

UHV 输电线路对中波导航台无线电信号的干扰

刘兴发¹, 张小武¹, 张广洲¹, 邬雄¹, 万保权¹, 尹晖²

(1. 国网电力科学研究院, 湖北省 武汉市 430074; 2. 武汉大学 测绘学院, 湖北省 武汉市 430072)

UHV Transmission Line-Caused Radio Interference in Non-Directional Beacon

LIU Xing-fa¹, ZHANG Xiao-wu¹, ZHANG Guang-zhou¹, WU Xiong¹, WAN Bao-quan¹, YIN Hui²

(1. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, Hubei Province, China;

2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

ABSTRACT: To analyze the 1 000 kV transmission line-caused radio interference in non-directional beacon, the flight test was carried out in UHVAC base of State Grid Co. The consecutive collection of flight data under the condition that the helicopter passed through UHV transmission line was implemented by airborne global positioning system (GPS) and ground-based GPS; the helicopter's track is determined by precise point positioning technique and compared with theoretical flight path. Test results show that there is no distinct regularity between radio interference from UHV transmission line and the flight height of helicopter and there is also no distinct regularity between radio interference from UHV transmission line and the distance from the helicopter to UHV transmission line.

KEY WORDS: UHV transmission line; global positioning system(GPS); radio interference; precise point positioning technology

摘要: 为分析 1 000 kV 特高压输电线路对中波航空导航台的无线电干扰情况,在国家电网特高压交流试验基地进行了飞行试验。利用机载全球卫星定位导航系统(global positioning system, GPS)和地面 GPS 连续采集直升机穿越特高压线路的飞行数据,采用精密单点定位技术确定飞机航迹,并与理论航迹进行比较。试验结果表明:1 000 kV 特高压线路对中波航空导航台无线电的干扰与飞机距离特高压线路的远近和飞机飞行高度没有明显关系。

关键词: 特高压输电线路; 全球卫星定位导航系统; 无线电干扰; 精密单点定位技术

0 引言

高压输电线路对邻近的中波航空导航台^[1]可能存在无线电干扰^[2-4],文献[1]对 500 kV 及以下电压等级输电线路与中波导航台的防护距离作了规定,1 000 kV 输电线路^[5]具有铁塔高、线路走廊宽等特点,其对中波航空导航台的影响与 500 kV 输电线路对中波航空导航台的影响有所不同。目前可通过飞

行试验^[6]评价输电线路对航空无线电导航台的影响,通常采用机载无线电罗盘记录仪分析输电线路对导航台的干扰,但这种方式容易受气象、地形等因素影响,不能全面分析干扰程度。全球卫星定位导航系统(global positioning system, GPS)^[7]的出现给定位技术带来了前所未有的技术革新,本文利用国家电网特高压交流试验基地进行的飞行试验,通过机载 GPS 和精密单点定位技术^[8-9]分析 1 000 kV 特高压输电线路对航空导航系统可能产生的干扰。

1 无线电干扰及 GPS 定位

1.1 无线电干扰

中波航空导航台由中波导航台和机载无线电罗盘^[10]组成。中波导航台为发射垂直极化波的无方向性发射台,其工作频率为 150~700 kHz,该频段是国家无线电管理部门划分给无线电导航业务和航空无线电导航业务的频段。机载无线电罗盘接收中波导航台发射的信号,测定飞机与中波导航台的相对方位角,引导飞机沿预定航线飞行、归航及进场着陆。1 000 kV 特高压输电线路电晕放电^[11]形成的无线电干扰对中波航空导航台的影响由无线电罗盘所处位置的信号场强和干扰场强的比值决定,而这个比值取决于中波导航台、特高压输电线路和飞机之间的相对位置。同时由于特高压输电线路为大型金属障碍物^[12],其对邻近的中波导航台发射的信号会产生一定程度的屏蔽^[13]与散射^[14-15],可能会影响机载无线电罗盘的精确定位,该影响取决于导线和杆塔的高度、外形以及其与中波导航台的距离等因素。

1.2 GPS 定位

目前通过常用的普通单点定位技术^[16]、差分

GPS 定位技术^[17]等可获取常规的地球空间位置信息。由于空中飞行器飞行速度快,受距离限制难以保证差分 GPS 信号实时反馈到机载 GPS。GPS 精密单点定位技术集成了普通单点定位和差分定位的优点,本文将采用 GPS 精密单点定位技术处理飞行试验中的 GPS 数据。

