李黎,匡翠林,朱建军等. 基于实时精密单点定位技术的暴雨短临预报. 地球物理学报,2012,55(4):1129-1136,doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.008.

Li L, Kuang C L, Zhu J J, et al. Rainstorm nowcasting based on GPS real-time precise point positioning technology. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(4):1129-1136,doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.008.

基于实时精密单点定位技术的暴雨短临预报

李 黎[1,2],匡翠林[2],朱建军[2],陈 武[3],陈永奇[2,3],龙四春[1,2],李洪玉[4]

1 湖南科技大学煤炭资源清洁利用与矿山环境保护省重点实验室,湖南湘潭 411201

2 中南大学测绘与国土信息工程系,长沙 410083

3 香港理工大学土地测量与地理资讯学系,香港

4 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018

摘 要 提出了一种将实时精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)技术用于暴雨短临预报的新方法.该方法首先基于 GPS 连续运行参考站网(Continuously Operating Reference Stations, CORS)实时估计的精密卫星钟差完成 PPP 解算,再以实时获取的对流层延迟(Zenith Tropospheric Delay, ZTD)及其增量变化为依据进行暴雨短临预报.研究结果表明:一般雷暴天气来临之前的 2~6 h,ZTD 增量表现为先后突破±5 mm/5 min,且后续记录到的实际降水量大小与 ZTD 维持在高水平阶段的时间长短有较好的对应关系;就热带气旋而言,在强风作用下,ZTD 增量变化表现的异常活跃和复杂,规律性较弱,但对短临预报强降雨仍有一定的指示作用.

关键词 实时精密单点定位,对流层延迟,暴雨短临预报,连续运行参考站网

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.008 **中图分类号** P228 **收稿日期** 2011-08-23,2012-03-20 收修定稿

Rainstorm nowcasting based on GPS real-time precise point positioning technology

LI Li[1,2], KUANG Cui-Lin[2], ZHU Jian-Jun[2], CHEN Wu[3], CHEN Yong-Qi[2,3], LONG Si-Chun[1,2], LI Hong-Yu[4]

1 *Hunan Provincial Key Laboratory of Clean Coal Resources Utilization and Mine Environmental Protection, Hunan University of Science and Technology, Hunan Xiangtan* 411201, *China*

2 *Department of Survey Engineering and Geomatics, Central South University, Changsha* 410083, *China*

3 *Department of Land Surveying and Geo-informatics, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China*

4 *College of Water and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018, *China*

Abstract A new method was proposed for the rainstorm nowcasting based on GPS Real-Time Precise Point Positioning (RT-PPP) technology. Firstly, GPS un-differenced observations of Continuously Operating Reference Stations (CORS) were used to estimate real-time precise satellite clock biases (SCB). Secondly, based on IGU orbit and real-time estimated SCBs, the real-time Zenith Tropospheric Delay (ZTD) and their increments were obtained by using the RT-PPP. Lastly, real-time ZTD and their increments were used for the rainstorms nowcasting. The numerical results show that ZTD increments exceed ±5 mm/5 min several times before the advent of rainstorms 2~6 h, and the subsequent precipitations have a good relationship with the time length of ZTD maintaining at high levels. As to the tropical cyclone, the ZTD increments are too active and complex to show good regularity because of the action of strong wind. But, there are still

基金项目 国家自然科学基金项目(40974007,41004012,41004002)和中南大学前沿研究计划(2009QZZD002)资助.

作者简介 李黎,男,1981 年生,博士,现主要从事 GPS 精密定位和 GPS 气象学方面的研究. E-mail:gszl.lili@gmail.com

some indications to the short-term forecasting of heavy rainfalls caused by tropical cyclone.

Keywords Real-Time Precise Point Positioning (RT-PPP), Zenith Tropospheric Delay (ZTD), Rainstorm nowcasting, Continuously Operating Reference Stations (CORS)

1 引 言

暴雨是一种重要的天气现象,尤其是大范围的持续性或集中性特大暴雨,往往会引起严重的洪涝灾害,不但给人们的日常生活带来不便,而且会造成严重的经济损失,甚至可能危害人的生命,但是,暴雨也是当地水资源的重要来源之一.因此,实时监测并准确地短临预报暴雨,对降低其对工农业生产造成的经济损失和提高水资源的利用率具有重要的意义[1].

