

马中民<sup>1</sup> 张双成<sup>1,2</sup> 刘奇<sup>1</sup> 黄观文<sup>1</sup> 康前程<sup>1</sup> 彭继轮<sup>1</sup>

# 普适型 GPS 用于黄河盐锅峡水位监测分析

## 摘要

黄河水文变化复杂,现有水位监测方法费时费力且不能很好满足时间分辨率和空间分辨率两个方面的需求。地基 GPS-IR 技术的出现为水位监测提供了新的手段,但目前大多数地基 GPS-IR 技术采用的接收机为高精度大地测量型接收机,成本高、时效性差,不适合大范围推广。首先介绍了普适型 GPS 接收机的组成,并对 GPS 数据观测质量进行了分析;其次给出了地基 GPS-IR 技术用于水位监测的基本原理;最后利用黄河盐锅峡 GPS 实测数据进行 GPS-IR 水位提取,以兰州水文站水位监测数据为参考分析了普适型 GPS 接收机反演水位的精度,得到了最佳 RMSE 为 0.21 m 的精度。实验结果表明,普适型 GPS 接收机可用于长时间水位监测。

## 关键词

普适型 GPS;GPS-IR;黄河;水位

中图分类号 P228.4;TV123

文献标志码 A

收稿日期 2020-12-29

资助项目 国家自然科学基金(42074041,41731066);地理信息工程国家重点实验室基金(SKLGIE2019-Z-2-1);陕西省自然科学基金基础研究项目(2020JM-227)

## 作者简介

马中民,男,硕士生,研究方向为 GNSS 遥感.827699858@qq.com

张双成(通信作者),男,博士,副教授,博导,主要从事 GNSS 精密定位与 GNSS 遥感地表环境监测研究.shuangcheng369@vip.163.com

1 长安大学 地质工程与测绘学院,西安,710064

2 地理信息工程国家重点实验室,西安,710054

## 0 引言

黄河是中华民族的母亲河,黄河流域在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位。黄河发源于青藏高原,流经 9 个省区,全长 5 464 km,是我国仅次于长江的第二大河。黄河流域省份 2018 年底总人口 4.2 亿,占全国 30.3%,地区生产总值 23.9 万亿元,占全国 26.5%。但是,长期以来,由于自然灾害频发,特别是水害严重,给沿岸百姓带来深重灾难。习近平总书记在 2019 年 9 月 18 日召开的黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话中提到“洪水风险依然是黄河流域的最大威胁”<sup>[1]</sup>。因此,作为获取水文信息的第一手资料,水位监测技术具有重要的研究价值,在防洪抗汛、河道基础设施建设等方面发挥着重要作用。如何准确高效地观测大范围流域水位变化成为近年来的研究热点<sup>[2]</sup>。

传统的水位监测方法包括水尺、悬垂式水位计、浮子式水位计、压力式水位计、电子水尺、超声波水位计等。它们均能满足一般水位监测要求,但都存在费时费力、监测精度不足、时间分辨率不够等缺点<sup>[3]</sup>。

利用全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)直射信号与反射信号的干涉,获取反射面物理参数的技术称为全球定位系统干涉反射测量(Global Positioning System Interferometric Reflectometry,GPS-IR)技术。该技术属于全球导航卫星系统反射信号遥感技术(Global Navigation Satellite System-Reflection,GNSS-R)的一个分支,它凭借着信号来源丰富、全球覆盖、成本低、数据量大、拥有自定位优势、功耗小、长期稳定连续等优点,受到国内外学者的广泛关注和研究<sup>[4-6]</sup>。

