引文格式：张建锋. 单天线测地型接收机 GNSS-R 海面高度反演研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(6):79-82. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.06.017

单天线测地型接收机 GNSS-R 海面高度反演研究

张建锋[1]
（1. 上海市测绘院，上海 200063）

摘　要：针对双天线的全球导航卫星系统反射测量技术（GNSS-R）的局限性，对基于单天线测地型接收机的 GNSS-R 海面高度反演模型进行研究。利用全球 5 个设有常规大地测量型接收机的岸基 GNSS 站点的长时序信噪比数据，进行海面高度反演。结果表明，反演结果与验潮站结果相比，二者变化趋势具有高度一致性，其相关系数高于 0.905。在潮差较小（2.98~4.04 m）海域，反演结果与验潮站数据互差均方根（RMS）在 0.151～0.255 m 范围内；在潮差较大（7.52~8.84 m）海域，二者互差 RMS 在 0.425～0.568 m 范围内。

关键词：海面高度；GNSS-R；信噪比；L-S 谱分析
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）06-0079-04

Research on Sea Surface Height Inversion of GNSS-R Single-antenna Geodesic Receiver

ZHANG Jianfeng[1]
(1.Shanghai Surveying and Mapping Institute, Shanghai 200063, China)

Abstract: Aiming at the limitation of global navigation satellite system-reflectometry (GNSS-R) measurement technology for dual-antenna, we studied the GNSS-R sea surface height inversion model based on single-antenna geodesic receiver. We used the long time series SNR data of 5 shore-based GNSS stations with conventional geodetic receivers to carry out the sea level height inversion. The results show that the inversion results are highly consistent with those of tide stations, and the correlation coefficient is higher than 0.905. In the sea area with low tidal range (2.98~4.04 m), the root mean square (RMS) between inversion results and tide station results is 0.151~0.255 m. In the sea area with large tidal range (7.52~8.84 m), the RMS between the two ranges is 0.425~0.568 m.

Key words: sea surface height, GNSS-R, signal to noise ratio, L-S periodogram analysis

基于载波观测量的 GNSS-R 技术反演精度相对较高，但是需要专用的 GNSS-R 设备，费用较高，而且要求相位观测值连续。另外，该方法对观测条件要求相对较高，多适用平静水面、光滑海冰面等观测环境。反演结果精度受海面风速增大、海面粗糙度增高影响较大。基于信噪比 SNR 的海面高度反演方法不需要安装专用的 GNSS 设备，采用常规的大地测量型 GNSS 接收机就可以进行，且在粗糙度较高的水面也具有良好的观测性能。近年来，该技术在海面、湖面和水库水面等高度测量中得到了广泛应用[1-3]。

目前，国内基于多个测站长时序观测数据的 GNSS-R 反演海面高度研究较少，本文将对单天线测地型接收机 GNSS-R 反演海面高度的数学模型及 L-S 谱（lomb-scargle periodograms，LSP）分析方法进行研究，利用全球 5 个不同观测环境下的 GNSS 站点的长时序观测数据，对 GNSS-R 技术用于近海海面高度反演进行实验分析，以验证不同测站环境下长时序观测数据反演的有效性和可靠性。

1　单天线测地型接收机 GNSS-R 海面高度反演模型研究

基于信噪比 SNR 的 GNSS-R 技术，只需要一台常规的大地测量型接收机和一副天线即可进行测量。对于岸基 GNSS-R 海面高度而言，GNSS 天线接收到的信号将是直射信号和反射信号的组合，两者之间会形成干涉。注意到水面对 GNSS 信号的反射类似于镜面反射，而散射则相对比较少。反射信号中包含反射面的特征信息会被记录在信噪比观测值中。因此，可以利用信噪比计算得出天线相位中心到水面的垂直距离，由此实现基于信噪比 SNR 的海面高度测量。图 1 为某测站 2018 年第 70 d，GPS 13 号卫星 L1、L2 载波上的 SNR 随高度角变化示意图。

