利用 GNSS 反射信号载波测量湖面高度变化

姚彦鑫 杨东凯 张其善

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 给出一种利用导航卫星反射信号的载波相位测量光滑湖面高度变化的方法. 首先建立载波相位观测方程,通过在直射与反射信号的观测量之间求单差,再在历元间求双差的方法,消除了大量误差并得到了直射与反射信号的几何路径差;然后根据各颗卫星的观测值和高度角等信息计算出湖面高度变化,并把各卫星得到的湖面高度度变化值进行加权平均以提高测量系统的精度和可靠性. 仿真验证了方法在-15 dB 信噪比下达到了毫米级的测量精度.

关 键 词: 全球导航卫星系统; 高度; 遥感; 反射; 载波

中图分类号: TN 965.5

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)09-1072-04

Lake height variation measurement utilizing GNSS reflected signal carrier phase

Yao Yanxin Yang Dongkai Zhang Qishan

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A lake height variation measurement method utilizing global navigation satellite system (GNSS) reflected signal carrier phase was given. Carrier phase observation equations were built firstly. Then the single-differences between the carrier phase observation measurements for direct and reflected signal and the double-differences between epochs were calculated. A large amount of errors was eliminated by the differencing process. Also, the geometry path differences of direct and reflected signal were derived. The lake height variation was calculated using observation measurement and elevation information from separate satellite. The weighted average of the lake height variations from various satellites was derived to improve the precision and reliability of the measuring system. Simulation confirms that the precision of millimeter order is achieved with the method under -15 dB signal to noise ratio(SNR).

Key words: global navigation satellite system; altimetry; remote sensing; reflection; carrier

GNSS-R (Global Navigation Satellite System-Reflection)遥感的概念是由 Martin-Neira 等人于 1993 年逐步提出的[1],从此美国与欧洲的众多研究人员在海洋和湖面测高方面进行了大量理论研究和试验. 文献[2]利用 C/A 码进行海面高度估计,达到了码片的 1%(3 m)的测量精度,文献[3]在利用互相关函数前沿导数计算海面高度等方面做了理论的分析和研究,文献[4-5]利用 P(Y)码从飞机上进行进行海面高度测量. 在国内,GNSS-R 遥感研究和试验正在展开,不过主要集中在海面风速、有效波高测量等方面[6]. 用反射信号的 C/A 码片或者 P(Y)码进行测高很难达到厘米级的估计精度,利用反射信号的载波相位可以进行对反射面高度的高精确测量. 本文提出了一种利用光滑湖面反射信号载波相位的相干性,用测量直射和反射信号的载波相位,估算两路径

收稿日期: 2009-05-05

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2006AA09Z137,2007AA12Z340)

作者简介: 姚彦鑫(1982-),女,河北蔚县人,博士生,yanxin_buaa@126.com.

传播时间差的方法,实现湖面高度变化的跟踪测量.

1　载波相位观测量的获取

摆放接收机于湖面上方某高度,可建立接收机与卫星和湖面之间的几何关系如图 1 所示.根据空间几何学原理,不考虑大气层等空间传播的不理想因素,镜面反射和直射信号的传播路径差最小为

$$D-R=(2h+d)\sin\theta \tag{1}$$

其中,h 为反射信号接收天线到反射面的高度;θ 为反射点到某颗卫星的俯仰角;d 为接收机 2 个天线相位中心之间的距离;D 为直射信号在卫星与接收天线之间的几何距离;R 为反射信号接收天线至镜面反射点的几何距离与镜面反射点至卫星的几何距离之和.

