

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

姚 雯 马 颖

(中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要:我国高空站网已普遍推广 L 波段雷达-数字探空仪系统,但业务上作为测风使用的 L 波段雷达设备的探测精度只经过了近距离静态目标的标定,缺乏相关的动态检验。为了解该系统的动态探测性能,作者在数字探空仪上增加了 GPS 定位模块,以获得的 GPS 高度数据作标准,分析了 2006 年 5 月至 6 月上海和南京探空站 23 份施放记录,结果表明: L 波段雷达设备由于水平标定精度不够,造成测高误差较大,100hPa 高度以下最大系统误差达到几百米,而且每个站的误差带有系统性,但利用 GPS 高度数据与雷达测得高度的对比分析结果,来修正雷达仰角参数后,大幅度提高了 L 波段雷达的测高准确度,系统误差在 100hPa 高度以下不超过 40m。因此在高空探测业务上以 GPS 定位资料作为 L 波段雷达定标的参考标准具有可行性。

关键词: L 波段雷达 测高误差 GPS 定位资料 系统误差

Comparison Analysis of Height Measurement Errors of L-band Radar-Digital Radiosonde System with GPS Data

Yao Wen Ma Ying

(Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081)

Abstract: L-band Radar and Electrical Radiosonde System (LRERS) had been employed widely, but the detection accuracy of L-band Radar was obtained only by checking short distance static objects, which lacked related dynamic test. In order to know the altimetry precision of LRERS, a new radiosonde with GPS function module was developed. In view of high precision GPS being generally acknowledged in the world, 23 electrical radiosondes with GPS function model was set free which were traced by L-band radar in Shanghai and Nanjing from the last ten days of May to the first ten days of June, 2006. It is demonstrated from the analyzed

result of 23 intercomparison data that As a wind-finding equipment, the height measuring error of L-band radar is rather big because of the less accuracy of the horizontal calibration precision, the most system deviation is several hectometers under the height of 100hPa. At the same time, it is found that the error is systematic at a given station. However, if the radar level is adjusted refer to the intercomparison result with GPS position data, the accuracy of the height measurement may be improved in much more degree, which is less than 40 meters below 100hPa height, so it is feasible to use GPS position data as Calibration reference method of L-band Radar.

Key Words: L-band radar height measurement errors GPS position data systematic error

引 言

目前业务上应用的 L 波段雷达-数字探空仪系统与服役了 40 多年的 59 型探空仪-701 雷达系统相比,其数据采集率、准确度和系统自动化程度及可靠性都有明显的改善。WMO 公布的 2004 年探空仪测量精度表明:该系统测量精度比 59 型探空仪-701 雷达系统显著提高,与 Vaisala 公司的 RS80 探空仪系统测量精度相当^[1]。中国气象事业发展战略中提出兼有 GPS 测风体制和 L 波段雷达测风体制功能的集成探空系统的策略表明,L 波段雷达-数字探空仪系统在很长时间内还将扮演十分重要的角色。

仪器的标定是大气观测中重要的一环^[2],为保证探空数据资料的准确度,需要对长期服役的气象仪器定期进行标定。雷达在长期使用后由于瞄准镜的调整螺钉松动等原因引起光轴和机械轴不平行;或由于天线的拆装、电缆电长度的变化等因素使电轴和机械轴不重合,所以需要定期进行光轴、机械轴与电轴一致性的检查和校正。传统的雷达设备标校使用近距离静态目标同步对比法,即利用 L 波段雷达和双光学经纬仪多次同步探测静态目标物(将探空仪固定于铁塔上)或在静风或微风的白天探测系留气球来检查和校正雷达的测角及测距精度,整个标校过程复杂且受人为因素影响较大,并且高空探测

业务中 L 波段雷达主要用于测风(风向、风速的计算采用相对距离),并不提供高度数据(注:该高度数据指的是由雷达测得的几何高度),因而 L 波段雷达水平标定的效果在实际业务使用中没有验证。