项目来源：上海市 2021 年度“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目（21DZ1204100）。
作者简介：张建锋（1996—），硕士，工程师，研究方向为卫星大地测量，E-mail：2423851234@qq.com。

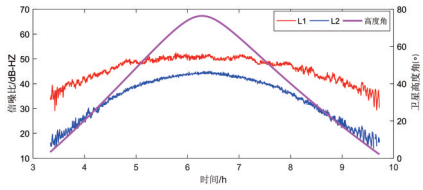


图1 信噪比SNR随高度角变化示意图

从图1可以看出，信噪比观测值在低高度角时由于多路径效应下降较为明显，且变化幅度较大，振荡较为明显。通过对信噪比观测值进行分析可以得到测站周围反射面的相关物理参数。由于海面的物理信息仅包含在GNSS反射信号中，因此需要将GNSS直射信号与反射信号分离开来。对于一般的测地型接收机，直射信号在量级上远大于反射信号，因此采用低阶多项式进行拟合来消除趋势项。将原始序列扣除拟合曲线后，可以得到低高度角时的信噪比SNR残差序列，从而得到反映海面信息的信噪比SNR序列，假设反射信号振幅为 A_m，去除趋势项后的信噪比SNR序列振幅可以表示为[4]：

$$A_m = A \times \cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\sin E + \phi\right) \tag{1}$$

式中，h 为天线相位中心到海面的垂直反射高度；λ 为载波波长；E 为卫星高度角。设 $t=\sin E$，$f=2h/\lambda$，则式（1）可以简化为标准的余弦函数表达式：

$$A_m = A\cos(2\pi f t + \phi) \tag{2}$$

若对式（2）进行频谱分析，便可以获取频率 f，从而得到垂直反射高度 h，进一步获取海面高度反演值。

考虑到卫星高度角正弦值的2次采样之间的间隔不均匀，另外，不同的卫星轨道也有不同的采样间隔，这些原因导致无法对信噪比残差序列进行整周期截断，即数据在时域上都是不均匀的，并且数据中包含大量的噪声，本文采用LSP分析法，该方法不但能够从时序序列中分离出弱周期信号，而且还可以在一定程度上削弱由于时域序列不均匀而产生的虚假信号[5]。对于时域序列 $X_{(t_i)}$，$i=1$，2，3，…，N 其功率谱可以表示为关于频率 f 的函数[6]：

$$P_x(f) = \frac{1}{2N}\left\{\frac{\left[\sum_{i=1}^{N}\left(X(t_i)-\overline{X(t_\tau)}\right)\cos\omega(t_i-\tau)\right]^2}{\sum_{i=1}^{N}\cos^2\omega(t_i-\tau)} + \frac{\left[\sum_{i=1}^{N}\left(X(t_i)-\overline{X(t_\tau)}\right)\cos\omega(t_i-\tau)\right]^2}{\sum_{i=1}^{N}\sin^2\omega(t_i-\tau)}\right\} \tag{3}$$

式中，$P_x(f)$ 为频率 f 的周期信号的功率；$X(t_i)$ 为离散实验数据；$X(t_\tau)$ 为离散实验数据的均值；N 为实验数据统计量；t_i 为离散实验数据的时间；τ 为时间平移不变量，其计算公式为[7]：

$$\tan(2\omega\tau) = \sum_{i=1}^{N}\sin 2\omega t_i \Big/ \sum_{i=1}^{N}\cos 2\omega t_i \tag{4}$$

图2给出了某GNSS测站2018年第32 d GPS 25号卫星高度角5～12°区间SNR对应的LSP分析结果。

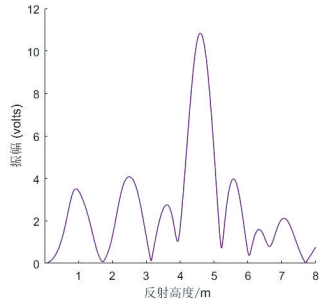


图2 LSP分析图

2 实验与分析

2.1 测站信息

本文将利用分布在全球的5个岸基GNSS站点的长时序观测数据对GNSS-R反演结果进行分析，图3给出了5个GNSS站点的近景照片。



图3 实验GNSS站点近景照片

GNSS反射信号主要集中在第一菲涅耳反射区，该区域即为测站的GNSS-R有效反射区，利用文献[8]可以确定测站的有效反射区域及卫星高度角。5个测站用于GNSS-R海面高度反演的测站相关信息如表1所示。