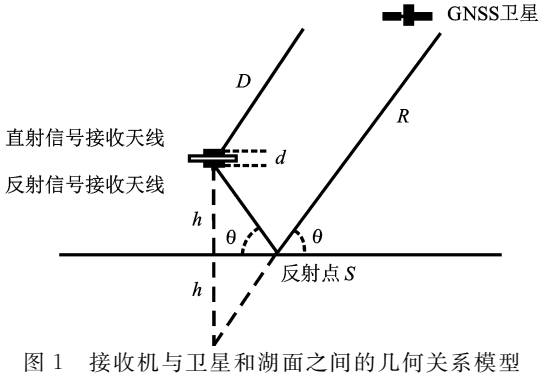

图 1　接收机与卫星和湖面之间的几何关系模型

精确测量出直射和反射信号的传播几何路径差 $d_{\mathrm{dif}}=R-D$,即可获得观测到的反射面至接收平台反射天线的垂直高度 h 为

$$h=\frac{1}{2}\left(\frac{d_{\mathrm{dif}}}{\sin\theta}-d\right) \tag{2}$$

d_{dif} 可以通过测量卫星发射的信号经过直射与反射路径分别到达接收机的传播时间差来推算.对于比较平静的湖面或者海面,反射面的有效波高比较小时,反射信号的相干性被保持,直射路径和反射路径的传播时间差通过测量重建直射、反射信号的载波相位状态得到[7].地面接收机在常规的 GPS 信号接收强度下,对直射信号载波相位的跟踪精度一般能达到 0.01 周.

载波相位观测量是在接收机达到载波相位跟踪状态下,隔一定的时间间隔提取的载波相位(或测相伪距),应用于载波相位的定位解算中.对某一卫星的载波相位观测值由 3 部分组成:初始整周未知数 N_0,从开始锁定至 n 时刻的整周计数 $C(n)$,相位尾数 $\phi(n)$.在测高应用中,实际提取在第 n 个历元的直射信号和反射信号的(带有整周模糊度)载波相位观测量 $\varphi_{\mathrm{dir}}(n)=C_{\mathrm{d}}(n)+\phi_{\mathrm{d}}(n)$ 和 $\varphi_{\mathrm{ref}}(n)=C_{\mathrm{r}}(n)+\phi_{\mathrm{r}}(n)$,整周模糊度分别为 $N_{0\mathrm{r}}$ 和 $N_{0\mathrm{d}}$.

2　测相伪距观测方程的建立和求解

实际上直射路径和反射路径的传播时间差不仅包括传播几何路径差 d_{dif} 的时间,还包括由对流层和电离层等造成的传播延迟差、没建模的物理效果造成的传播延迟差等.这些将作为误差项将在下面的讨论中加以分析.

2.1　原始测相伪距观测方程

考虑一颗卫星和一个接收机的情况,这个时候,直射和反射信号的伪距观测方程分别为

$$\lambda_{\mathrm{L}}\varphi_{\mathrm{dir}}(n)=[D(n)+D_{\mathrm{tro}}(n)+D_{\mathrm{ion}}(n)]+c\delta_{\mathrm{uclock}}(n)-c\delta_{\mathrm{dsclock}}(n)-\lambda_{\mathrm{L}}N_{0\mathrm{d}}+\lambda_{\mathrm{L}}\varepsilon_{\varphi\mathrm{d}}(n) \tag{3}$$

$$\lambda_{\mathrm{L}}\varphi_{\mathrm{ref}}(n)=[R(n)+R_{\mathrm{tro}}(n)+R_{\mathrm{ion}}(n)]+c\delta_{\mathrm{uclock}}(n)-c\delta_{\mathrm{rsclock}}(n)-\lambda_{\mathrm{L}}N_{0\mathrm{r}}+\lambda_{\mathrm{L}}\varepsilon_{\varphi\mathrm{r}}(n) \tag{4}$$

其中,$x(n)$ 为在第 n 个历元对物理量 x 进行观测;φ_{dir} 为直射信号载波相位观测量;D_{tro} 为对流层折射对直射信号传播造成的传播距离上的误差;D_{ion} 为电离层折射对直射信号传播造成的传播距离上的误差;δ_{uclock} 为用户钟差;$\delta_{\mathrm{dsclock}}$ 为观测直射信号对应的卫星钟差;$\varepsilon_{\varphi\mathrm{d}}$ 为卫星钟和接收机时钟相噪、接收机硬件相延迟、周跳等对直射信号的载波测量所产生的误差的综合,以周为单位.φ_{ref} 为反射信号载波相位观测量;R_{tro} 为对流层对反射信号传播造成的传播距离上的误差;R_{ion} 为电离层对反射信号传播造成的传播距离上的误差;$\delta_{\mathrm{rsclock}}$ 为反射信号对应的卫星的钟差;$\varepsilon_{\varphi\mathrm{r}}$ 为卫星钟和接收机时钟相噪、接收机硬件相延迟、周跳等对反射信号的载波测量所产生的误差的综合,以周为单位.