目前,国内外在 GPS-IR 技术应用于水位监测方面取得了一系列的研究成果。Larson 等<sup>[7-9]</sup>系统性地提出并推广了 GPS-IR 技术。2012 年,吴继忠等<sup>[10]</sup>给出一种采用一台普通大地测量型 GPS 接收机反射信号进行水面高度变化反演的的方法,即利用振幅与信噪比(Signal to Noise Ratio,SNR)的关系,建立 SNR 与接收机天线相位中心到水面的垂直距离的函数模型,实测结果表明采用反射信号中的 SNR 反演水面高度的标准偏差是 $\pm 3$  cm。2013 年,Larson 等<sup>[9]</sup>利用 GPS-IR 技术反演海面高度变化,通过与两个邻近的监测站数据对比,分别得到了 RMSE 为 10 cm 和 5 cm 的监测精度。2016 年,Strandberg 等<sup>[11]</sup>在 GPS-IR 技术中融入 B 样条方法,进一步提升了 GPS-IR 技术用于潮位监测

的精度.张双成等<sup>[12]</sup>利用靠海岸基 CORS 站数据进行了分时段潮位变化监测,监测结果与验潮站结果的相关系数均高于 0.98. Jin 等<sup>[13]</sup>提出了基于 SNR 观测值和三频组合和码组合的 BDS-R 技术,并用于潮位监测.2017 年, Wang 等<sup>[14]</sup>利用小波分解方法,从 SNR 观测值中准确提取干涉信号,进而提升了 GPS-IR 技术的稳定性,针对较短的 SNR 序列,结果更优.

以上研究中所采用的仪器大多为特制天线或成本较高的扼流圈天线,虽然在水位监测精度方面达到了预期要求,但成本较高的仪器设备并不适合做大面积推广.此外,以上研究大多集中在平静湖面,或水位变化较为规律的近海海面,而针对水情不明、含沙量大、水位变化剧烈的黄河,此前并未有学者做过此类研究.本文采用安置在黄河盐锅峡段的低成本 GPS 接收机,利用 SNR 观测值,探究 GPS-IR 技术用于长周期黄河水位监测的可行性.

## 1 普适型 GPS 接收机性能分析

### 1.1 普适型接收机终端设计

接收机是 GNSS 系统中的重要组成部分.传统接收机主要由基带信号处理和导航位置解算两部分组成.常见测量接收机对于数据的存储和传输多依赖于接收机本身和局域网,而带有无线数据传输功能的接收机造价通常达数万元<sup>[15]</sup>,且由于黄河流量流速等影响,对于 GNSS 遥感应用难以大范围推广,因此利用 GPS-IR 技术观测水位变化更需要具有云存储(无线传输)功能的低成本接收机.

基于此,国内多家仪器开发商研发了具有云存储功能的 GPS 接收机,其体积仅为传统接收机的 25%,还具有性能稳定和可扩展的特点.它的成本降至传统售价的 10%,功耗也大为降低,约为  $5 \text{ W} \cdot \text{h}^{-1}$ . 低成本接收机与传统接收机的详细对比参数如表 1 所示,接收机设计流程如图 1 所示.

表 1 接收机采集设备比较

Table 1 Comparison of receiver acquisition equipment

接收机类型	星座	成本/万元	体积/dm <sup>3</sup>	外业方案	系统操作
传统接收机	GPS	3~10	约 2.5	繁琐、工期长	复杂
低成本接收机	GPS	0.1~0.5	约 0.5	部件式、工期短	简单

### 1.2 普适型 GPS 观测值质量分析

为实现 GNSS 遥感技术的大范围推广,长安大学在国内外现有接收机研究基础上自主开发了普适

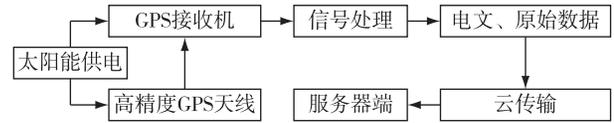


图 1 GPS 接收机结构

Fig. 1 GPS receiver structure

型接收机.采用物联网“传感器+云”的思维,将传统 GNSS 监测终端中的非必要功能模块,如数据存储、电池等进行剥离,仅保留数据采集和通信模块.在数据传输方面使用 4G 等通信手段将监测数据实时传回云端,在云平台上实现云储存和云计算<sup>[16]</sup>.为保证低成本接收机观测数据的可靠性和有效性,首先对实测数据进行分析.