目前国际探空界已普遍肯定定位型 GPS 探空仪的优良性能。2005 年 2 月 7 日至 25 日,世界气象组织(WMO)在毛里求斯举行了探空系统国际对比试验,有芬兰、日本、美国、法国、德国、瑞士的厂商参加,评估 GPS 探空仪(以下简称 GPS)获得的位势高度和几何高度的有效性。通过比对结果表明,从地面至 36km 高空,参比的 GPS 探空仪测定的高度差值都在 $\pm 20\text{m}$ 以内。通过 GPS 探空仪与高质量探空仪气压传感器测高性能的对比分析,在 100hPa 高度以上 GPS 的性能都优于气压传感器,而在 100hPa 高度以下 GPS 与气压传感器性能相当^[3-6]。因此与探空仪气压反演得到的高度数据相比,GPS 高度数据的准确性、稳定性、一致性更高,更适合作为 L 波段雷达定标的参考标准。本文将探讨利用 GPS 高度数据作为高空探测业务上充当 L 波段雷达水平标定的参考标准的可行性。

1 资料来源

L 波段雷达-数字探空仪系统在试验考核过程中,曾先后与 59 型探空仪-701 雷达

系统和 Vaisala RS-80 型 GPS 探空仪进行过对比施放。但由于频率干扰、时间同步不严格、数据处理方法不相同等种种原因,取得的只是一个笼统的对比结果^[7]。为了解决这一问题,我们研制了匹配 L 波段雷达设备的定位型 GPS 探空仪。该 GPS 探空仪是在原 L 波段数字探空仪上增加了 GPS 定位模块。探空仪的无线电信号既可以用 L 波段雷达接收,也可以同时用 GPS 接收设备接收,可以确保两套接收系统能达到时间同步。由于接收信号来自同一探空仪、时间同步精确,对 GPS 以及 L 波段雷达这两套原始跟踪数据的处理计算方法可以尽可能统一一致^[8],因而可以比较客观地揭示出两个定位系统之间的本质差异。

2006 年 5 月下旬到 6 月上旬,在上海和南京探空站相继施放了 23 个带有 GPS 定位模块的 L 波段数字探空仪。本文利用 GPS 高度数据为标准,对这 23 份 L 波段雷达获得的高度数据进行分析研究,探讨 GPS 定位数据作为 L 波段雷达定标的参考标准的可行性,希望能对下一步改造升级 L 波段雷达—数字探空仪系统,促进我国探空系统的探测精度发展提供试验数据基础。

2 分析方法

在 GPS 测高、雷达测高和探空仪气压反演高度三者中,目前已公认 GPS 的测高精度最高,特别是越到高空,越到远距离时越精确。因此可以利用 GPS 测定的高度作为参照值来检验雷达测高以及探空仪气压反演高度的准确度。为了解 L 波段雷达的测高精度,本文统计了 L 波段雷达测得的高度、探空仪气压反演的高度以及 GPS 测得的高度三者之间的偏差、平均偏差和标准差,对比分析了 L 波段雷达高度资料的系统误差,再利用最佳一致逼近法实现对雷达仰角的标定。

最佳一致逼近的方法原理见公式(1)。

$$T = Z + \delta \quad (1)$$

其中: T 为 GPS 测定的高度; Z 为雷达测高公式(公式(2)); δ 为误差。

球坐标中几何高度计算公式见公式(2)^[9]。

$$Z = R(\sqrt{1 + \frac{r^2}{R^2} + \frac{2r}{R} \sin E'} - 1) \quad (2)$$

其中: R 为地球曲率半径, r 为目标物斜距, E' 为准确的目标物仰角。

$$E' = E - \epsilon \quad (3)$$

其中: E 为目标射线在目标高度的仰角, ϵ 为地面仰角零度误差。

以 GPS 测定的高度作为标准参照值,根据公式(2)将雷达测得的高度数据与之比较,修正 ϵ 值,重复利用公式(1),直到二者的偏差值趋于最小为止,此时的 ϵ 值即为仰角零度误差值。

3 L 波段雷达、探空仪气压传感器和 GPS 测高准确度比较

雷达定位精度与目标离测站距离关系很大,特别是在探空仪飞离测站较远时,雷达的测距误差明显,数据的可靠性较差。同时由于探空仪气压传感器在高空测量精度有限,由其反演的高度越到高空误差越大(100hPa 高度以上,1hPa 接近 100m;15hPa 高度以上,1hPa 相当于 600 多米),所以为了保证数据的可比性,本文重点分析 100hPa 高度以下探空仪气压反演高度、L 波段雷达和 GPS 测高准确度。

