

陈玉宝,安涛,胡姮,等. 2013. 基于 GNSS 差分定位的天气雷达坐标精确定位研究. 气象, 39(3): 389-393.

基于 GNSS 差分定位的天气雷达 坐标精确定位研究^{*}

陈玉宝^{1,2} 安涛² 胡姮² 李建勇³ 高玉春²

1 南京信息工程大学, 南京 210044

2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

3 广东省大气探测技术中心, 广州 510080

提 要: 天气雷达天线馈源的精确定位关系到雷达数据的精确使用和天气雷达全网拼图的使用效果。目前, 国内新一代天气雷达天线馈源坐标基本都是使用 GNSS(Global Navigation Satellite System)系统中的美国 GPS(Global Position System)系统接收机, 在雷达塔楼楼顶单点瞬时定位测量得到的, 误差一般大于 30 m。为了提高定位精度, 将 GPS 精确定位技术与全站仪测量相对高度结合起来, 提出了一种测量天气雷达的馈源坐标的方法, 可使天线馈源的海拔高度测量精度达到 10 m 以内。使用这种方法对北京市气象局 S 波段新一代天气雷达天线馈源坐标进行了实地测量, 精度达到设计要求。

关键词: 天线馈源, 全球定位系统(GPS), 定位, 全站仪

中图分类号: P415

文献标识码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2013. 03. 015

Study of the Precise Positioning of Weather Radar Coordinates Based on GNSS Technology

CHEN Yubao^{1,2} AN Tao² HU Heng² LI Jianyong³ GAO Yuchun²

1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

3 Guangdong Atmospheric Observation Technology Centre, Guangzhou 510080

Abstract: The precise using of the weather radar data and the using effect of the weather radar mosaic observation are based on the precise positioning of the radar antenna feed coordinates. At present, antenna feed coordinates of the new generation weather radar are measured basically by single point positioning method of the American GPS (Global Position System) which is one kind of the GNSS (Global Navigation Satellite System), and the measurement error is generally more than 30 m. In order to improve the positioning accuracy, a new method to measure the weather radar antenna feed coordinates is proposed in this article. The GPS precise positioning technology and total station measuring technology are combined in the method, which can improve the accuracy of measuring the altitude of the weather radar antenna feed, making the error less than 10 m. The new generation weather radar feed coordinates of the Beijing Meteorological Bureau are measured with this method, and the measurement accuracy meets the design requirements.

Key words: antenna feed, GPS (Global Position System), positioning, total station

* 中国气象局气象探测中心青年基金资助

2012 年 3 月 7 日收稿; 2012 年 8 月 14 日收修定稿

第一作者: 陈玉宝, 主要从事气象雷达和激光大气遥感方面的研究. Email: yubao_chen@yahoo. cn

引言

天气雷达是监测、预警突发灾害性天气的有效手段,雷达在短时临近预报、防汛抗旱、气象防灾减灾、重大气象保障等服务过程中发挥了极大的作用。目前,在业务运行中使用的多普勒天气雷达站点坐标使用的是普通的 GPS 接收机在雷达塔楼楼顶单点瞬时定位得到的,精度不高,误差一般大于 30 m;而且东南沿海的新一代天气雷达全年都处于工作状态,无法将 GPS 测量设备精确定位在雷达天线馈源处。从而影响了多普勒天气雷达数据的定量精细使用和全网拼图的定位精度及综合利用。

GPS 在气象探测中的应用越来越广泛(彭冲等,2012),最主要的应用是大气中水汽的探测,地基 GPS 遥感水汽测量站网(曹云昌等,2006)已经在全国建成,水汽探测数据已经广泛应用于暴雨预报和研究中(楚艳丽等,2007),GPS 的定位数据也被用于研究 L 波段雷达数字探空仪系统的测高误差(姚雯等,2009),本文使用自制的雷达天线馈源 GPS 定位仪接收的 GPS 原始数据,与地基 GPS 遥感水汽测量站网进行差分处理(马中元等,2010;赵德显等,2011),结合激光全站仪精确定位了天气雷达的馈源,使得定位精度小于 10 m。