2.2　直射和反射观测量求单差

对同一颗星的直射和反射信号的原始伪距观测方程求差得:

$$\begin{aligned}&\lambda_{\mathrm{L}}[\varphi_{\mathrm{ref}}(n)-\varphi_{\mathrm{dir}}(n)]=\\&R(n)-D(n)+R_{\mathrm{tro}}(n)-D_{\mathrm{tro}}(n)+\\&\lambda_{\mathrm{L}}[\varepsilon_{\varphi\mathrm{r}}(n)-\varepsilon_{\varphi\mathrm{d}}(n)]-\\&c[\delta_{\mathrm{rsclock}}(n)-\delta_{\mathrm{dsclock}}(n)]-\lambda_{\mathrm{L}}[\Delta N_{0\mathrm{r}}-\Delta N_{0\mathrm{d}}]\end{aligned} \tag{5}$$

通过求差,时间同步的用户钟差基本消除.于历元 n 进行观测直射信号与反射信号对应的卫星钟差由于不是全同步的,故通过 $\delta_{\mathrm{rsclock}}(n)-\delta_{\mathrm{dsclock}}(n)$ 求差,只削弱了长期稳定度的卫星钟差的影响,没有消除短期稳定度的影响.对于由对流

层造成的传播距离误差，由于直射信号和反射信号通过的传播路径相距较近(<20 km)，对流层在距离相近处的物理特性相近，因此将同一卫星的近似同步观测值求差，明显减弱对流层折射的影响，不过对流层接近湖面的折射率值是对流层中最大的，考虑接近湖面处直射和反射信号的传播路径不同，对流层的影响并未完全消除，尤其当直射和反射信号的传播距离差较大的时候. 电离层在空间相近处的物理特性也相近，通过对同一卫星观测的直射和反射信号近似同步观测值求差，电离层的误差获得明显的削弱的效果. 由于 $\varepsilon_{\varphi d}(n)$ 和 $\varepsilon_{\varphi d}(n)$ 的随机性都比较强，而且它们之间相关性较弱，可以认为基本没有通过求差而削弱.

对式(5)进行简化，表示为

$$\lambda_L \Delta\varphi(n) = d_{dif}(n) + \Delta E + \lambda_L \Delta\varepsilon_\varphi(n) - c\Delta\delta_{sclock}(n) - \lambda_L \Delta N \tag{6}$$

其中，$\Delta\varphi(n)=\varphi_{ref}(n)-\varphi_{dir}(n)$ 为直射与反射信号的测相伪距之差，$\Delta N_0 = N_{0r} - N_{0d}$ 为直射与反射信号的整周模糊度的差值，$d_{dif}(n)=R(n)-D(n)$ 为直射与反射信号的几何空间上传播距离的差值，$\Delta E = R_{tro}(n) - D_{tro}(n)$ 为由于直射和反射信号的传播路径不同，对流层对信号传播造成的影响，这个值可由文献[8]的方法近似求出，用求出的值校正 $\Delta\varphi(n)$，以下不再讨论. $\Delta\delta_{sclock}(n)=\delta_{rsclock}(n)-\delta_{dsclock}(n)$ 为对应于直射信号与反射信号的卫星钟的差值，$\Delta\varepsilon_\varphi(n)=\varepsilon_{\varphi r}(n)-\varepsilon_{\varphi d}(n)$ 为直射信号与反射信号的随机观测误差的差值.