GPS 精密单点定位采用单台双频 GPS 接收机,利用国际 GPS 服务提供的精密星历、卫星钟差及载波相位观测值进行高精度定位。电离层延迟误差通过双频信号组合进行消除,对流层延迟误差则可通过引入未知参数进行估计。

$$l_p = \rho + c(dt_r - dT^i) + Mz_{pd} + \varepsilon_p$$

$$l_\phi = \rho + c(dt_r - dT^i) + a^i + Mz_{pd} + \varepsilon_\phi$$

式中: l_p 为无电离层伪距组合观测值; l_ϕ 为无电离层载波相位组合观测值(等效距离); ρ 为观测站与 New Roman 卫星间的几何距离; c 为光速; dt_r 为 New Roman 接收机钟差; dT^i 为 New Roman 卫星 i 的钟差; a^i 为无电离层组合模糊度(等效距离,不具有整数特性); M 为投影函数; z_{pd} 为天顶方向对流层延迟距离; ε_p 和 ε_ϕ 分别为 2 种组合观测值的多路径误差和观测噪声。

精密单点定位步骤包括:预处理观测数据;精密星历和精密卫星钟差拟合轨道多项式(精密单点定位中要求卫星轨道精度需达到 cm 级水平,卫星钟差改正精度需达到亚 ns 级水平);修正各项误差及估计参数等。

根据 GPS 采集的观测数据,通过精密单点定位技术确定飞机的实际飞行航迹,并与理论上的直线飞行航迹比较,实际飞行航迹与预定线路偏离值的绝对平均值以及对应的偏离角即可表征无线电罗盘的定向误差,该误差可反应特高压输电线路对中波航空导航台的无线电干扰程度。

2 飞行试验

飞行试验用直升机安装了 GPS,并配备机载无线电罗盘,飞行时将无线电罗盘工作频率调到中波导航台发射频率,飞行试验按照《航空无线电导航台站飞行检验规程》执行,试验布置如图 1 所示。

机载 GPS 直升机利用特高压基地附近的中波导航台作为测试电台,确定以荷苞湖、北超、浠水、龙口 4 个导航台为目标的航线,飞机以 200、300m 飞行高度从距特高压基地 5km 以外某处飞向各导航台,飞行过程中保持机载无线电罗盘指针指

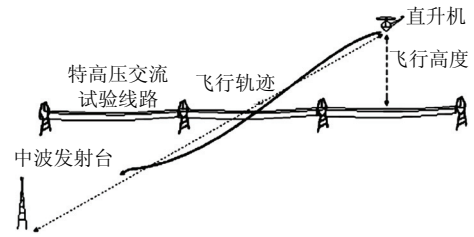


图 1 飞行试验布置

Fig. 1 Arrangement of flight test

向 0,以保证飞机始终飞往导航台方向(由于特高压输电线路影响,机载无线电罗盘可能产生一定的定向误差),并飞越特高压基地。

飞行路线如图 2 所示,飞机针对每个导航台按照约 200、300 m 的飞行高度反复飞行 2 次,导航台参数包括 2 部分:导航台与特高压线路间距离、导航台方位角。如在飞行高度为 200m 时的荷苞湖导航台飞行航线中,飞机从离线路 5 km 的 1 处越过线路,再飞离线路 5 km 到达 2 处。其余导航台也按照类似路线飞行。

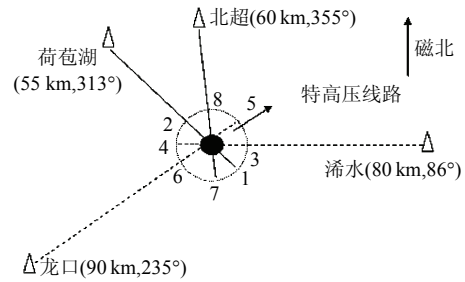


图 2 飞行路线

Fig. 2 Flight route

飞行试验中应用了 2 台高精度 Leica 1230 双频 GPS 接收机、1 个 AX1202 型接收机天线和 1 个双频 Novatel 航空天线,通过机载高精度 GPS 采集直升机的飞行航迹数据。1 台 GPS 接收机和 AX1202 型接收机天线通过专用测量三脚架安置于楼顶,并作为备用的 GPS 动态测量基准站,如图 3 所示。该基准站的作用为: 1) 可以精确测定基地的精确



图 3 GPS 动态测量基准站

Fig. 3 Reference station of dynamic measurement for GPS

坐标; 2) 可作为后处理差分动态定位的基准站, 为后续试验数据的处理和分析提供参考, 以确保飞行试验定位结果的可靠性。另外 1 台 GPS 接收机安置在直升飞机舱内, 与预先绑定在直升机机身尾部上方的双频 Novatel 航空天线相连接, 以确保卫星信号的接收。

3 试验结果分析

按照飞行试验方案, 分析 GPS 记录数据, 共得到 26 条航迹, 并与理想航迹(没有特高压输电线路无线电干扰情况下的航迹)比较得到无线电罗盘的定向误差。26 条航迹具有相同规律, 本节将以飞往荷苞湖导航台方向的航迹为例进行说明。