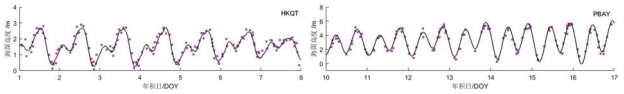
表1 实验GNSS测站信息

GNSS测站	地理位置	数据采样间隔/s	可用高度角/（°）	海域方位角/（°）
HKQT	27.7°N，47.6°E	1	4~9	0～105和300～360
PBAY	59.6°N，151.3°W	30	5~20	90～260
SC02	48.5°N，123.0°W	15	5~12	50～240
BUR2	41.0°S，145.9°E	30	2~13	120～160
BRST	48.4°N，4.5°W	30	5~18	130～270

HKQT站位于中国香港鲗鱼涌公园附近一建筑物顶部，验潮站与HKQT站并址布设，其潮位数据采样间隔为1 min；PBAY站位于美国阿拉斯加一个小岛上，距离PBAY站30 km处布设有验潮站，其潮位数据采样率为6 min；SC02站位于美国西雅图一港口处，距离SC02站300 m处布设有验潮站，其数据采样率为6 min；BUR2站布设在澳大利亚塔斯马尼亚岛一港口处，在BUR2站旁边布设有验潮站，其潮位数据采样率为1 min；BRST站布设在法国一港口处，在距离BRST测站约500 m处布设有验潮站，其潮位数据采样率为1 min[9-11]。

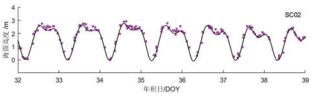
2.2　GNSS-R海面高度反演

本节分别选取了5个测站连续一周的观测数据进行实验分析，实验数据选用GPS L1波段上的信噪比观测值。图4为5个测站GNSS-R海面高度反演结果与验潮站实测的海平面高度对比图。

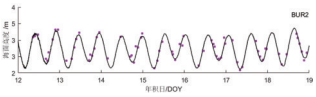


a HKQT站2019年第1~7天GNSS-R反演结果与验潮站实测结果对比图

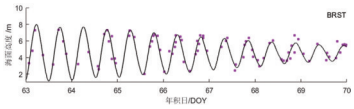
b PBAY站2018年第10~16天GNSS-R反演结果与验潮站实测结果对比图



c SC02站2018年第32~38天GNSS-R反演结果与验潮站实测结果对比图



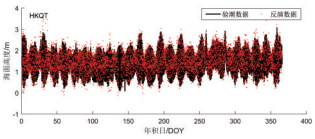
d BUR2站2018年第12~18天GNSS-R反演结果与验潮站实测结果对比图



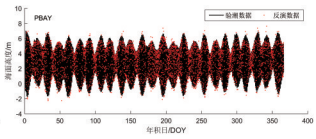
e BRST站2018年第63~69天GNSS-R反演结果与验潮站实测结果对比图

图4　实验测站短周期GNSS-R反演结果与验潮站实测结果对比图

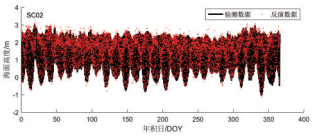
图中，紫色散点为反演值，黑色曲线为实测值。从图中可以看出，反演值与实测水位时序曲线符合程度较高，两者整体变化趋势较为一致。为了进一步分析GNSS-R海面高度反演的有效性和连续性，选取了各测站连续一年的长时序观测数据进行实验，反演结果剔除粗差后，以验潮站观测数据为真值，对5个测站的海面反演结果的精度进行分析。计算5个实验测站GNSS-R反演的海面高度与验潮仪实测海面高度二者的互差RMS以及相关系数，通过这些指标对反演结果精度进行评价。图5给出了5个实验测站的GNSS-R反演海面高度与验潮站实测高度的对比结果，图6为实验测站的GNSS-R反演结果与验潮站实测结果残差分布图以及相邻反演点时间间隔分布直方图，表2为5个测站GNSS-R海面高度反演结果统计表。