2.3 单差观测值的历元之间求差

对上述单差观测值，进一步进行历元之间求差. 求差之后，卫星钟差基本消除，整周模糊度被消除，得到：

$$\lambda_L \Delta\varphi(n_1,n_2) = d_{dif}(n_1,n_2) + \lambda_L \Delta\varepsilon_\varphi(n_1,n_2) \tag{7}$$

其中

$$\Delta\varphi(n_1,n_2) = \Delta\varphi(n_2) - \Delta\varphi(n_1) \tag{8a}$$

$$d_{dif}(n_1,n_2) = d_{dif}(n_2) - d_{dif}(n_1) \tag{8b}$$

$$\Delta\varepsilon_\varphi(n_1,n_2) = \Delta\varepsilon_\varphi(n_2) - \Delta\varepsilon_\varphi(n_1) \tag{8c}$$

把式(1)带入式(8a)得到

$$d_{dif}(n_1,n_2) = 2h(n_2)\sin\theta(n_2) - 2h(n_1)\sin\theta(n_1) + d[\sin\theta(n_2) - \sin\theta(n_1)] \tag{9}$$

高度角是利用直射信号对接收机进行定位求解后得到的. 由于短时间内(0.1 s)高度角只可能产生微小的变化，当 $n_2T - n_1T < 0.1$ s 时(T 代表相邻历元之间的时间间隔)，可以假设 $\sin\theta(n_2)\approx\sin\theta(n_2)$. d 已知且确定. 式(9)可以近似为

$$d_{dif}(n_1,n_2) = 2h(n_1,n_2)\sin\theta(n_1) \tag{10}$$

其中 $h(n_1,n_2)=h(n_2)-h(n_1)$.

由式(7)和式(10)得到估计的历元间的湖面高度变化为

$$\hat{h}(n_1,n_2) = \frac{\lambda_L \Delta\varphi(n_1,n_2)}{2\sin\theta(n_1)} \tag{11}$$

可见，由于历元 n_1, n_2 得到的载波相位观测量计算出湖面高度在历元 n_1, n_2 之间的变化.

2.4 观测值加权平均提高精度和可靠性

用上标 $i, j, \cdots$ 表示由卫星 $i, j, \cdots$ 的观测值估计出的历元间的湖面高度变化 $\hat{h}^i(n_1,n_2)$，$\hat{h}^j(n_1,n_2)$，…，利用一段时间(如历元间隔$[n_1,n_N]$之间)内由不同的卫星的观测量得到的高度变化估计值，根据估计质量(由信号的信噪比等判断)进行加权平均，得到平均的高度变化轨迹 $\{\overline{h}(n_1,n_2), \overline{h}(n_2,n_3), \cdots, \overline{h}(n_{N-1},n_N)\}$，利用信息的冗余性提高系统的可靠性和精度.

由以上方法的求差过程，由电离层、对流层、卫星钟差、卫星星历、接收机钟差等造成的影响基本被消除，得到是残留的较随机误差影响下的高度变化的估计值.

3 仿真分析

下面给出模拟湖面高度在 1 min 内，以均匀的速度上升了 0.100 0 m 的试验情况. 为了简单，假设直射信号的信噪比为 −15 dB(解扩前). 反射信号的衰减等情况根据卫星高度角确定几何关系和湖面状态而定，湖面有效波高设为 2 cm.

卫星 12 的高度角在此期间从 72.722°逐渐减小共缓变 0.75°，载波伪距双差观测量的测量误差为 0.030 周. 卫星 16 的高度角在此期间从 22.585°逐渐增加，共缓变 0.81°，载波伪距双差观测量误差为 0.015 周. 卫星 21 的高度角在此期间从 47.585°逐渐增加，共缓变 0.57°，载波伪距双差观测量误差为 0.020 周. 卫星 30 的高度角在此期间从 30.285°逐渐增加，共缓变 0.69°，载波伪距双差观测量误差为 0.021 周.

由各颗卫星得到的双差伪距观测量如图 2，由各颗卫星得到的高度累计变化情况如图 3.

各颗卫星得到的高度估计均方差是 0.003 7，0.009 9，0.003 4，0.004 6 m. 由各颗卫星得到的湖面高度累计变化平均和加权平均高度均方差分别为 0.003 0 m 和 0.002 6 m. 可见综合考虑观测量的测量精度和高度角的影响得到的加权平均高度变化比简单的平均得到估计精度高，处理算法简

单有效.