水汽含量是对暴雨天气进行实时监测和准确预报所依据的最主要参数之一,大气中蕴含充沛的水汽含量是暴雨发生的必要条件.探空气球和微波辐射计是测量水汽含量的传统方法,前者对掌握中小尺度对流层变化的作用十分有限;后者因不适宜于在降雨过程中使用,所以在实际工作中并不普遍[2].随着 GPS 连续运行参考站网(CORS)的加密和覆盖网络的扩大,通过估计参考站的对流层延迟(ZTD)可反演得到 CORS 网上空的水汽含量空间分布[3-5].近年来,众多学者研究了基于 GPS 差分技术和 PPP 技术实时获取水汽含量的方法[6-8].与差分技术相比,PPP 技术无需引入超远 GPS 参考站(>500 km)参与解算,其单站独立解算的特点可以大大地降低数据的解算耗时,但必须使用实时的卫星精密钟差[9-11].相关研究表明,无论是 GPS 差分技术,还是 PPP 技术,基于亚厘米级精度的 ZTD(< 6 mm)均可以得到近似精度为1 mm的水汽含量,与水汽辐射计和探空气球精度相当[12].可见,实时 ZTD 是实时获取水汽含量并用于暴雨短临预报的先决条件.ZTD 分为干延迟和湿延迟两部分:前者是地面气压和温度的函数,可以采用物理模型精确计算得到;而后者可通过转换因子转化为天气监测和预报所需信息——水汽含量.但是,如果只关注未来几小时的短临预报,可以认为大部分的 ZTD 变化是由水汽变化所引起的.

本文基于香港卫星定位参考站网,采用非差无电离层相位组合观测值和 IGU(IGS Ultra-rapid)轨道,应用卡尔曼滤波实时估计精密卫星钟差,再将实时估计钟差用于 PPP 解算而获得实时的 ZTD 序列,通过分析暴雨来临之前 ZTD 及其增量在时间序列上的变化,对实时 PPP 技术在暴雨短临预报方面的指示作用进行可行性研究.

2 卫星钟差实时估计方法

2.1 GPS 非差技术

使用非差技术估计卫星钟差时,无电离层组合观测方程可简化为[13-15]

$$P_{\mathrm{IF}} = c(\mathrm{d}t - \mathrm{d}T) + \Delta T + d_{\mathrm{mult}/P_{\mathrm{IF}}} + \varepsilon(P_{\mathrm{IF}}), \quad (1)$$

$$\Phi_{\mathrm{IF}} = c(\mathrm{d}t - \mathrm{d}T) + \Delta T + \lambda N' + d_{\mathrm{mult}/\Phi_{\mathrm{IF}}} + \varepsilon(\Phi_{\mathrm{IF}}), \quad (2)$$

式中,P_{IF},Φ_{IF} 分别是伪距和载波相位的组合观测值(m);c 是光速(m/s);$\mathrm{d}t$,$\mathrm{d}T$ 分别是卫星和接收机钟差(s);λ,N'分别是相位组合观测值的波长(m)和浮点模糊度(周);$d_{\mathrm{mult}/P_{\mathrm{IF}}}$,$d_{\mathrm{mult}/\Phi_{\mathrm{IF}}}$ 分别是伪距和相位组合测量值的多路径效应(m);$\varepsilon(\cdot)$ 是测量噪声(m);ΔT 是附有水平梯度的对流层延迟(m),可描述为[5]

$$\Delta T = m(\varepsilon)_{\mathrm{h}}\mathrm{ZHD} + m(\varepsilon)_{\mathrm{w}}(\mathrm{ZTD} - \mathrm{ZHD}) + m(\varepsilon)_{\mathrm{azi}}(G_{\mathrm{N}}\cos\phi + G_{\mathrm{E}}\sin\phi), \quad (3)$$

式中,ZTD 为天顶对流层延迟;ZHD 是天顶干延迟;(ZTD−ZHD)表示天顶湿延迟;$m(\cdot)$ 为映射函数;ε 是高度角;下标 h、w 和 azi 分别代表干延迟、湿延迟和梯度;ϕ 是方位角;$G_{\mathrm{N}}\cos\phi + G_{\mathrm{E}}\sin\phi$ 是梯度向量 $(G_{\mathrm{N}}, G_{\mathrm{E}})$ 和方位角向量 $(\cos\phi, \sin\phi)$ 的点积.对于梯度映射函数 $m(\varepsilon)_{\mathrm{azi}}$,各方向不均性主要来自水汽,所以使用湿延迟的映射函数作为梯度映射函数:

$$m(\varepsilon)_{\mathrm{azi}} = m(\varepsilon)_{\mathrm{w}} \frac{1}{\tan\varepsilon}. \quad (4)$$

2.2 基于非差技术的卫星钟差实时估计

基于 GPS 非差技术实时估计卫星钟差的流程包括观测数据的预处理、卫星钟差实时估计和产品实时发布三部分.需要输入的数据包括参考站的非差观测值及其测站坐标,以及精密轨道和 ERP 数据.测站坐标使用此前一周的 PPP 定位结果;精密轨道和 ERP 数据均使用 IGU 预报产品.数据处理过程中,误差改正有:相对论效应、相位缠绕、卫星和接收机的相位中心偏差及其变化、固体潮、海洋潮

汐、极移和章动[15]. 解算方式采用逐历元卡尔曼滤波,图 1 为卡尔曼滤波的递推过程[16].