1 天线馈源精确定位原理

研制高精度“雷达天线馈源 GPS 定位仪”,在雷达塔楼楼顶(设为 T 点)和雷达站塔楼附近某点(设为 G 点)进行定位测量并采集 GPS 原始数据,对 GPS 原始数据进行事后差分处理(如果雷达塔楼近距离范围有 GPS 水汽测量站,那么可设测量站点为 G 点),得到 T 点及 G 点的经纬度和椭球高度,后期处理中只使用 T 点的经纬度数据。

使用高精度激光全站仪,通过三角函数法,测量计算天气雷达天线馈源与 G 点的相对高度,把 GPS 定位仪测量得到的原始数据差分处理(郭志梅等,2008;曹云昌等,2005),得到的 G 点的椭球高度,与天线馈源相对定位仪的垂直高度相加,得到天气雷达天线馈源的椭球高度。

使用 GPS 全球定位系统测得的高度,是把地球近似看作一个椭球面而建立的 84 坐标系下的椭球高度,而我们需要的是以海平面为基准面的海拔高

度,本文采用的校正方式是美国 NASA 和 NIMA 的地球重力场模型:EGM96 (Earth Gravity Model 1996),根据 GPS 定位仪所在点的经纬度,通过计算得到的 EGM96 模型查找表,查找得到测点的海拔高度与椭球高度的差值,把天气雷达天线馈源的椭球高度转换为海拔高度。塔楼楼顶 T 点的经纬度就是雷达天线馈源的经纬度。

1.1 雷达天线馈源 GPS 定位仪的研制

目前,GPS 定位测量技术已经非常成熟, GPS 测量方法有单点定位和差分定位两种,其中,单点定位设备简单、价格低廉、使用方便,但精度差,不能满足项目测量精度的要求;差分定位设备价格高、精度高,能够满足测量精度的要求,但需要高精度的已知点作为基点,而新一代天气雷达大部分布设在城市的郊区,在塔楼所在的区域很难找到高精度的已知点,所以也不能满足测量的需要。

基于上述情况,项目小组确定了自行开发 GPS 接收机,购买高精度的 GPS 芯片和技术成熟的嵌入式单片机系统,使用 EVC 编程语言编写数据接收处理软件,设备名称为“雷达天线馈源 GPS 定位仪”。

雷达天线馈源 GPS 定位仪使用国产“CNS-50” GPS 接收芯片,芯片的稳定性达到了要求,可在 $-40\sim+85^{\circ}\text{C}$ 的环境内工作,启动速度快,功耗只有 1 W,经过实际的测试,单点定位精度:水平 15 m,垂直 30 m。定位仪使用自封装锂电池,连续工作时间可达 48 h。

雷达天线馈源 GPS 定位仪的使用非常简单,把电池和天线与机身连接,然后把天线头放置在要测量的位置,打开开关之后,定位仪开始工作, GPS 芯片接收到的卫星数据,经过电平转换之后,通过串口传输给 ARM 处理器,处理器首先把时间、经纬度、高度和可用卫星数等信息实时显示在显示屏上,同时把原始二进制数据和 ASCII 数据存储在存储卡上,以便进行后期差分处理。

对 GPS 定位仪测量得到的原始数据的差分处理是整个数据处理中关键的环节。中国气象局在全国各省(市、区)都布设有地基 GPS 遥感水汽测量站网, GPS 水汽测量站的原理就是利用水汽引起的 GPS 测量高程误差来探测大气中水汽含量,所以 GPS 水汽测量站在进行水汽测量计算时,首先需要利用 GPS 站网差分处理方法,得出测站在 84 坐标系下的实时测量椭球高度,并与测站的精确椭球

高度比较,求出由于大气中电离层、对流层等引起的高度误差(周义炎等,2005;蒋虎,2001;徐晓华等,2003)。故利用现有业务 GPS 水汽测量的数据处理软件,将 GPS 定位仪测得的原始数据作为一个单独的站点,与当地地基 GPS 水汽测量站网同时测得的数据一块进行事后差分处理(李建国等,1999),得到定位仪测点在 84 坐标系下的精确椭球高度值。使用差分得到的经纬度,通过校正模型 EGM96,得到 GPS 定位仪测点的椭球高度与海拔高度之间的差值,将椭球高度转换到海拔高度就得到了定位仪测点的海拔高度值。

