

# 基于 PPP 技术的 GPS 浮标海啸预警模拟研究

程世来<sup>1</sup> 张小红<sup>2</sup>

(1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079 )  
(2 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079 )

**摘 要:**提出了利用精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术进行海啸预警的方法,并利用 TriP 软件对实测浮标数据进行了处理,将得出的海面高数据和海啸波模型叠加进行了模拟分析。仿真结果表明,利用精密单点定位技术进行海啸预警,能够监测判断海啸的发生,并获得海啸波到达海岸的波高和时间,提供一定的预警信息。

**关键词:**精密单点定位;GPS 浮标;海啸;预警

**中图法分类号:**P228.42

目前,国际上海啸监测主要分为基于数据库的预报、地震监测<sup>[1]</sup>、海啸声波监测和海面高监测四种方法。数据库预报基于灾害数据和海啸传播模型等组成的数据库,一旦发现参数相似的震例,就快速进行定量数值预报<sup>[2]</sup>。此外,根据海啸波浪中次声波波速(5 400 km/h)比海啸波(100~500 km/h)快得多的特点,利用岸边水声接收站网获取水声信号也能获取海啸监测信息<sup>[1]</sup>。但上述方法预报的海啸信息量有限,准确性不高,且由于空间技术具有实时、高精度、大范围的特性,因此,利用卫星雷达、激光、遥感、GPS 等空间手段实时获取海面高程信息以监测海啸的技术便获得广泛的应用<sup>[3]</sup>。目前,常用的方法是采用 GPS 浮标,同时在海岸设置基准站,利用 RTK 技术监测海面高变化<sup>[4]</sup>。但利用 RTK 浮标技术有以下不足<sup>[5]</sup>:① 浮标和海岸基准站的距离受精度限制;② RTK 技术要求在近海岸建立较多的基准站;③ RTK 技术对无线电数据通信链路的稳定性和高效性提出了较高的要求。基于此,本文提出了基于 PPP 浮标技术的海啸预警监测系统。

## 1 基于 PPP 技术的 GPS 浮标海啸监测预警系统

### 1.1 精密单点定位

精密单点定位(PPP)<sup>[6]</sup>的原理是采用 JPL 实

验室的 IGS 后处理星历。对单台双频接收机采集的相位和伪距观测值进行无电离层模型联合求解,并采用逐次序贯滤波的思想,最终解算出接收机的三维坐标(X,Y,Z)、接收机钟差(dt)、对流层天顶延迟(Z)、相位组合模糊度参数(a)(不具有整周特性)<sup>[7]</sup>。由于 PPP 技术所采用的卫星轨道精度更高,所采用的算法利用了更多的原始观测信息,并更加全面地对各种误差进行了改正,在静态可以达到 cm 和亚 cm 级的精度,因此可以说,PPP 定位技术完全可以用于 GPS 浮标的数据处理系统,并用于海啸的预警监测。

### 1.2 PPP 浮标监测系统

本文提出的 PPP 浮标监测系统是通过在深海布设 GPS 浮标,用 PPP 技术代替 RTK 方法,用无线电通信链路远程传递数据,以达到实时监测海啸的目的。每个浮标搭载常备电源、GPS 天线、TriP 软件处理模块、无线电接收与发送模块等,构成完备的监测平台。

系统整个数据处理的流程可简要描述如下:海岸的监测中心通过 GSM/GPRS 或 Internet 获取附近 IGS 跟踪站或基准站的同步观测数据,利用 IGS 预报星历和钟差解算出高精度的星历和精密钟差,通过 500 W 大功率无线电信标台实时地将处理的精密星历和精密钟差发送至深海浮标。在浮标上, TriP 软件处理 GPS 观测数据和精密星历及钟差,得到浮标位置的解算结果,其结

果通过 UHF/VHF 无线电传输系统远距离传递到实时监测中心。

根据有限元的思想<sup>[9]</sup>,本文同时提出针对浮标布设的网格方法。每个 GPS 浮标构成浮标监测网格的一个基本单元。浮标网格的间距应尽量扩大浮标覆盖的区域,同时考虑到海啸波波长,浮标按照网格间距均匀布设。将浮标网格化,可以根据网格单元的平面相对位置关系对其高程变化赋权,近似获得连续空间的高程-时间变化关系,充分利用浮标的三维位置信息,以大大提高浮标高程变化对海啸预测的准确性和可靠性。