根据曲线拟合结果, 荷苞湖导航台航线中, 5 条飞行高度约 200 m 的航迹和 2 条飞行高度约 300 m 的航迹如图 4 所示。将图 4(a) 航迹与理想航迹求差值, 并取 5 次差值绝对值的平均值, 可得飞行高度为 200 m 时航迹与预定航迹偏离值的绝对平均值 L_1 , 如图 5 所示。同理, 由图 4(b) 可得飞行高度为 300 m 时航迹与预定航迹偏离值的绝对平均值 L_2 , 如图 6 所示。图 4~6 中飞近线路时飞机离线路距离取正值, 飞离线路时飞机离线路距离取负值。

一般认为飞机在特高压线路上空时无线电信号畸变最大, 但图 5 和图 6 表明飞机在越过特高压输电线路时的航迹偏离值并不是最大, 这个偏离值与飞机离线路远近没有明显关系。

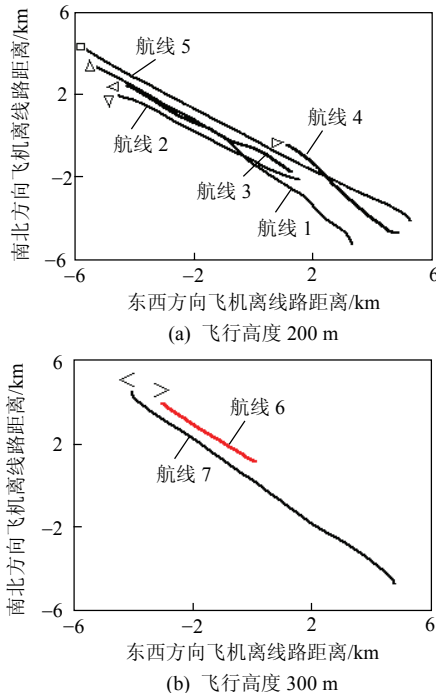


图 4 精密单点定位技术处理后的航迹
Fig. 4 Flight path by precise point positioning technique

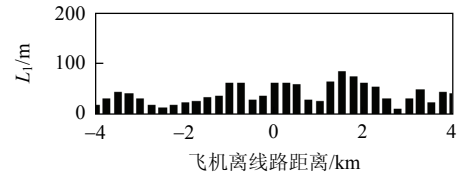


图 5 偏离值绝对平均值(飞行高度 200 m)

Fig. 5 Absolute average offset (flying at 200 m)

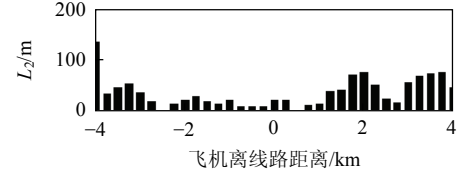


图 6 偏离值绝对平均值(飞行高度 300 m)

Fig. 6 Absolute average offset (flying at 300 m)

表 1 为荷苞湖方向飞行航迹偏离角, 偏离角均小于 1° , 满足中波导航台无线电干扰防护要求, 因此 1000 kV 特高压输电线路不会对中波航空导航台形成有效干扰。

表 1 荷苞湖方向航迹偏离角

Tab. 1 Deflection angle of Hebaohu flight path

飞机与线路的 距离/km	偏离角/(°)	
	飞行高度 200 m	飞行高度 300 m
-4.00	0.197 272	0.249 264
-3.75	0.114 227	0.509 381
-3.50	0.150 880	0.656 428
-3.25	0.181 281	0.835 087
-3.00	0.119 719	1.024 164
-2.75	0.002 965	1.019 409
-2.50	0.140 939	0.939 473
-2.25	0.193 432	0.798 338
-2.00	0.200 263	0.736 698
-1.75	0.209 830	0.801 549
-1.50	0.224 006	0.869 150
-1.25	0.192 075	0.635 823
-1.00	0.185 071	0.346 713
-0.75	0.117 213	0.009 903
-0.50	0.016 895	0.394 863
-2.50	0.174 053	0.308 351
0.00	0.274 237	0.188 033
0.25	0.262 359	0.429 660
0.50	0.352 760	0.684 257
0.75	0.377 497	0.410 424
1.00	0.333 656	0.146 361
1.25	0.274 954	0.347 371
1.50	0.173 427	0.470 505
1.75	0.082 166	0.468 108
2.00	0.010 142	0.265 409
2.25	0.048 964	0.460 375
2.50	0.031 132	0.308 244
2.75	0.172 089	0.212 968
3.00	0.241 502	0.139 461
3.25	0.133 414	0.008 827
3.50	0.000 377	0.213 154
3.75	0.074 064	0.443 864
4.00	0.270 649	0.572 654