1.2 激光全站仪测量雷达天线馈源相对高度原理

由于中国气象局的新一代天气雷达都处在业务运行状态,全年不停机,所以 GPS 接收天线不能直接放在天气雷达馈源处接收卫星数据,必须使用全站仪直接测量测量点相对于仪器所在点的垂直高度。

激光全站仪,即激光全站型电子速测仪。是一种集光、机、电为一体的高技术测量仪器,是集水平角、垂直角、距离(斜距、平距)及高差测量功能于一体的测绘仪器系统。因其一次安置仪器就可完成该测站上全部测量工作,所以称之为全站仪。本实验中使用的激光全站仪角度测量的精度是 $2''$,使用棱镜距离测量精度 5 mm。

使用全站仪在对雷达天线罩进行测量时,由于天线罩对全站仪发射的激光脉冲产生镜面发射,所以后向散射回到全站仪的信号非常弱,仪器难以分辨,所以使用三角函数法(如图 1 所示)进行间接测量,然后计算得到天线馈源相对于全站仪所在点的

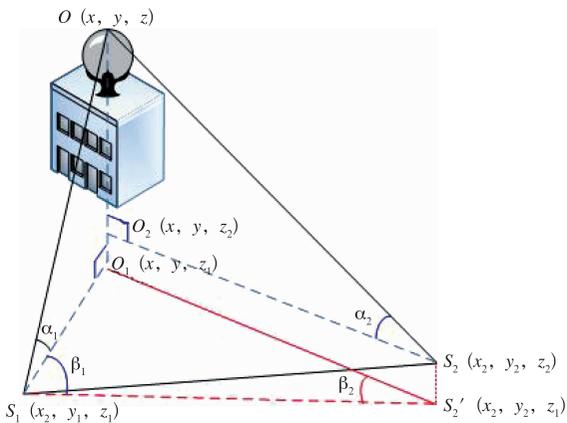


图 1 激光全站仪相对高度测量原理

Fig. 1 The relative height measurement schematic using the laser total station

垂直高度。

1.2.1 测量方法(如图 1 所示)

(1)在雷达塔楼外适当距离选择两个观测点 S_1 和 S_2 。这两个观测点之间可以通视,且都能够观测到雷达天线馈源 O 点。

(2)在 S_1 点处架设全站仪,对准雷达天线馈源部进行观测,得到仰角 α_1 ;对准点 S_2 ,进行观测得到水平距离 L (不是斜距),方位角 β_1 。

(3)在 S_2 点处架设全站仪,将雷达天线馈源作为基准方向,观测 S_1 点,得到方位角 β_2 。

1.2.2 计算雷达顶部高度

通过几何关系,解算雷达天线馈源相对高度。主要的几何关系有:

(1)在垂直三角形 $\triangle OO_1S_1$ 中

$$\tan\alpha_1 = \frac{OO_1}{O_1S_1}$$

(2)在三角形 $\triangle O_1S_1S'_2$ 中

$$\angle S_1O_1S'_2 = 180^\circ - \beta_1 - \beta_2$$

$$O_1S_1 = \frac{L\sin\beta_2}{\sin(180^\circ - \beta_1 - \beta_2)}$$

所以雷达天线馈源相对高度:

$$OO_1 = O_1S_1 \tan\alpha_1 = \frac{L\sin\beta_2}{\sin(180^\circ - \beta_1 - \beta_2)} \tan\alpha_1 \quad (1)$$

2 北京 SA 天气雷达天线馈源测量及数据处理结果

2.1 试验过程

北京新一代天气雷达位于北京市气象局南郊观象台内,在雷达塔楼西南方向的观测场内有 GPS 水汽站,我们选择北京市新一代天气雷达的天线馈源坐标作为试验测量目标,可以利用观测场内的 GPS 水汽站,对研制的雷达天线馈源 GPS 定位仪探测数据进行精度分析,检验其可用性。全部的测量点如图 2 所示。

图 2 中的测点 4 和 5 为 GPS 定位仪的天线安装位置,测点 4 在观象台办公楼楼顶,测点 5 在雷达塔楼楼顶,测点 3 是地基 GPS 遥感水汽测量站天线的位置,测点 1 和 2 是使用三角函数法(图 1)测量雷达天线馈源相对测点 1 垂直高度时,全站仪所在两个位置(与图 1 中的 S_1 和 S_2 点对应)。