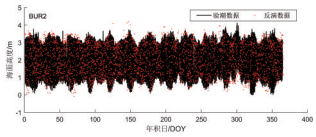
a HKQT站2019年GNSS-R反演结果与验潮站实测结果对比图



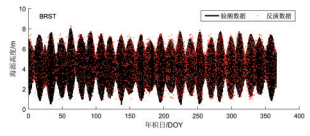
b PBAY站2018年GNSS-R反演结果与验潮站实测结果对比图



c SC02站2018年GNSS-R反演结果与验潮站实测结果对比图



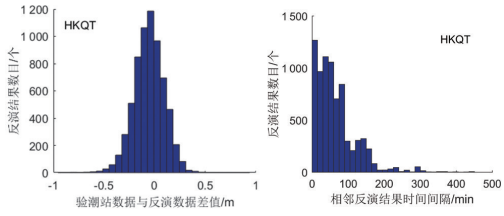
d BUR2站2018年GNSS-R反演结果与验潮站实测结果对比图



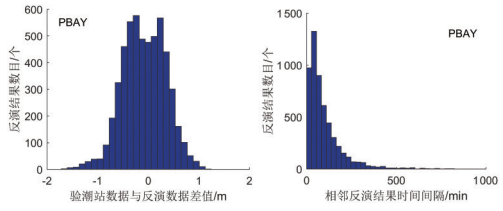
e BRST站2018年GNSS-R反演结果与验潮站实测结果对比图

图5　实验测站GNSS-R反演结果与验潮站实测结果对比图

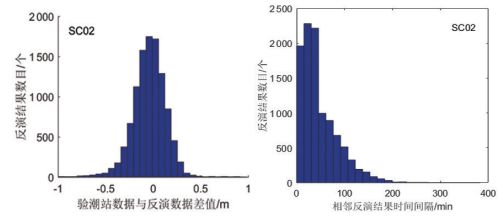
从5个实验测站连续一年的GNSS-R反演海面高度与验潮站实测结果对比图中可以看出，GNSS-R海面高度反演结果与验潮站实测结果整体的变化趋势较为吻合，并呈现一定的周期性波动。从图6可以看出，HKQT、SC02和BUR2这3个测站GNSS-R反演结果与验潮站结果的互差主要分布在±0.5 m以内，PBAY和BRST站GNSS-R反演结果与验潮站结果的互差主要分布在±1 m以内，HKQT、SC02和BUR2这3个测站反演结果精度要优于PBAY和BRST站。结合各测站相邻反演点时间间隔分布图以及表2中反演结果数目，可以看出HKQT站和SC02站的GNSS-R反演结果时间分辨率最高，而BUR2站的反演数量最少，这主要是BUR2站站受到港口周围环境的影响，可用于反演的海域方位角区间只有40°。对比5个测站GNSS-R反演结果与验潮站实测数据的相关系数，其相关性均在0.905以上。结合海面一年的潮位变化量，对于海面变化较大的2个站点PBAY和BRST，反演精度要低于变化较小的HKQT、SC02和BUR2站。此外，PBAY站距离附近的验潮站较远，受潮波系数影响，PBAY站实际反演结果与验潮站结果存在一定偏差。注意到BRST站的潮差相较于PBAY更小，而反演精度却更低。这主要是由于BRST位于城市港口，易受到往来的船只、建筑等影响，而PBAY站位于小岛上，其周围观测环境相对较好，更有利于观测数据的反演。