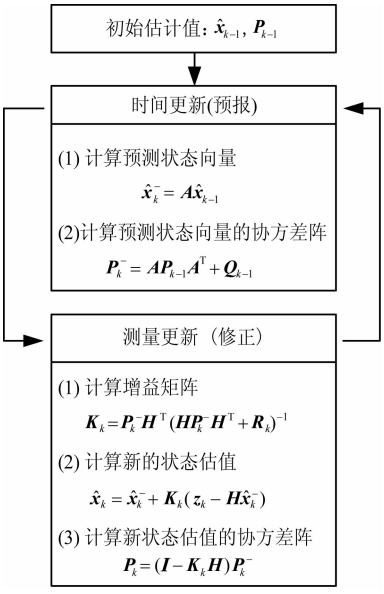


图 1　卡尔曼滤波计算流程图[16]

Fig. 1　Calculation flow chart of Kalman filter[16]

需要估计的未知参数有:卫星时钟参数(钟差 dt 和钟漂 $d\dot{t}$),接收机钟差(dT),天顶对流层延迟(ZTD)及其水平梯度(G_N,G_E),相位组合观测值的浮点模糊度 N'. 相位观测值的观测噪声设为 0.01 m,滤波状态向量的估计方法、先验标准差和过程噪声的设置见表 1.

表 1　先验标准差/过程噪声设置

Table 1　Settings for a priori standard deviation and process noise

估计参数	先验标准差	过程噪声	估计策略
GPS 卫星钟差(m)	10	0.1	白噪声
GPS 卫星钟漂(m/s)	10^{-2}	10^{-5}	白噪声
接收机钟差(m)	10	0.1	白噪声
对流层延迟(m)	0.5	10^{-5}	随机游走
水平梯度(m)	10^{-3}	10^{-5}	随机游走
相位模糊度(m)	0.1	10^{-5}	—

3　实时 ZTD 及其精度分析

图 2 给出了基于 CORS 网和 PPP 技术获取实时 ZTD 的流程图. 首先,通过 CORS 参考站网的观测数据和 IGU 预报轨道实时估计卫星钟差[17];再基于实时估计钟差和 IGU 预报轨道对 CORS 网内及其附近的 GPS 测站进行实时 PPP 解算,得到实时 ZTD 序列;最后对 ZTD 序列做历元间差分,以 ZTD 变化及其增量大小为依据来监测大气中的水汽变化,可进一步用于暴雨短临预报、人工干涉降雨和改进 NWP 模型等.

为了验证基于实时估计钟差(30 s)获得的 ZTD 精度(PPP-ZTD),实验处理了 2010 年 5 月 19 日香港 CORS 网 5 个参考站的数据,并将 PPP-ZTD 与网解得到的 ZTD(NET-ZTD)进行了比较. 表 2 给出了它们之间的平均偏差及其 RMS.

表 2　PPP-ZTD 和 NET-ZTD 之间的平均偏差及其 RMS

Table 2　Biases and their RMS between PPP-ZTD and NET-ZTD

测站	平均偏差(mm)	RMS (mm)
HKFN	3.5	4.1
HKNP	0.1	4.5
HKMW	−0.5	1.2
HKOH	1.4	4.8
HKSC	−1.3	2.9
平均	1.4	3.5

从表 2 中可以看出,各站对应的 PPP-ZTD 与 NET-ZTD 之间的平均偏差均优于 4 mm(平均 1.4 mm),其 RMS 优于 5 mm(平均 3.5 mm). 可见,基于实时估计钟差与网解计算的 ZTD 精度相当. 限于篇幅,图 3 仅比较了 HKFN 站基于 IGU 预报钟差、实时估计钟差和网解计算的ZTD结果. 从中可知,PPP-

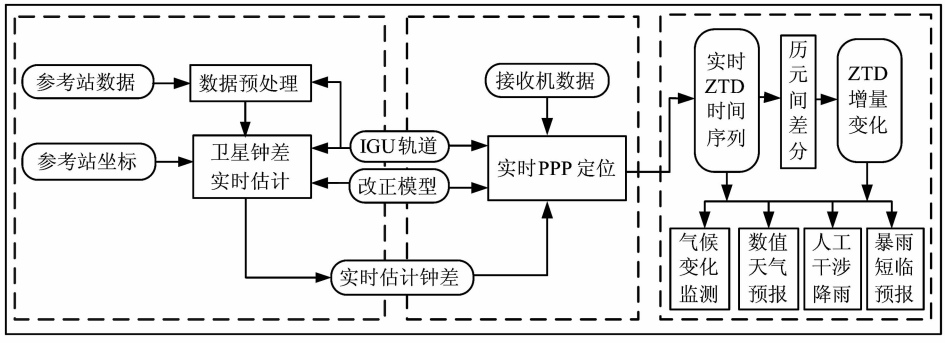


图 2　实时 ZTD 计算流程图

Fig. 2　Flow chart of real-time ZTD estimation

ZTD与NET-ZTD吻合得很好,而IGU-ZTD却与NET-ZTD结果有较为严重的偏差.也进一步反映出实时估计钟差与IGS最终精密钟差精度相当,而IGU预报钟差的精度较差,不能满足实时ZTD的精度要求.

4 ZTD用于香港地区的暴雨短临预报

短临预报是指未来0～3 h的天气预报.在暴雨来临之前数小时,必然伴随着水汽的急剧增加,这时可以认为大部分的ZTD变化是由湿延迟或水汽变化所引起的.因此,可以用ZTD代替湿延迟进行水汽变化分析并用于暴雨短临预报.使用ZTD代替湿延迟的另外一个好处是可以避免气象设备的观测误差、气象观测值的时空内插误差和ZTD与湿延迟之间的转换误差等几项误差所造成的精度损失.