图 2 展示了本次实验所用普适型 GPS 测站在 2020 年第 193 天的可见卫星分布,从图 2 中可以看出普适型 GPS 接收机接收到的数据连续性较好,一天中绝大部分时刻都可以同时观测到 8 颗以上卫星.

图 3 展示了普适型 GPS 测站在 2020 年第 193 天内的信噪比、多路径和高度角.从图 3 中可以看出信噪比 SNR 和多路径效应随卫星高度角变化明显,当接收卫星高度角变小时,信噪比 SNR 数值变小,多路径效应增大;反之,当接收卫星高度角变大时,信噪比 SNR 数值变大,多路径效应减小.

为进一步探究普适型 GPS 测站观测数据质量,随机挑选实验期内任意 2 天观测文件进行 TEQC 质量分析.表 2 给出了普适型 GPS 测站 2020 年 7 月 11 日和 8 月 9 日 TEQC 数据质量分析情况.

表 2 普适型 GPS 测站 2020 年 7 月 11 日、  
2020 年 8 月 9 日 TEQC 数据质量分析

Table 2 TEQC data quality analysis for universal GPS station on Jul. 11th and Aug. 9th, 2020

观测文件	参数	2020-07-11	2020-08-09
#expt	应采集数据量/个	749 849	748 954
#have	实际采集数据量/个	691 950	689 908
%	数据利用率/%	92	92
mp1	多路径误差 $L_1$ /m	0.33	0.31
mp2	多路径误差 $L_2$ /m	0.49	0.46
o/slps	观测数据与周跳比	1 069	1 135

可以看出,测站这 2 天内观测数据利用率均为 92%,  $L_1$  和  $L_2$  多路径误差分别为 0.33、0.31 和 0.49、0.46, 观测数据与周跳比分别为 1 069 和

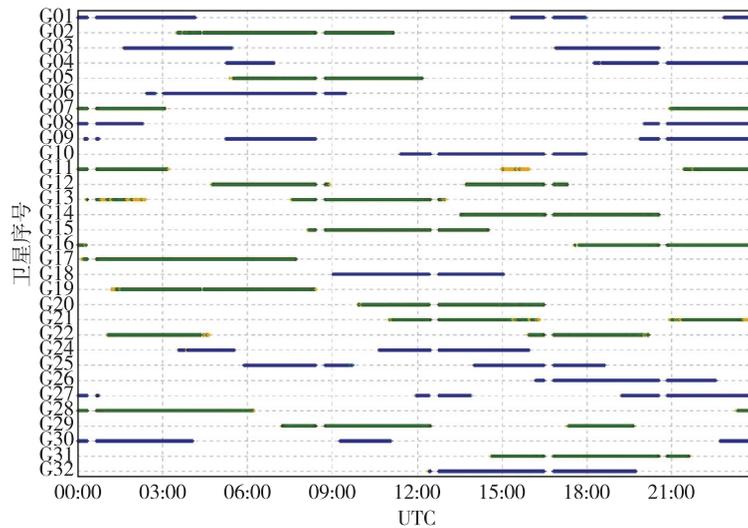


图2 普适型 GPS 测站可见卫星分布(年积日 193 天)

Fig. 2 Distribution map of visible satellites over universal GPS station on DOY 193,2020