2 数据模拟分析

为了评价 PPP 用于海啸预警的可行性,笔者利用天津海域 GPS 浮标试验的实测数据,共采集了 4 h 的 GPS 观测数据,数据采样率为 20 Hz,使用的仪器是 Ashtech Z12 双频接收机。用 TriP 1.0 软件逐历元对该数据进行单点定位解算,获得每个历元时刻 GPS 浮标的高程。

GPS 浮标会随着海面的变化而上下起伏,除了海啸,引起海面高度变化的长期因素主要有海洋潮汐、风浪等。其中,风浪的周期为 0.5~25 s,波长为 cm 到百 m 级;海啸的周期在 2 min~2 h,波长在 100 km 以上;相比于风浪和海啸,潮汐的周期和波长均较长,周期为 12.5 h、25 h 等,波长长达几千 km<sup>[9]</sup>。

在对 GPS 浮标高程的数据处理中,由于潮汐的变化规律性强,可以事先利用文献[10]中的潮汐模型计算每个时刻该点处潮汐的大小,然后将潮汐部分从计算出的海面高程中扣除,便只剩下风浪等引起的海面高程变化系列。图 1 给出了试验数据扣除潮汐后的海面高程随时间的变化序列。

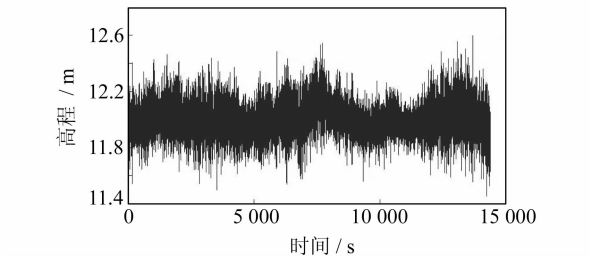


图 1 平静海面条件下 GPS 浮标高程随时间的变化图  
Fig. 1 Diagram of Time-Related Height of GPS Buoy in Calm Sea

图 1 中,在正常海况条件下,海水面只受风浪的作用而起伏波动,一般可以将风浪引起的海面高程变化在短时间内看成是高频的随机波动。频

率高,周期短,约 0.5~25 s<sup>[9]</sup>。在大量的取样数据情况下,可以将上述扣除掉潮汐影响的海水高程变化进行低通滤波。在单个浮标点,海水波形满足以下近似方程<sup>[11]</sup>:

$$\eta(t) = \xi \operatorname{sech}^2 \frac{3\sqrt{3}}{4} \left( \frac{ct}{l} \right) \tag{1}$$

式中, $l = \frac{3}{2} \left( \frac{\xi}{h^3} \right)^{1/2}$  为海啸波长; $c = \sqrt{gh}$  为速度。

图 2 是根据式(1),假定  $\xi = 2 \text{ m}$ ,  $t$  从 7 200 历元经  $2T(T = l/c)$  的浮标高程变化图。假设正激励向海岸传播,即波峰先到达(当激励为负时,波谷先到达)。由于海啸波振幅大,周期相对较长,对高程变化的影响显著,因此它有以下特征:① 海水面高程拟合曲线的斜率在海啸波传至的一刻发生突变,变化率的绝对值近似为 1;② 通过长时间连续的数据可以看出,有海啸波影响的海水面高程,其拟合曲线的振幅明显大于静态海面下的振幅,其周期远长于静态海面下的波动周期。

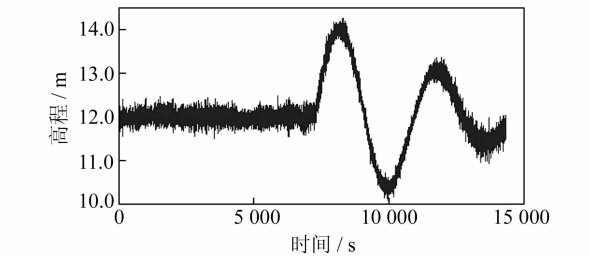


图 2 受海啸波影响下 GPS 浮标高程随时间的变化图  
Fig. 2 Diagram of Time-Related Height of GPS Buoy Respected to Tsunami