香港地政署和香港海事处建立的卫星定位参考站网共有12个连续运行GPS参考站(见图4,http://www.geodetic.gov.hk/smo/gsi/programs/en/GSS/satref/satref.htm),站间距离为7～27 km,数据采样率5 s,同时采集测站的GPS观测数据和气象观测数据.香港天文台和香港理工大学利用该参考站网的资源,建立了香港地区的水汽含量实时监测系统[12].

本文针对2010年5月的两次雷暴天气和7月的一次热带气旋,基于实时PPP技术计算暴雨发生过程中的ZTD时间序列,并研究分析暴雨来临之前它们各自的ZTD及其增量的变化特点和规律.ZTD增量(mm/5 min)是指某历元的ZTD减去前一历元的ZTD,可反映出ZTD增加或降低的急剧变化程度.

4.1 雷暴天气过程的ZTD时间序列分析

2010年5月19日和30日,香港地区分别在昂船洲(HKSC)和黄石(HKWS)附近发生了较大的突发性雷暴天气.本文从相关网站分别下载了两处测站在暴雨发生前后连续3天和4天的GPS观测数据,基于香港卫星定位参考站网实时估计的卫星钟差和IGU轨道进行实时PPP解算,获得暴雨发生前后的ZTD.同时也从香港天文台获取了昂船洲和黄石附近雨量站(天文台和北潭凹)的相关降雨量记录.

图5所示为昂船洲附近的一次暴雨过程(2010-05-18—2010-05-20),从中可以看出,从18日开始,ZTD便开始增加,直到19日凌晨2时达到峰值,并且直到当日12时始终维持一个较高的水平,之后,ZTD便开始降低,13时更是发生突降,ZTD增量显示有三个历元的值连续超过了－5 mm,2 h后开始突降暴雨,雨量记录表明15—16时的1 h降雨量超过了20 mm,之后的雨量逐渐减小,时断时续.但是,ZTD约于21时又突然增加,并且ZTD增量超过了5 mm,ZTD随后开始缓慢降低,至20日0时又一次发生突降,ZTD增量连续四次超过了－5 mm,约4 h后,当日4—5时天文台记录到超过10 mm的降雨量.

图6所示为黄石(HKWS)发生的一次暴雨过程(2010-05-28—2010-05-31).从中可以看出,ZTD从28日开始增加,直到29日凌晨5时第一次达到峰值,但随后却发生缓慢下降,直到上午11—12时,ZTD发生了突增和突降,ZTD增量表明分别有四次突破5 mm和三次突破－5 mm.约6 h后,当日18—21时,HKWS附近的北潭凹雨量站记录到超过15 mm的3小时降雨量.但之后的ZTD并未降低,而是持续增长,直到30日凌晨6时第二次达到峰值,随后至上午10时,ZTD开始缓慢降低,期间发生数次突增突降.ZTD增量表明,30日6—10时各有三次突破5 mm和三次突破－5 mm.10时后,ZTD持续降低,12时当地开始普降大雨,15时左右开始骤增至暴雨,雨量记录表明15—16时的降雨量超过了50 mm,并持续到下午17时左右才基本结束.16时后的雨量有所减小,但降雨直到18时才完全停止.随后直至31日凌晨,ZTD进一步降低,恢复到了28日的水平,当日再无降雨发生.

就这两次暴雨的ZTD时间序列而言,暴雨发生之前的24 h甚至更早,ZTD便开始持续增强,直至达到某个峰值维持一段时间,之后ZTD值便开始减弱,接下来数小时内便有程度不同的强降雨发生.对ZTD增量的分析表明,在暴雨发生之前的2～6 h,随着ZTD的突增和突降,必然有数次ZTD增量突破±5 mm,即ZTD增量突破±5 mm/5 min的地方比降水出现提前约2～6 h.在ZTD及其增量的振荡下降之后,降雨量会逐渐变小或暂停,直到ZTD再次上升到下一个相对的峰值点.此外,ZTD达到峰值后维持在较高水平的时间长短与随后的降雨量大小有很好的对应关系.

暴雨峰值与ZTD及其增量峰值的出现存在一定的滞后时间,一种解释是GPS信号对液态水不比对水汽那么敏感,ZTD的突然降低表明大气中的水汽正在相变为液态水或冰;另外一种可能的解释是