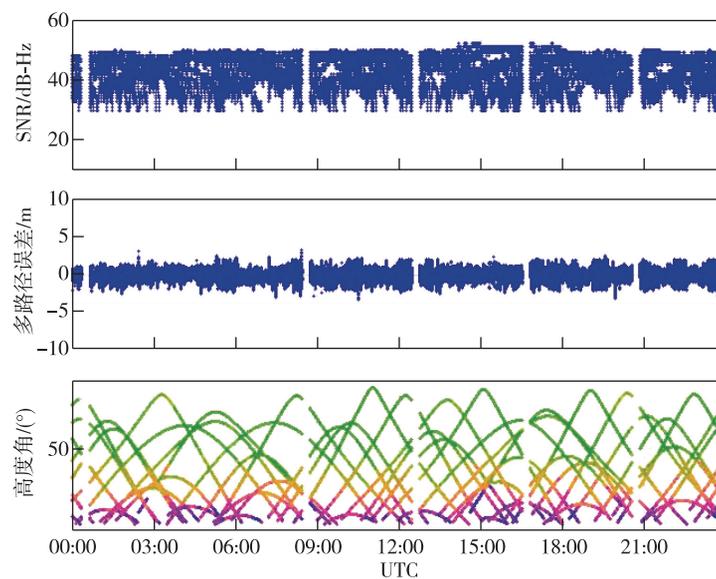


图3 信噪比/多路径/高度角分布(年积日 193 天)

Fig. 3 Distribution of SNR (up), multipath (middle), and altitude angle (down) on DOY 193

1 135,整体来看,普适型接收机观测数据可靠有效。

## 2 GPS-IR 提取水位基本原理

GPS-IR 技术监测水位高度变化利用了导航卫星定位中的多路径效应.GPS 信号经反射表面反射后会被接收机接收,反射后的信号由沿镜像传播的相干分量和无规律的散射分量组成.GPS-IR 技术的核心就是利用直射信号和反射信号的相干分量部分发生的干涉作用.根据信号反射原理,反射面越光滑,相干分量部分的功率越强;而介质表面越粗糙,相干分量部分的功率越弱<sup>[17]</sup>.

如图 4 所示,GPS 信号经黄河水面后发生反射,红色部分为反射信号相干分量与直射信号之间的路径差, $E$  指 GPS 接收机天线相位中心到水面的垂直距离, $h$  是指 GPS 卫星的高度角.

本次实验中,GPS 接收机接收到的是卫星的直射信号与经河水反射后的反射信号的合成信号,设接收到的直射信号和反射信号的振幅分别为  $A_d$  和  $A_r$ .根据电磁波反射原理,直射信号和反射信号的振幅存在如下关系<sup>[12,18]</sup>:

$$A_d \gg A_r. \tag{1}$$

由式(1)可以看出,在接收到的合成信号  $A_c$  中,

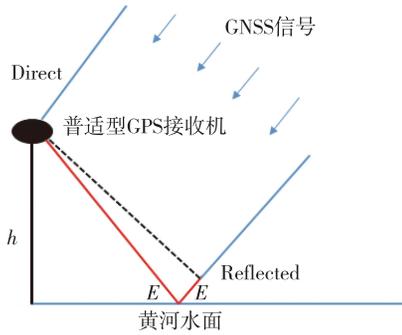


图4 GPS-IR 水位监测技术示意

Fig. 4 Sketch diagram of GPS-IR water level monitoring

直射信号  $A_d$  占主导地位,决定着合成信号的变化趋势,即在低高度角时 SNR 观测值的趋势项(图 5a),反射信号  $A_r$  则表现为局部的周期性的震荡(图 5b).需要指出的是,与图 5a 相比,图 5b 中的横坐标为随高度角变化的重采样时间点,纵坐标为信噪比值的线性变化值(伏特),而非图 5a 中的指数变化. SNR 与信号振幅存在如下关系:

$$R_{SNR} = A_c^2 = A_d^2 + A_r^2 + 2A_d A_r \cos \theta, \quad (2)$$

式中:  $R_{SNR}$  为 SNR 的量值;  $A_c$  为合成信号的振幅,  $\cos \theta$

为接收到的直射信号与反射信号夹角的余弦值.

GPS-IR 技术用于水位监测时,需要获取 SNR 观测值中因水面反射而引起的多路径效应变化信息,为此,需要把 SNR 观测值中的多路径效应提取出来,由式(1)及前面的讨论可知,当卫星处于低高度角时多路径效应对信噪比观测值的影响很小,即  $A_d \gg A_r$ ,因此可以使用低阶多项式来去除趋势项  $A_d$ .