整个分析过程以各份施放记录中 GPS 测定的高度为标准,统计相应记录中雷达测得高度以及与 GPS 测得高度的差值,同时结合实际施放过程中雷达仰角的变化情况,分析其对雷达测高精度的影响。

图 1 显示的是两份上海站探空施放记录

的分析结果。其中高度差统计的是该站雷达测量的高度以及探空仪气压反演的高度与 GPS 测定高度的差值,同时图 1 中还显示了施放时雷达仰角的变化情况。可以看到,由气压反演的高度与 GPS 测定高度差值有正(如图 1a)有负(如图 1b),但趋势都是随着探测高度的升高而差值增大;雷达测量的高度与 GPS 测定的高度相比总是偏低,而且仰角越低,高度差越大,高度差起伏也越大。上海站的其它记录情况也是如此。

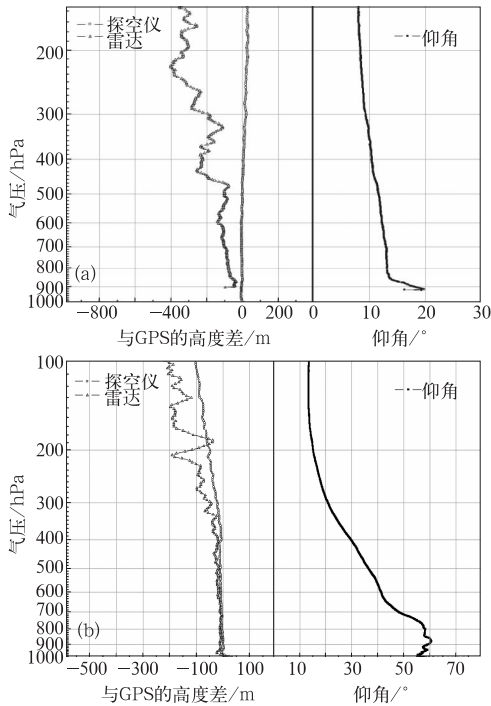


图 1 上海站雷达测定高度、探空仪气压反演高度与 GPS 测定的高度差值比较
(a) 为 2006 年 5 月 27 日 9 时施放记录
(b) 为 2006 年 5 月 23 日 13 时施放记录

图 2 显示的是南京站雷达测量的高度以及探空仪气压反演的高度与 GPS 测定高度的差值,同时图中也显示了施放时雷达仰角的变化情况,可以看到,由气压反演的高度与 GPS 测定高度差值也是有正(图 2a)有负(图 2b)并且随高度增加而差值增大,雷达探测的高度与 GPS 测定的高度相比与上海站获得的结果则相反,都是偏高。南京站的其它

记录情况也是如此。

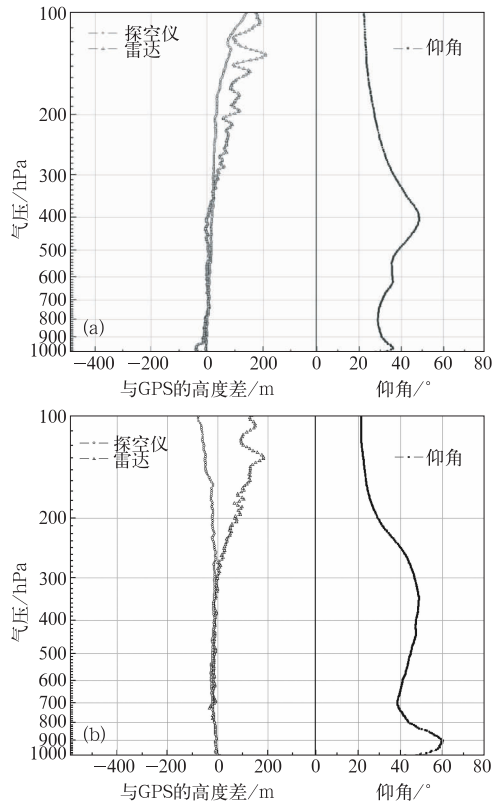


图 2 南京站雷达测定高度、探空仪气压反演高度与 GPS 测定的高度差值比较
(a) 为 2006 年 6 月 3 日 14 时施放记录
(b) 为 2006 年 6 月 2 日 14 时施放记录