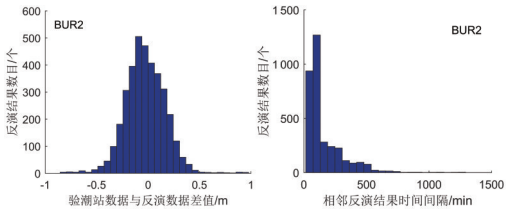
a HKQT站残差分布与相邻反演点时间间隔分布图



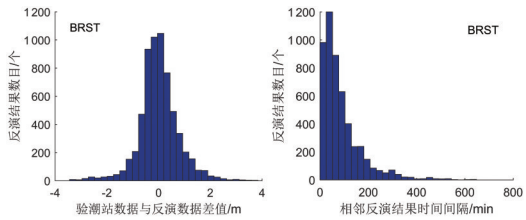
b PBAY站残差分布与相邻反演点时间间隔分布图



c SC02站残差分布与相邻反演点时间间隔分布图



d BUR2站残差分布与相邻反演点时间间隔分布图



e BRST站残差分布与相邻反演点时间间隔分布图

图6 实验测站GNSS-R反演结果残差分布与相邻反演值时间间隔分布图

表2 实验测站连续1年的GNSS海面高度反演结果统计

站点	HKQT	PBAY	SC02	BUR2	BRST
反演结果数量/个	8 986	6 262	10 638	3 614	6 270
相关系数	0.938	0.949	0.980	0.956	0.905
RMS/m	0.239	0.425	0.151	0.255	0.568

3 结 语

本文对单天线测地型接收机GNSS-R反演海面高度的数学模型及LSP分析法进行研究，利用全球分布的5个不同观测环境（视野开阔的海域与复杂的城市港口）和不同潮汐变化范围（2.98～8.84 m）的GNSS站点的长时序信噪比SNR数据，进行GNSS-R近海海面高度反演实验，结果表明：基于单天线测地型接收机进行GNSS-R海面高度反演，其反演结果在整体趋势上与验潮站实测结果较为吻合；5个实验测站连续一年的长时序观测数据反演的海面高度与验潮站实测结果显著相关，二者的互差RMS在0.151～0.568 m之间；GNSS-R技术进行海面高度反演精度受测站观测环境影响较大。海域方位角较大、潮差变化较小的测站其反演精度和时间分辨率要优于受周围环境限制、潮差较大的测站。

参考文献

[1] 张朋杰,庞治国,路京选,等. GNSS-R水位监测研究进展与其在我国水利行业应用展望[J]. 全球定位系统,2024,49(1):34-44

[2] 张双成,南阳,李振宇,等. GNSS-MR技术用于潮位变化监测分析[J]. 测绘学报,2016,45(9):1 042-1 049

[3] 王笑蕾. 地基GNSS近地空间水环境遥感监测研究[D]. 西安:长安大学,2018

[4] Larson K M , Small E E , Gutmann E , et al. Using GPS Multipath to Measure Soil Moisture Fluctuations: Initial Results[J]. GPS Solutions,2008,12(3):173-177

[5] 徐斌,杨涛,谭保华,等. 基于Lomb-Scargle算法的周期信号探测的模拟研究[J]. 核电子学与探测技术,2011,30(6):111-114

[6] Lomb N R. Least-squares Frequency Aanalysis of Unequally Spaced Data[J]. Astrophysics and Space Science, 1976,39(2):447-462

[7] Scargle J D. Studies in Astronomical Time Series Analysis. II-Statistical Aspects of Spectral Analysis of Unevenly Spaced Data[J]. The Astrophysical Journal, 1982, 263:835-853

[8] Carolyn R , Larson K M . Software Tools for GNSS Interferometric Reflectometry (GNSS-IR) [J]. GPS Solutions, 2018, 22(3):80-82

[9] Gomez A S , Watson C , Gravelle M , et al. Levelling Co-located GNSS and Tide Gauge Stations Using GNSS Reflectometry [J]. 2014. DOI:10. 1007/s00190-014-0784-y

[10] 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): 1 200-1 204

[11] Nazi W, Tianhe X, Fan G,et al. Sea Level Estimation Based on GNSS Dual-frequency Carrier Phase Linear Combinations and SNR[J]. Remote Sensing,2018,10(3):470