning method[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(4): 595-601 (骆黎明, 白伟华, 孙越强, 等. 基于树模型机器学习方法的GNSS-R海面风速反演[J]. 空间科学学报, 2020, **40**(4): 595-601)

[4] CAMPS A, PARK H, PABLOS M, *et al*. Sensitivity of GNSS-R spaceborne observations to soil moisture and vegetation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, **9**(10): 4730-4742

[5] CHEW C, SHAH R, ZUFFADA C, *et al*. Demonstrating soil moisture remote sensing with observations from the UK TechDemoSat-1 satellite mission[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(7): 3317-3324

[6] YAN Q Y, HUANG W M. Sea ice thickness measurement using spaceborne GNSS-R: first results with TechDemoSat-1 data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, **13**: 577-587

[7] MARTÍN-NEIRA M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): application to ocean altimetry[J]. *ESA Journal*, 1993, **17**: 331-355

[8] MARTÍN-NEIRA M, D'ADDIO S, BUCK C, *et al*. The PARIS ocean altimeter in-orbit demonstrator[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, **49**(6): 2209-2237

[9] CAMPS A, PARK H, DOMÈNECH E V I, *et al*. Optimization and performance analysis of interferometric GNSS-R altimeters: application to the PARIS IoD mission[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, **7**(5): 1436-1451

[10] RIBÓ S, ARCO-FERNÁNDEZ J C, NOGUÉS-CORREIG O, *et al*. The software PARIS interferometric receiver[C]// 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing: IEEE, 2016: 5593-5595

[11] 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

[12] WICKERT J, CARDELLACH E, MARTIN-NEIRA M, *et al*. GEROS-ISS: GNSS REflectometry, radio occultation, and Scatterometry onboard the international space station[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, **9**(10): 4552-4581

[13] 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**(1): 183

[14] PASCUAL D, CAMPS A, MARTIN F, *et al*. Precision bounds in GNSS-R ocean altimetry[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, **7**(5): 1416-1423

(责任编辑: 宋雅娜)