一个连续采集数据的 GPS 浮标通过 TriP 高精度精密单点定位软件解算,可以连续监测这一点的海面高程变化,将海水面高程随时间的变化数据用曲线描绘出来,通过拟合法建立海水面拟合曲线。根据拟合曲线的变化特征,可以获得对海啸的监测信息。

3 结 语

相对于 RTK 技术,基于 PPP 浮标技术的海啸预警监测系统不仅成本更低,系统简单,维护方便,而且它可以使浮标离海岸的距离摆脱基准站的限制,能提供更多的预警时间,大大减轻海啸这一自然灾害对人类可能造成的损失。

一个 GPS 浮标上的数据毕竟有限,而且由于它的

数据是孤立的,对海啸的监测判断准确性不高,因此,按一定网格分别布设多个 GPS 浮标,同时基于 PPP 技术处理浮标数据,利用在每个 GPS

浮标探测的海啸波高来综合推测海啸到达海岸处波峰的峰值,能够准确监测海啸,判断海啸的发生。

当然,本文对海啸预警模型的研究工作只是探索性的。一个完整的海啸监测系统是各学科、各种技术手段的综合应用,包括运用卫星、遥感、InSAR等空间技术监测海啸在海域中传播的进程,并结合先于海啸波到达的地震波资料,快速、准确地测定地震的各参数,以及分析海底地形资料和布设在海面和海底不同深度的压强计采集的信息,这有待于进一步研究。

### 参 考 文 献

[1] 杨马陵. 地震海啸预警现状与进展[J]. 华南地震, 2005, 25(2): 22-29

[2] 于福江, 吴玮, 赵联大. 基于数值预报技术的日本新一代海啸预警系统[J]. 国际地震动态, 2005(1): 19-22

[3] 文汉江, 章传银. 由卫星测高数据观测到的印度洋海啸波高[J]. 测绘科学, 2005, 30(2): 39-40

[4] Kato T, Terada Y, Kinoshita M, et al. A New Tsunami Monitoring System Using RTK-GPS[C]. International Tsunami Symposium 2001, Seattle, USA, 2001

[5] Colombo O. Long-distance Kinematic GPS [M]. 2nd ed. // Teunissen P J G. GPS for Geodesy. New

York: Springer, 1996: 537-567

[6] 刘经南, 叶世榕. GPS 非差相位单点定位技术探讨[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(3): 234-240

[7] Zumbege J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102 (B3): 5 005- 5 017

[8] Tinti S, Piatanesi A, Bortolucci E. The Finite-Element Wave Propagator Approach and the Tsunami Inversion Problem[J]. Phys Chem Earth, 1996, 21 (12): 27-32

[9] 徐德宝, 赵建虎. 海洋测绘[J]. 北京: 海洋出版社, 1993

[10] 张瑞华. 施维德斯基海潮高数学模型[J]. 测绘科技, 1996(3):

[11] Silva R, Losada I J, Losada M A. Reflection and Transmission of Tsunami Waves by Coastal Structures[J]. Applied Ocean Research, 2000, 22: 215-223

[12] 张小红, 刘经南, Forsberg R. 基于精密单点定位技术的航空测量应用实践[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(1): 19-22

第一作者简介: 程世来, 博士生。现从事 GPS 理论与应用研究。  
E-mail: csl0085@163.com

## Simulation of Tsunami Forecasting with GPS Buoy Using PPP Technology

CHENG Shilai<sup>1</sup> ZHANG Xiaohong<sup>2</sup>

(1 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** A new tsunami forecasting method employing PPP (precise point positioning) technology is proposed. With the field data of GPS buoy being processed using self-developed software Trip, the simulation results which combine the height datum of sea level and the simulated tsunami model are analyzed. Ultimately the simulation results show that PPP technology can determine tsunami, and forecast the message on the amplitude and arrival time of probabilistic tsunami to a certain extent.

**Key words:** precise point positioning; GPS buoy; tsunami; forecast