设受多路径影响的 SNR 残差序列振幅可表示为

$$A_r = A \cos \left( \frac{4\pi h}{\lambda} \sin E + \phi \right), \quad (3)$$

式(3)中  $\lambda$  为载波波长,  $\phi$  为相位,  $E$  为卫星高度角,  $h$  为垂直反射距离,若记  $t = \sin E, f = \frac{2h}{\lambda}$ ,则式(3)可

简化为标准的余弦函数表达式

$$A_r = A \cos(2\pi f t + \phi), \quad (4)$$

式(4)中频率  $f$  中包含垂直反射距离参数  $h$ .若对式(4)进行 Lomb-Scargle 频谱分析,便可求取频率  $f$ ,进而可获取天线相位中心至瞬时水位的垂直距离  $h$ .

通过对 SNR 残差序列进行 LSP 谱分析可得到

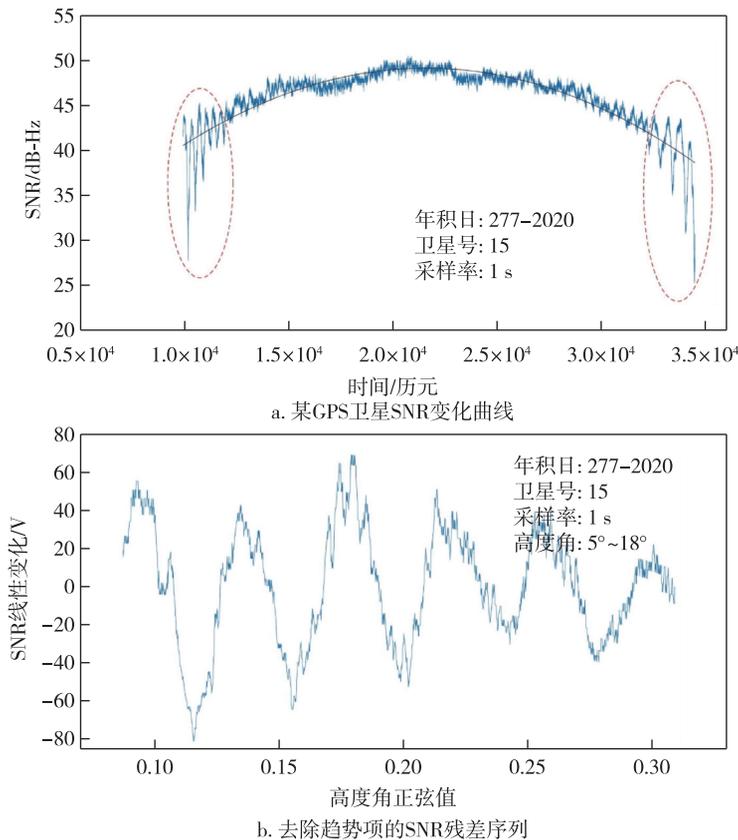


图5 某 GPS 卫星 SNR 变化和去除趋势的 SNR 残差序列

Fig. 5 SNR changes (a) and the trend-removed SNR residual sequence (b) for a GPS satellite

SNR 残差序列的频率  $f$ ,由  $f=2h/\lambda$  即可得到垂直反射距离  $h$ ,再将  $h$  的变化转化为水位的变化.由此,实现了由 SNR 观测值进行水位变化的监测.

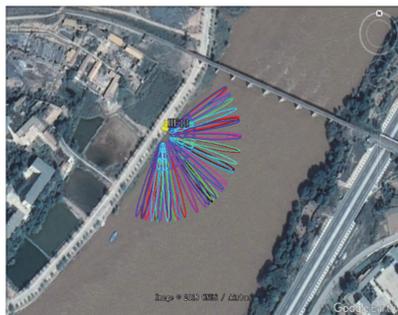
### 3 实测算例分析

#### 3.1 数据源

黑方台区域位于甘肃省兰州市西部约 40 km 处,靠近盐锅峡水库.如图 6a 和图 6b(黄色图钉)所示,监测站布设在黄河黑方台流域的岸边,此处视野开阔,无树木建筑遮挡,可大量接收来自河面的 GPS 卫星反射信号.