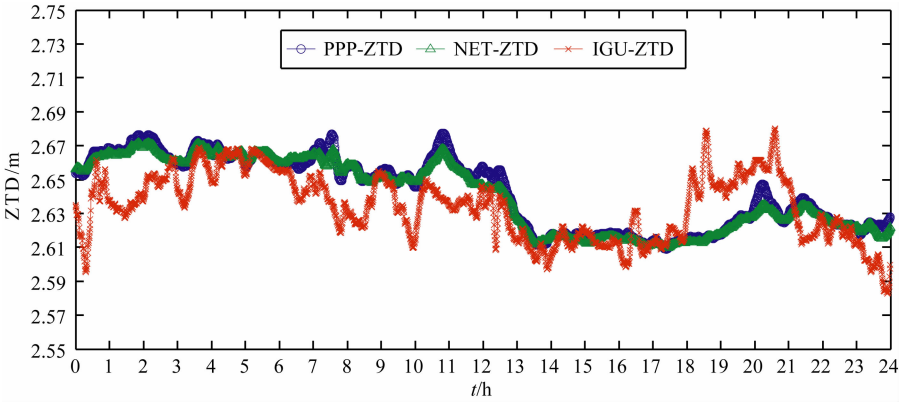


图 3　基于不同方法的 ZTD 比较

Fig. 3　Comparison of ZTD based on different methods

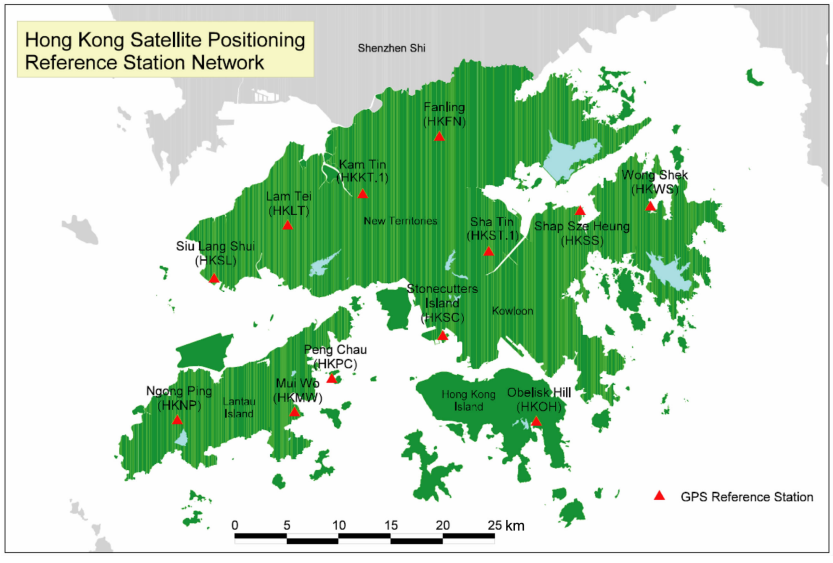


图 4　香港卫星定位参考站分布图

Fig. 4　Distribution map of Hong Kong satellite positioning reference stations

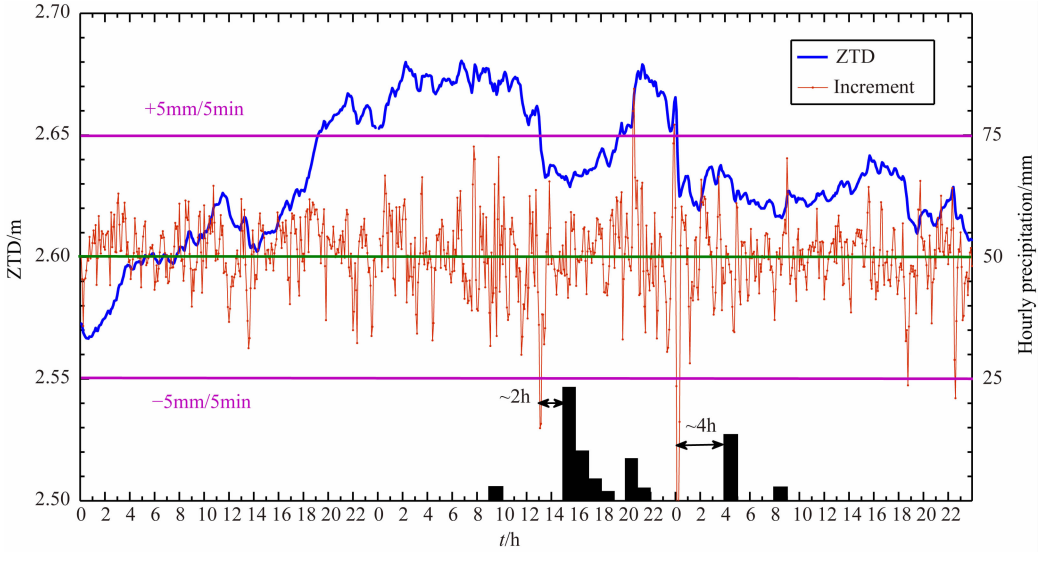


图 5　HKSC 的 ZTD 及其增量和降雨量(2010-05-18—2010-05-20)

Fig. 5　ZTD, increment of ZTD and precipitation at HKSC station (2010-05-18—2010-05-20)