图 3 是两个站多份记录统计平均的结果。以 GPS 测定的高度作为参考,上海站雷达测定的高度整体偏低很多,最大达到 235m,南京站雷达测定的高度整体偏高,最

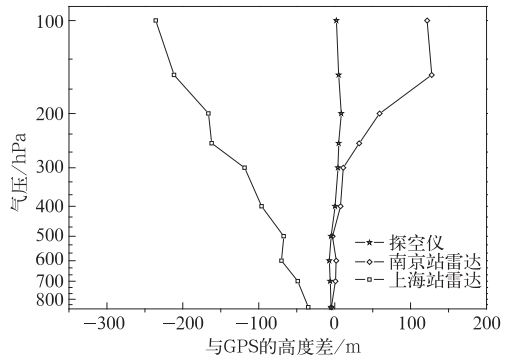


图 3 L 波段雷达测定高度、探空仪气压反演高度与 GPS 测定的高度差值比较

大达到 133m。两个站探空仪气压反演高度的平均偏差也是随着高度增加呈增大的趋势,100hPa 高度以下探空仪气压反演的高度与 GPS 高度相当,但 100hPa 高度以上,越到高空其平均偏差越大(图略)。

由图 1、图 2 及图 3 可以看出上海站与南京站的雷达的测高误差都带有系统性。上海站 L 波段雷达测高的系统误差偏负,造成雷达测得的高度总是偏低;南京站则相反,系统误差偏正,因而雷达测量的高度总是偏高。由于目前 L 波段雷达在台站是作为测风使用的,没有强调测高精度,雷达水平标定精度不高,从而导致雷达设备的系统误差比较大。

4 南京站、上海站雷达系统误差的订正

如何消除或减少系统误差对提高仪器的测量精度是很有意义的。根据上述的分析,发现雷达测高的准确度与雷达的仰角量密切相关,如果利用与 GPS 定位数据的对比资料使用最佳一致逼近法分析出雷达仰角的系统偏差,加以纠正,可以提高雷达测高的准确

度。利用公式(1,2,3)计算雷达仰角零度误差 ϵ 值,结果表明:上海站雷达的仰角系统偏低 0.15° ,南京站雷达则偏高 0.25° 。经过仰角零度误差系统订正后(此外,每份记录的测距数据也进行了零点订正),如图 4 所示,雷达测得高度的系统偏差大幅度减小,在 100hPa 高度以下不超过 40m,在 100hPa 高度以上,订正效果也十分明显,最大差值不超过 50m,具体数据见表 1。因此试验结果表明,将 GPS 定位数据用作雷达水平校准的参考标准是可行的。

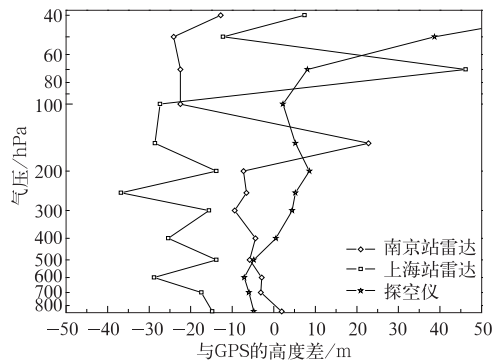


图 4 雷达经过仰角和距离零点订正后与 GPS 测定的高度的平均差值比较

表 1 订正前后 L 波段雷达测得的高度与 GPS 测定的高度的平均差值(单位:m)

标准等压面/hPa	上海站高度差(订正前)	上海站高度差(订正后)	南京站高度差(订正前)	南京站高度差(订正后)
850	-34.8	-14.8	-4.5	1.9
700	-48.5	-17.4	1.1	-2.1
600	-70	-28.8	2	-2.9
500	-67.2	-13.8	-2.9	-3.8
400	-96.3	-25.4	7.6	-4.4
300	-118.7	-15.6	11.2	-8.4
250	-162	-36.8	32.3	-6.6
200	-166.3	-13.8	59.2	-7.3
150	-211.6	-28.6	127.7	22.8
100	-235.7	-27.4	121.9	-22.5
70	-232.5	46.2	133.8	-22.5
50	-231.1	-12.2	132.4	-24.1
40	-210.8	7.4	133.6	-12.8