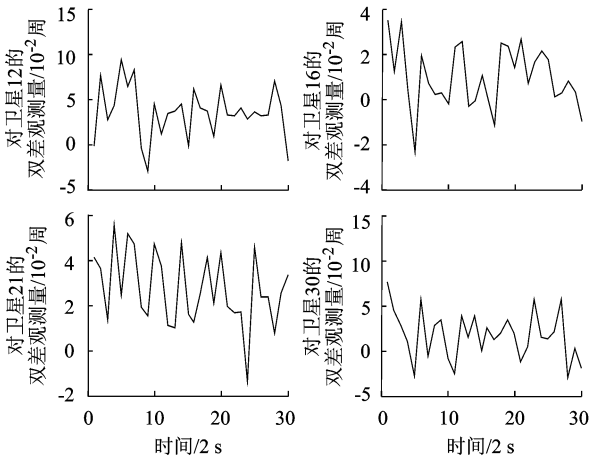

图 2　图 2　双差观测量

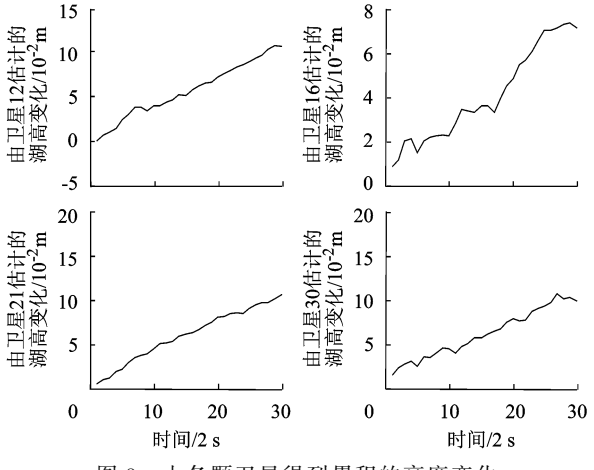

图 3　由各颗卫星得到累积的高度变化

4　结　论

本文提出的基于导航卫星反射信号载波相位测量湖面高度变化的方法能够利用观测量求双差的过程消除大量时间和空间相关的误差.如电离层、对流层误差、接收机钟差等.用仿真数据说明:对多个卫星的湖面高度变化估值综合考虑观测量的测量精度和高度角进行加权平均可以获得更高的估计质量.

研究表明:本文所提出的湖面高度变化测量方法具有消除误差性能优越、方法简单、计算量小、测量精度高的优点.

参考文献（References）

[1] Martín-Neira. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): application to ocean altimetry[J]. ESA Journal,1993,17:331－3551

[2] Martín-Neira, Marco Caparrini, Font-Rossello J, et al. The PARIS concept: an experimental demonstration of sea surface altimetry using GPS reflected signals [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 142－150

[3] Hajj G A, Zuffada C. Theoretical description of a bistatic system for ocean altimetry using the GPS signals[J]. Radio Science, 2003, 38(5): 1089－1107

[4] Wilmhoff B, Lalezari F, Zavorotny V, et al. GPS ocean altimetry from aircraft using the P(Y) code signal[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2007: 5093－5096

[5] Lowe S T, zuffada C, chao Yi, et al. 5-cm precision aircraft ocean altimetry using GPS reflections[J]. Geophysics Research Letters, 2002, 29(10): 4359－4362

[6] 张益强,张其善,杨东凯,等. 基于 GPS 遥感的延迟映射接收机关键技术[J].北京航空航天大学学报,2006,32 (3):333－336

Zhang Yiqiang, Zhang Qishan, Yang Dongkai, et al. Design of delay mapping receiver for GPS remote sensing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32 (3): 333－336 (in Chinese)

[7] 刘杰,富立,王玲玲. GPS 软件接收机原理样机设计与实现[J].北京航空航天大学学报, 2009, 35(15): 567－571

Liu Jie, Fu Li, Wang Lingling. Design and realization of a prototype of software GPS receiver [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(15): 567－571(in Chinese)

[8] Ben K H, Soon Poh E K. Test results of precision approach and landing augmented by airport pseudolites[C]// ION GPS/GNSS 2003. Portland:[s. n.],2003:2318－2325

(责任编辑:娄　嘉)