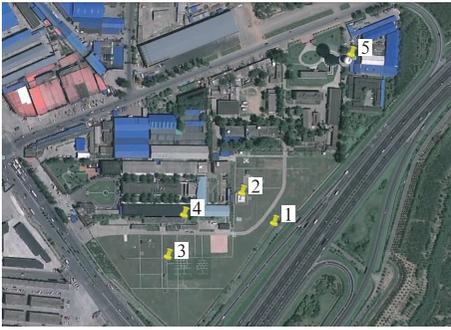


图 2 南郊观象台雷达馈源位置
测量测点图

Fig. 2 The measurement points for the
radar feed position at the Observatory
of Beijing Southern Suburb

把 GPS 定位仪安装在测点 4 进行 24 小时连续测量, 存储定位数据和原始数据, 再将 GPS 定位仪安装在测点 5 进行 24 小时连续测量, 存储定位和原始数据, 再把原始数据与 GPS 水汽测量站数据进行事后差分, 测点 5 的原始数据差分处理得到的经纬度值就是雷达馈源的经纬度位置, 取测点 4 差分得到的椭球高度值, 与全站仪测量的雷达馈源与测点 1 间的相对高度值相加, 再减去测点 4 与测点 1 间的相对高度, 就是雷达天线馈源的精确椭球高度值, 根据差分得到的测点 4 的经纬度数据, 通过校正模型 EGM96, 得到测点 4 的海拔高度和椭球高度差值, 经过转换得到雷达天线馈源的海拔高度值。

使用地基 GPS 遥感水汽站测量数据差分得到的水汽站的椭球高度, 用来与雷达天线馈源 GPS 定位仪差分得到的椭球高度数据进行对比, 验证此次试验中定位仪的测量精度。

2.2 试验结果

经过实地测量及事后计算得到以下数据:

(1) 差分得到的塔楼顶测点 5 的经纬度值:
39°48'31.4316"N, 116°28'18.3972"E;

(2) 差分得到的观象台办公楼二楼顶测点 4 的 GPS 天线椭球高度 $h_{\text{椭球}}$: 35.02 m;

(3) 测点 1 全站仪相对于测点 5 的垂直高度 h_{15} : 67.96 m;

(4) 测点 1 地面相对于测点 4 楼顶面的垂直高度 h_{14} : 7.30 m;

(5) 测点 1 处安装的 GPS 天线高度 $h_{\text{GPS 天线}}$: 0.21 m;

(6) 测点 1 地面相对于 GPS 水汽站天线(测点 3)的垂直高度 h_{13} : 3.66 m;

(7) 在测点 1 时, 全站仪的三脚架高 $h_{\text{全站仪}}$: 1.56 m;

(8) 椭球高度与海拔高度之间的差值: $h_{\text{椭海}}$: -10.05 m

则雷达天线馈源的海拔高度:

$$H_{\text{馈源海拔}} = h_{\text{椭球}} + h_{15} - h_{14} - h_{\text{GPS 天线}} + h_{\text{全站仪}} - h_{\text{椭海}}$$

使用上述数据经过运算, 得到雷达天线馈源的海拔高度是 107.08 m; 经纬度 39°48'31.4316"N, 116°28'18.3972"E。

2.3 误差分析

(1) 在雷达天线馈源 GPS 定位仪软硬件设计、制作和调试完成之后, 于 2009 年 12 月 28—29 日在基准点进行了连续 2 天的测量和原始数据采集, 对原始数据进行了事后差分, 并与基准点的经纬度和海拔高度(精度小于 0.01 m)进行了对比, 经纬度的差值最大为 1.14 m, 最小为 0.01 m, 椭球高度差值最大为 3.52 m, 最小为 2.54 m。所以 GPS 定位仪采集的原始数据经过事后差分处理, 经纬度和海拔高度的精度都小于 5 m。

(2) 使用全站仪利用三角函数法测量天线馈源相对于测点 1 的垂直高度值, 误差主要表现在角度测量和距离测量的精度, 以及测量误差在之后的计算中产生的更大的误差。