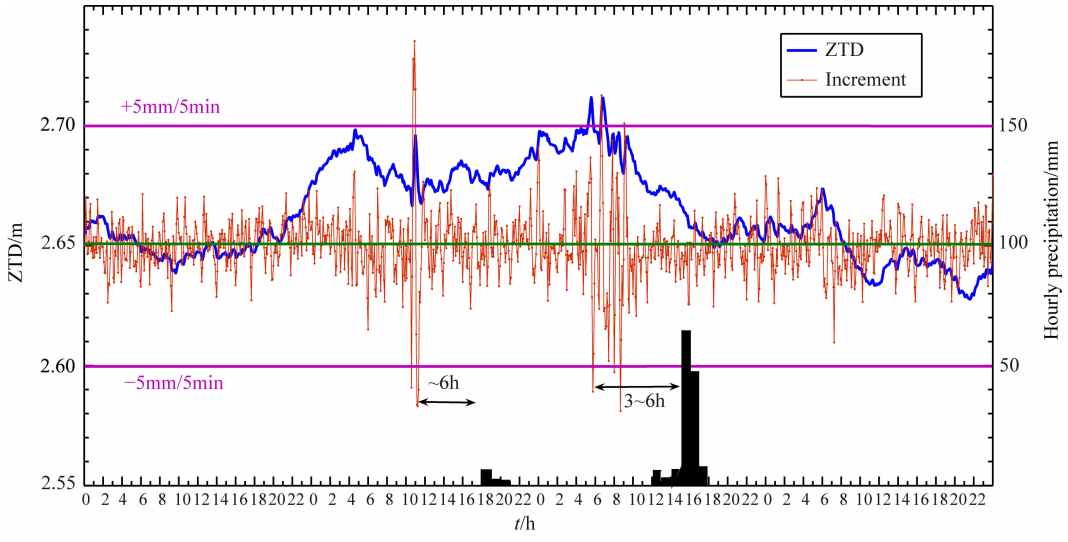
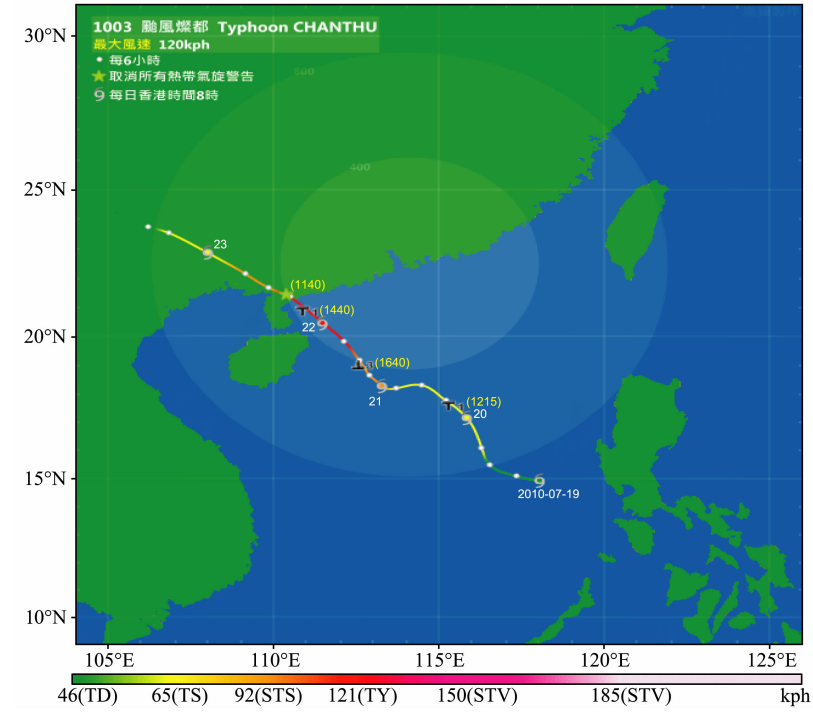


图 6 HKWS 的 ZTD 及其增量和降雨量(2010-05-28—2010-05-31)

Fig. 6 ZTD, increment of ZTD and precipitation at HKWS station (2010-05-28—2010-05-31)



TD,热带低气压;TS,热带风暴;STS,强热带风暴;TY,台风;STY,强台风;STY,超强台风.

图 7 “灿都”发展路径图

Fig. 7 Track of tropical cyclone CHANTHU

强对流天气中雨点从空中开始降落,落在地面需要一定的时间. 这类滞后时间,正为我们进行暴雨的短临预报提供了可能. 另外一个关于 ZTD 增量的现象是,ZTD 增量的突增几乎必然伴随着随后的突降,可以作为暴雨短临预报的一个指示性标志.