a. 普适型GPS测站外观



b. 普适型GPS测站菲涅尔反射图

图 6 普适型 GPS 测站外观及菲涅尔反射图  
Fig. 6 Appearance and Fresnel reflection diagram of universal GPS station

本次实验时间选择为 2020 年年积日第 186 天至第 252 天(2020-7-04—2020-9-08),接收机采样间隔为 1 s,因本文仅探究普适型 GPS 用于长时间水位监测的能力,因此只使用 GPS  $L_1$  频段数据进行反演,本文只选取位于接收机方位为  $45^\circ \sim 135^\circ$  区域内的数据进行分析.

此次实验采用的实测数据在水利部全国水雨情信息网(<http://xxfb.mwr.cn/>)上获得.水文测站位于甘肃省兰州市城关区南滨河东路,距黑方台约 60 km.设站目的是为监测黄河干流水位与流量变化,数据每天早上 8 时更新.为获取更准确的水位变化信息,我们同时获取了实验期内的黄河流量变化数据.

#### 3.2 GPS-IR 提取水位结果及分析

图 7 为实验期内的水位反演结果.图中蓝色圆点代表归零化反演值,红色实线代表实测值.由于测站位于黄河堤岸边,难以设置水位监测基准,因此本文中所有数据均为实验期内相对变化量.从图 7 中可以看出,反演结果与实测值拟合较好,虽然在年积日第 192 天、第 200 天、第 218 天、第 243 天反演值较实测值出现了较大偏差,但在整个实验区间内,二者趋势大致相同,验证了普适型 GPS 接收机用于水位监测的能力.有较大偏差出现的原因可能是由于普适型 GPS 测站与水位实测站之间距离较远,从而导致反演结果与实测结果相差较大.为进一步探究实验期内反演结果与实测值的相关性,将每一天的水位反演值归一化后与同一天的水位实测值和流量实测值进行比较.

图 8 为实验期内水位反演结果与水位实测值相关性分析,图中蓝色小圆圈代表反演值,红色实线代表水位实测值.计算得到,二者相关性  $R$  为 0.81, RMSE 为 0.21 m.图 9 为实验期内水位反演结果与流

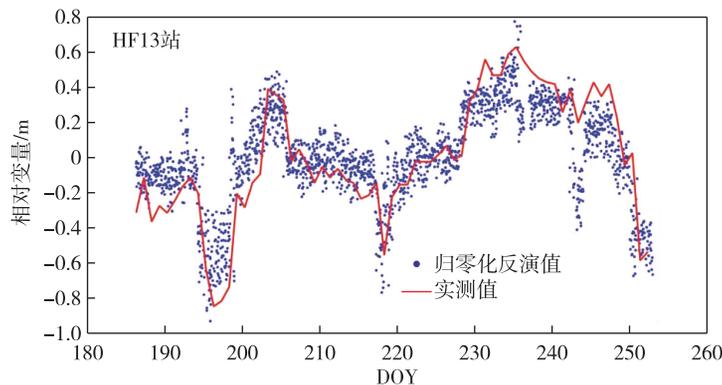


图 7 普适型 GPS 测站黄河水位反演结果

Fig. 7 Inversion results of the Yellow River water level variations by universal GPS station

量实测值相关性分析,为保持图的可读性,横轴设为 1/1 000 流量变化值,图中红色小圆圈代表反演值,黑色实线代表流量实测值.计算得到,二者相关性  $R$  为 0.81, RMSE 为 0.22 m.

从图 8 和图 9 可以看出,本次实验中得到的反演值与实测值相关性较好,无论是水位实测值还是流量实测值,二者的相关系数都达到了 0.8 以上,同时 RMSE 均控制在 0.2 m 左右.反演结果表明普适型 GPS 接收机用于长时间黄河水位观测是可行的.