同时将探空仪反演的高度与 GPS 的高度差换算成气压差后发现,这批 L 波段探空仪测定的气压在低空约偏高 0.5hPa,中空略

偏低,高空明显偏低,到 20hPa 偏低达到 0.7hPa。这一结果与 L 波段探空仪在 1999 年底考核时与芬兰 GPS 探空仪的比对结果

(在低空偏高 0.9hPa, 在高空偏低 0.6hPa) 基本一致。因此考虑到 L 波段探空仪气压传感器校准线存在较大温度系数和低气压校准精度有限以及校准线存在存放漂移等实际情况, 可以在台站业务中适量施放带 GPS 定位模块的数字探空仪以监测气压传感器的动态性能, 为厂家提高气压探测精度提供可靠依据, 从而提高高空站网业务使用的 L 波段雷达-数字探空仪系统的气压测量精度。

5 结论与讨论

通过 23 份配备 GPS 定位功能模块的 L 波段雷达-数字探空仪在南京、上海不同探空站对比施放结果表明:

(1) 雷达测高误差在这两个站都带有系统性, 而且高度差变化与仰角相关, 仰角越低, 高度差越大, 高度差变化也越大。

(2) 利用与 GPS 定位数据的对比, 采用最佳一致逼近法分析出雷达水平调整的系统误差, 加以纠正, 可以提高雷达测高的准确度。经过误差订正, 雷达最大系统误差由原来的 235.7m 减少到 27.4m, 平均系统误差在 100hPa 高度以下不超过 40m, 减少了一个量级。

(3) 探空站进行雷达设备系统标校时, 可以考虑定期施放带 GPS 定位模块的探空仪获得相关数据, 通过与 GPS 定位数据对比分析即可获得相应的雷达系统误差。该方法简单易用, 并且精确度高, 能减轻台站对雷达定期维护标校的工作量。

当前高空探测业务上使用的 L 波段雷达只侧重测风功能, 不向用户提供高度数据, 雷达的定位能力没有得到充分的体现。利用本文的研究能够充分挖掘 L 波段雷达系统的潜力, 为用户提供可靠的高度资料。但仅

靠 23 份对比施放记录还不能完全代表数据的普遍性, 下一步希望通过在不同高空站点, 不同时间多次施放自行研制的配有 GPS 定位模块的 L 波段雷达-数字探空仪, 以获得更多的施放记录来进一步验证本文观点。

致谢: 本文探空资料的获取得了上海宝山探空站、南京小校场探空站的大力协助; 在本文完成过程中, 中国气象科学研究院吕伟涛博士、马明博士、杨俊博士给出了宝贵的意见和建议, 在此一并表示感谢!

参考文献

- [1] Guo Yatian, Huang Bingxun. Correction for bias of Chinese upper-air measurements[C]. WMO, Commission For Instruments and Methods of Observation, Geneva, Switzerland, 2004.
- [2] 翟盘茂. 中国历史探空资料中的一些过失误差及偏差问题[J]. 气象学报, 1997, 55(5): 563-570.
- [3] Li, F. New developments with upper-air sounding in China [J]. WMO, Instruments and Observing Methods Report No. 94, 2006, WMO/TD - No 1354, paper 2(1)
- [4] B. Pathack, J. Nash, R. Smout, et al. WMO inter-comparison of high quality radiosonde systems[R]. WMO, Instruments and Observing Methods Report, 2006, 94, WMO/TD 1354: 19(6)
- [5] 中芬高空探测对比试验技术组. 中芬高空探测对比试验结果分析报告[J]. 气象软科学(增刊), 1997: 38-49.
- [6] Reinaldo B. da Silveira, Gilberto Fisch, Luiz A. T. Machado, et al. Executive summary of the WMO inter-comparison of GPS Radiosondes[R]. WMO, Instruments and Observing Methods Report, WMO/TD. 2003, 76, 1153: 35.
- [7] 陈益玲, 刘朝晖. 两种探空系统的对比分析[J]. 山东气象, 2003, 93(3): 24-25.
- [8] 姚雯, 郑国光, 郭亚田, 等. 气象探空测风软件系统的标准化研究[J]. 应用气象学报, 2004, 15(1): 88-94.
- [9] 中国气象局监测网络司. 常规高空气象探测规范[S]. 2002, 21-22.