角度测量的精度是 2", 使用棱镜距离测量精度 5 mm, 根据式(1), OO_1 中引入的误差最大为 0.215 m。

(3) 测点 1 相对于测点 4 的相对高度测量引入的误差 0.005 m, 天线测量引入的误差 0.1 m。

此次在南郊观象台进行的测量, 地基 GPS 遥感水汽站测量计算得到的水汽站天线椭球高度为 31.2 m, 根据 2.2 节中(4)、(5)和(6)3 个测量值, 可以算出水汽站天线与 GPS 定位仪之间的相对高度为 3.85 m, 这样定位仪天线与水汽站天线高度数据的差值为 0.03 m, GPS 水汽站的测量高度精度小于 1 m; 再加上全站仪测量测点 1 和 3 的相对高度引入的 0.005 m 的误差, 全站仪测量测点 1 和 4 的相对高度引入的 0.005 m 的误差, 以及 GPS 定位仪天线高度测量误差 0.01 m, 最后定位仪差分后得到的椭球高度 35.02 的误差值在 1.05 m 之内。

综合上述误差分析, 此次测量引起的最大高度

误差为 1.38 m,经纬度误差小于 5 m,达到了定位精度小于 10 m 的项目要求。

3 结论

经过对 GPS 定位仪采集原始数据的处理,以及全站仪测量数据的计算,得到了南郊观象台天气雷达馈源的精确坐标值:39°48′31.4316″N,116°28′18.3972″E,海拔高度:107.08 m。

经纬度数据的测量精度在 5 m 之内,海拔高度的测量精度小于 1.38 m。测量精度达到了项目指标要求的 10 m,符合设计要求。

本文针对目前我国新一代多普勒天气雷达建设中天线馈源定位技术的需求,提出了以 GPS 定位技术与全站仪相结合的天线馈源精确定位技术,明显提高了天线馈源定位精度。该项技术容易实施、成本低、精度高,对于天气雷达精准定位、雷达资料的应用和提高天气预报服务的质量均有重要意义。

致谢:感谢中国气象局李黄研究员在项目过程中给予的指导和帮助,北京市气象局楚艳丽在数据处理方面给予的帮助,中国科学院空间科学与应用研究中心阎召爱在测绘方面给予的帮助,南京信息工程大学王振会老师对论文写作的指导和北京市气象局南郊观象台新一代天气雷达站对这次试验的支持。

参考文献

- 曹云昌,陈永奇,李柄华,等. 2005. 导航卫星信号湿延迟化模型和数值模式的比较. 全球定位系统, 5(1):1-5.
- 曹云昌,方宗义,夏青,等. 2006. 中国地基 GPS 气象应用站网建设展望. 气象, 32(11):42-47.
- 楚艳丽,郭英华,张朝林,等. 2007. 地基 GPS 水汽资料在北京“7.10”暴雨过程研究中的应用. 气象, 33(12):16-22.
- 郭志梅,李黄,缪启龙,等. 2008. GPS 探测气象参数的技术进展. 气象与环境研究, 13(2):212-224.
- 蒋虎. 2001. 空基 GPS 遥感地球大气参数方法研究. 测绘学报, 30(3):238-241.
- 李建国,毛节泰,李成才,等. 1999. 使用全球定位系统遥感水汽分布原理和中国东部地区加权“平均温度”的回归分析. 气象学报, 57(3):283-292.
- 马中元,朱春巧,王华军,等. 2010. GPS-Net 授时系统在气象业务中的应用. 气象, 36(4):132-136.
- 彭冲,张祖强. 2012. 上对流层/下平流层 GPS 掩星资料与我国探空温度对比. 气象, 38(9):1033-1041.
- 徐晓华,李征航,罗佳. 2003. 利用 GPS 掩星资料反演地球中性大气参数折射角方法研究. 武汉大学学报, 28(5):598-592.
- 姚雯,马颖. 2009. 用 GPS 定位数据研究 L 波段雷达—数字探空仪系统的测高误差. 气象, 35(2):88-93.
- 赵德显,郁红弟,沈桐立. 2011. GPS 折射率资料在梅雨锋暴雨数值模拟中的应用. 气象, 37(12):1511-1518.
- 周义炎,吴云,乔学军,等. 2005. GPS 掩星技术和电离层反演. 大地测量与地球动力学, 25(2):29-35.