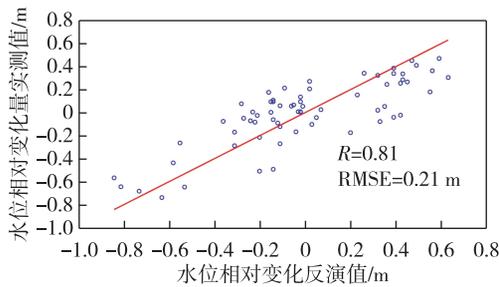


图 8 水位反演结果与水位实测值相关性

Fig. 8 Correlation between water level inversion results and measured water levels

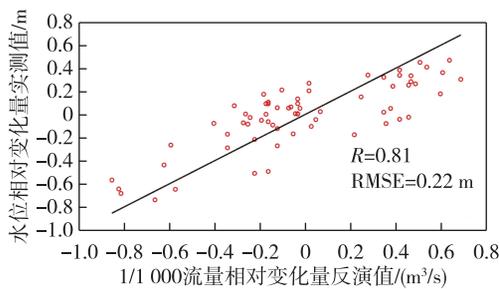


图 9 水位反演结果与流量实测值相关性

Fig. 9 Correlation between water level inversion results and measured flow values

#### 4 结束语

本文通过在黄河盐锅峡的实测数据,分析了普适型 GPS 观测数据的质量和其用于长周期 GPS-IR 水位监测的能力,获得了均方根误差为分米级的监测精度,验证了普适型 GPS 可用于长周期黄河水位监测的能力.GPS-IR 技术是利用在传统 GPS 测量中常常被剔除的多路径误差进行反演的方法,能有效提高效率、节约成本,可以近实时监测地表环境的变化.随着普适型 GPS 的不断增加,可进一步用于土壤湿度、积雪、植被等地表参数的监测,并将成为一种

一机多功能的 GPS 探测仪,为地表环境探测提供重要补充.下一步的主要工作是改进算法,提升反演结果质量,使普适型 GPS 更好地应用于监测黄河水位变化.

#### 参考文献

##### References

- [ 1 ] 习近平.在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上上的讲话[J/OL].求是,2019(20).[2020-12-03].http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2019-10/15/c\_1125102357.htm
- [ 2 ] 彭建兵,兰恒星,钱会,等.宜居黄河科学构想[J].工程地质学报,2020,28(2):189-201  
PENG Jianbing, LAN Hingxing, QIAN Hui, et al. Scientific research framework of livable Yellow River[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2):189-201
- [ 3 ] 樊东方,赵新生,孙发亮.黄河水位观测技术与实践[J].水利技术监督,2005,13(5):60-62  
FAN Dongfang, ZHAO Xinsheng, SUN Faliang. Water level observation technology and its application[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2005, 13(5):60-62
- [ 4 ] 李黄,夏青,尹聪,等.我国 GNSS-R 遥感技术的研究现状与未来发展趋势[J].雷达学报,2013,2(4):389-399  
LI Huang, XIA Qing, YIN Cong, et al. The current status of research on GNSS-R remote sensing technology in China and future development[J]. Journal of Radars, 2013, 2(4):389-399
- [ 5 ] 万玮,陈秀万,李国平,等.GNSS-R 遥感国内外研究进展[J].遥感信息,2012,27(3):112-119  
WAN Wei, CHEN Xiuwan, LI Guoping, et al. GNSS reflectometry: a review of theories and empirical applications in ocean and land surfaces[J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(3):112-119
- [ 6 ] 刘经南,邵连军,张训械.GNSS-R 研究进展及其关键技术[J].武汉大学学报(信息科学版),2007,32(11):955-960  
LIU Jingnan, SHAO Lianjun, ZHANG Xunxie. Advances in GNSS-R studies and key technologies[J]. Geomatics and Information Science of Wunan University, 2007, 32(11):955-960
- [ 7 ] Larson K M, Small E E, Gutmann E D, et al. Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(24):L24405. DOI: 10.1029/2008GL036013
- [ 8 ] Larson K M, Gutmann E D, Zavorotny V U, et al. Can we measure snow depth with GPS receivers? [J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(17):L17502. DOI: 10.1029/2009GL039430
- [ 9 ] 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 Geoece and Remote Sensing Letters, 2013, 10(5):1200-1204
- [ 10 ] 吴继忠,杨荣华.利用 GPS 接收机反射信号测量水面