4.2 热带气旋的 ZTD 时间序列分析

热带气旋“灿都”于 7 月 19 日晚间在南海北部形成热带风暴,20 日向西北方向移动,21 日增强为强烈热带风暴. 随着“灿都”逐渐增强和靠近,香港 21 日有狂风骤雨和雷暴,24 h 降雨量普遍超过 20 mm. “灿都”于 22 日凌晨进一步增强为台风,5 时左右最接近香港,之后逐渐远离香港. “灿都”的强度在 22 日中午达到巅峰,当日 13 时 45 分在广东省吴川市沿海登陆,此后因地形摩擦及缺乏水汽而逐渐减弱消散,香港天文台于 14 时 40 分取消了所有热带气旋警告信号. 但是,在“灿都”登陆之后,大约于 22 日

15 时左右,受到其外围雨带影响,香港开始突降特大暴雨,天文台于当日 16 时 35 分、17 时 20 分和 30 分先后发出黄色、红色和黑色暴雨警告. 直至 19 时,影响香港的雨带向东北方向移动,大部分地区的雨势才减弱,天文台于 19 时 50 分改发黄色暴雨警告信号,21 时取消所有暴雨警告信号. 这次暴雨急剧增强及减弱,使天文台在短短 1 h 内把所有香港暴雨警告信号全部发出并再创红色暴雨警告信号最短生效时间记录(10 min). "灿都"于 23 日减弱为热带风暴,当日下午进一步减弱为热带低气压,最终于 24 日凌晨减弱为低压区(见图 7,http://david.sam-siu.com/weather/2010/review/review201004w.html).

图 8 所示为"灿都"发生过程中基于昂船洲 GPS 测站计算的实时 ZTD 和附近天文台记录的降雨量(2010-07-20—2010-07-23). 从图中可以看出,ZTD 从 7 月 20 日开始逐渐增强,至 21 日凌晨 4 时第一次达到峰值,之后有所降低,但相比而言仍维持在一个比较高的程度. 就 ZTD 增量来说,21 日有数次突破±5 mm,香港全区时有狂风骤雨及雷暴,当日香港天文台录得 29.6 mm 的降雨量. 22 日 8 时许,ZTD 激增后达到峰值,随后发生急降,11 时许又一次达到峰值,随之又发生急降. 这段时间内,ZTD 增值表现的特别活跃,有数十次突破±5 mm. 约 3 h 后,16 时左右,雨势突然增强,香港天文台于 16—17 时录得超过 30 mm 的降雨量;17—18 时记录到超过 50 mm 的降雨量. 之后,雨带向香港地区的东北部方向转移,测站附近的雨势逐渐减小.

由"灿都"发生的全过程可以看出,随着热带气旋逐渐靠近香港,给香港带来的水汽越积越多,这一点从 ZTD 值的变化可以直观的反映出来. 当增加到一定程度之后,ZTD 始终维持在一个较高的水平,此后 ZTD 增量有数十次突破±5 mm,表现的过于活跃,降低了其对暴雨短临预报的指示作用. 但是,与地面雨量站的记录相对应,突破±5 mm 的次数和大小大致能反映随后地面降雨量的强度. 当突破次数较少时,随后的降雨量也较小;当突破次数较大时,随后的降雨量也较大,持续时间也较长.

与一般的雷暴天气相比,热带气旋造成当地 GPS 测站的 ZTD 及其增量的变化更为剧烈,持续时间更长,这也反映出热带气旋在强风的影响之下,大气中的水汽变化剧烈的特点. 另外一个不同于一般雷暴天气的特点是,在热带气旋及其带来的强降雨结束之后,ZTD 仍然维持在一个很高的水平,说明热带气旋给其所经过的地方带来了充沛的水汽量,几次强降雨不足以使其迅速下降.

5　结　论

文章提出了一种基于 CORS 网和实时 PPP 技术获取高精度 ZTD 时间序列并将其用于暴雨短临预报的新方法. 该方法与已经构建的实时水汽监测系统相比,无需引入超远的 IGS(International GNSS Service)参考站参与解算,使用 CORS 网观测数据和IGU预报轨道便可以得到GPS测站绝对

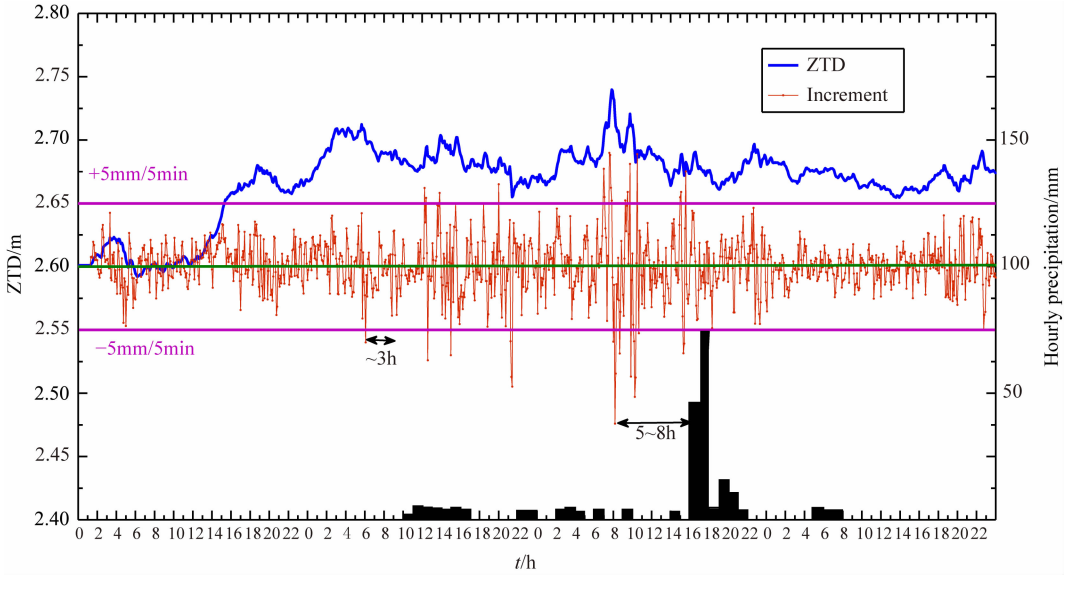


图 8　香港天文台的 ZTD 及其增量和雨量记录(2010-07-20—2010-07-23)