4 结论

1) 飞行试验结果表明, 直升机机载 GPS 天线和接收机天线能够正常接收信号, 通过解算技术分

析机载 GPS 采集数据后可知,飞行航迹的定位精度误差约为 10 cm,可为监测特高压输电线路对中波航空导航台是否存在干扰以及分析干扰程度提供高精度实测数据。

2) 由航迹偏离值绝对平均值以及偏离角可知,特高压输电线路对中波航空导航台的无线电干扰与距离特高压线路的远近没有明显关系。

3) 不同高度飞行时,特高压线路对中波航空无线电导航台的无线电干扰没有明显关系。

参考文献

- [1] 国家标准局. B6364—1986 航空无线电导航台站电磁环境要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 1986.
- [2] 刘兴发, 干喆渊, 张小武, 等. 交流特高压输电线路对航空无线电导航台站的有源干扰计算[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 6-12.
Liu Xingfa, Gan Zheyuan, Zhang Xiaowu, et al. Calculation of the active interference from HV AC transmission line to aeronautical radio navigation stations[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 6-12(in Chinese).
- [3] 孙先锋. 航空无线电导航台站电磁干扰的特点及测量方法[J]. 空中交通管理, 2001, 30(2): 39-40.
Sun Xianfeng. Characteristics and measurement method of electromagnetic interference of aeronautical radio navigation station[J]. Air Traffic Management, 2001, 30(2): 39-40(in Chinese).
- [4] 肖冬萍, 何为, 谢鹏举. 高压输电线路电晕放电特性及其电磁辐射场计算[J]. 电网技术, 2007, 31(21): 52-55.
Xiao Dongping, He Wei, Xie Pengju. Study on corona discharge characteristic of high voltage transmission line and calculation of its electromagnetic radiation field[J]. Power System Technology, 2007, 31(21): 52-55(in Chinese).
- [5] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2006: 5-8.
- [6] International Civil Aviation Organization. Manual on testing of radio navigation: testing of ground-based radio navigation systems[S]. Montreal: CIAO, 1998.
- [7] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005: 112-125.
- [8] 张小红, 刘经南, Rene Forsborg. 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): 19-46.
Zhang Xiaohong, Liu Jingnan, Rene Forsborg. Application of precise point positioning in airborne survey[J]. Journal of Wuhan University: Geomatics and Information Science, 2006, 31(1): 19-46(in Chinese).
- [9] 韩保民, 杨元喜. 基于 GPS 精密单点定位的低轨卫星几何法定轨[J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(1): 75-79.
Hang Baomin, Yang Yuanxi. Kinematic orbit determination of low-earth orbiters based on GPS precise point positioning technique[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007, 42(1): 75-79(in Chinese).
- [10] 中华人民共和国机械电子工业部. SJ/T 10190—1991 机载无线电罗盘性能要求和测量方法[S]. 北京: 中国机械电子出版社, 1991.
- [11] British Standards Institution. Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment-part 1[S]. London: British Standards Institution, 1994.
- [12] Kamal Sarabandi, Moonsoo Park. A radar cross-section model for power lines at millimeter-wave frequency[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(9): 2353-2360.
- [13] Central Research Institute of Electric Power Industry. Summary report on previous study programs, methods, results and practical experiences of CRIEPI research on the environmental influence related to UHV AC transmission[R]. Tokyo: Central Research Institute of Electric Power Industry, 2005.
- [14] American National Standards Institute. IEEE Std 1260—1996 IEEE guide on the prediction, measurement, and analysis of AM broadcast reradiation by power lines[S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1996.
- [15] Tureman C W, Kubina S J. Scattering from power lines with the skywire insulated from the tower[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1994, 40(2): 53-62.
- [16] 张星炜, 查勇. GPS 单点定位误差分析[J]. 南京师大学报: 自然科学版, 2006, 29(3): 122-126.
Zhang Xingwei, Zha Yong. Analysis to the error of GPS location of single site[J]. Journal of Nanjing Normal University: Natural Science, 2006, 29(3): 122-126(in Chinese).
- [17] 王军, 于洪喜. 差分 GPS 定位技术[S]. 空间电子技术, 2001(Z1): 107-110.
Wang Jun, Yu Hongxi. Differential GPS positioning technology[J]. Space Electronic Technology, 2001(Z1): 107-110(in Chinese).



刘兴发

收稿日期: 2010-04-12。

作者简介:

刘兴发(1979—), 男, 硕士, 工程师, 从事电磁环境与电磁兼容研究工作, E-mail: liuxingfa@sgepri.com;

尹晖(1962—), 女, 博士, 教授, 从事测绘教学与研究工作。

(编辑 徐梅)