- 高度[J].大地测量与地球动力学,2012,32(6):135-138  
 WU Jizhong, YANG Ronghua. Measuring water surface height by using reflected signal of geodetic-quality GPS receiver[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(6):135-138
- [11] Strandberg J, Hobiger T, Haas R. Improving GNSS-R sea level determination through inverse modeling of SNR data [J]. Radio Science, 2016, 51(8):1286-1296
- [12] 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):1042-1049  
 ZHANG Shuangcheng, NAN Yang, LI Zhenyu, et al. Analysis of tide variation monitored by GNSS-MR[J]. Journal of Surveying and Mapping, 2016, 45(9):1042-1049
- [13] Jin S G, Qian X D, Wu X. Sea level change from Beidou navigation satellite system-reflectometry (BDS-R): first results and evaluation[J]. Global and Planetary Change, 2017, 149:20-25
- [14] Wang X L, Zhang Q, Zhang S C. Water levels measured with SNR using wavelet decomposition and Lomb-Scargle periodogram[J]. GPS Solutions, 2017, 22(1):1-10
- [15] 黄观文, 黄观武, 杜源, 等. 一种基于北斗云的低成本滑坡实时监测系统[J]. 工程地质学报, 2018, 26(4):1008-1016  
 HUANG Guanwen, HUANG Guanwu, DU Yuan, et al. A lowcost real-time monitoring system for landslide deformation with Beidou cloud[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(4):1008-1016
- [16] 白正伟, 张勤, 黄观文, 等. “轻终端+行业云”的实时北斗滑坡监测技术[J]. 测绘学报, 2019, 48(11):1424-1429  
 BAI Zhengwei, ZHANG Qin, HUANG Guanwen, et al. Real-time BeiDou landslide monitoring technology of “light terminal+industry cloud” [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(11):1424-1429
- [17] 南阳, 张双成, 黄亮, 等. GPS-IR 技术用于河水面测高实验分析[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(2):126-131  
 NAN yang, ZHANG Shuangcheng, HUANG Liang, et al. Analysis of GPS-IR water level altimetry experiment on river [J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(2):126-131
- [18] 刘凯. GPS-MR 技术用于潮位监测算法研究[D]. 西安:长安大学, 2018  
 LIU Kai. Research of GPS-MR algorithm in tide monitoring[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018

## Monitoring water level change of the Yellow River by universal GPS receivers

MA Zhongmin<sup>1</sup> ZHANG Shuangcheng<sup>1,2</sup> LIU Qi<sup>1</sup> HUANG Guanwen<sup>1</sup> KANG Qiancheng<sup>1</sup> PENG Jilun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710064

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054

**Abstract** The hydrological changes of the Yellow River are complex, and the existing water level monitoring methods are time-consuming and laborious and cannot well meet the requirements of both time resolution and spatial resolution. The emergence of ground-based GPS-IR technology provides a new approach for water level monitoring, but the receivers currently used in most ground-based GPS-IR technologies are high-precision geodetic receivers, which are costly and weak in timeliness thus are not suitable for wide application. This article first introduces the composition of the universal GPS receiver and analyzes the quality of GPS observation data, then gives out the basic principle of ground-based GPS-IR technology for water level monitoring. Finally, the GPS-IR water level data are extracted from GPS data measured by the Yellow River Yanguo Gorge, which are then compared with the water level monitoring data of Lanzhou Hydrometric Station. The experimental results show that the water levels retrieved by universal GPS receiver are accurate with the best RMSE being 0.21 m, verifying the applicability of universal GPS receiver for long-term water level monitoring.

**Key words** universal GPS; GPS-IR; the Yellow River; water level