Fig. 8　ZTD, increment of ZTD and precipitation at HKO station (2010-07-20—2010-07-23)

的实时 ZTD 时间序列,降低数据传输难度和解算时间,提高实时性.实验表明:在雷暴天气过程中,ZTD 时间序列会先达到某个峰值,并维持一段时间,然后发生程度不同的降低.该过程中的 ZTD 增量表现为先后突破±5 mm,比记录到地面降水提前 2～6 h,且 ZTD 维持在高水平状态的时间长短与后续降水量的大小有较好的对应关系.与一般的雷暴天气相比,热带气旋所带来的水汽含量更加充沛,持续时间更长,但在强风的作用之下,ZTD 增量变化过于活跃,降低了其对暴雨短临预报的指示作用,但 ZTD 增量突破±5 mm 的次数与后续的降雨量大小之间有较好的对应关系.总之,高频率实时 ZTD 及其增量变化对一般雷暴天气和热带气旋暴雨的短临预报均有一定的参考价值和预示作用,可以为目前的短临预报系统提供有用的辅助参考信息,增加暴雨短临预报特别是转折性天气预报的能力,并为研究水汽输送过程和有效开发利用空中水资源提供帮助.

参考文献(References)

[1] Chiang K W, Peng W C, Yeh Y H, et al. Study of alternative GPS network meteorological sensors in taiwan: Case studies of the plum rains and typhoon sinlaku. *Sensors*, 2009, 9(6): 5001-5021.

[2] 丁金才. GPS 气象学及其应用. 北京:气象出版社, 2009.
Ding J C. GPS Meteorology and Its Application (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 2009.

[3] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97(D14): 15787-15801.

[4] Rocken C, Hove T V, Johnson J, et al. GPS/STORM-GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1995, 12(3): 468-478.

[5] Bar-Sever Y E, Kroger P M, Borjesson J A. Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(B3): 5019-5035.

[6] Flores A, Escudero A, Sedo M J, et al. A near real time system for tropospheric monitoring using igs hourly data. *Earth Planets Space*, 2000, 52(10): 681-684.

[7] Gendt G, Dick G, Reigber C, et al. Demonstration of NRT GPS water vapor monitoring for numerical weather prediction in Germany. International Workshop on GPS Meteorology, 2003.

[8] Shoji Y. A study of near real-time water vapor analysis using a nationwide dense GPS network of Japan. *J. Meteorol. Soc. Jpn*, 2009, 87(1): 1-18.

[9] Hauschild A, Montenbruck O. Kalman-filter-based GPS clock estimation for near real-time positioning. *GPS Solut.*, 2009, 13(3): 173-182.

[10] 张小红, 李星星, 郭斐等. 基于服务系统的实时精密单点定位技术及应用研究. 地球物理学报, 2010, 53(6): 1308-1314.
Zhang X H, Li X X, Guo F, et al. Server-based real-time precise point positioning and its application. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(6): 1308-1314.

[11] 李浩军, 王解先, 陈俊平等. 基于 GNSS 网络的实时精密单点定位及精度分析. 地球物理学报, 2010, 53(6): 1302-1307.
Li H J, Wang J X, Chen J P, et al. The realization and analysis of GNSS network based real-time precise point positioning. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(6): 1302-1307.

[12] 陈永奇, 刘焱雄, 王晓亚等. 香港实时 GPS 水汽监测系统的若干关键技术. 测绘学报, 2007, 36(1): 9-12.
Chen Y Q, Liu Y X, Wang X Y, et al. GPS real-time estimation of precipitable water vapor-Hong Kong experiences. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica* (in Chinese), 2007, 36(1): 9-12.

[13] Zumberge 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. Geophys. Res.*, 1997, 102(B3): 5005-5017.

[14] Kouba J, Héroux P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products. *GPS Solut.*, 2001, 5(2): 12-28.

[15] Kouba J. A guide to using international GNSS service (IGS) products [online]. 2009: Geodetic Survey Division, Natural Resources Canada. May 2009. Avail at http://acc.igs.org/UsingIGSProductsVer21.pdf. Accessed 11 May 2010.

[16] Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *J. Basic. Eng.*, 1960, 82(1): 35-45.

[17] 李黎, 匡翠林, 朱建军等. 基于 IGU 预报轨道实时估计精密卫星钟差. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(2): 111-116.
Li L, Kuang C L, Zhu J J, et al. Real-time estimation of precise satellites clock bias based on IGU predicted orbit. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2011, 31(2): 111-116.

(本文编辑 何 燕)