

高压输电线路对无线电测向精度影响实测分析

沈建峰

(国家无线电监测中心,北京 100037)

摘要: 本文结合国内某无线电测向站附近高压输电线路建设,对其附近的无线电测向系统的测向精度进行了跟踪测量,分析、比较了高压输电线路建设前后测向误差的变化,还进行了同场地条件下不同体制测向设备的测向精度比较,验证了理论分析结论.

关键词: 无线电测向; 电磁兼容; 测向误差; 无线电干扰; 高压输电线路

中图分类号: TN973 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)06-1244-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.06.033

A Case Study on the Accuracy of Radio Direction Finding System Under the Impact of HV Transmission Line

SHEN Jian-feng

(The State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China)

Abstract: This article researches the radio interference (RI) from the tower scattering of high-voltage power transmission line (HVPTL) to radio direction finding (DF) system. The theoretical simulation is verified by numerical analysis on the measured data. Two HVPTLs nearby a DF station were constructed. From the very beginning we started series tests based on the selected sites around the station. The analyzing and comparison of the test data shows that there is impact of the HVPTL to radio DF, the accuracy of the DF with spatial spectrum estimation is better than the one with correlative interferometer, which improved 1° and 0.5° in corresponding frequency band.

Key words: direction finding; electromagnetic compatibility; radio interference; high-voltage power transmission line; numerical analysis

1 引言

高压输电线路的导线和金属铁塔对空中无线电波产生感应并再次辐射,形成相干电磁波,与原电磁波叠加,位于其附近的短波无线电测向系统受此影响,产生测向误差,称为输电线路的无源干扰.

对无源干扰传统上采用金属反射体再辐射分析^[1]方法,近年来多采用钨量法^[2]对辐射场强进行更加精确的计算,研究其对广播^[3,4]、导航^[5]等无线电发信台的影响.而无线电测向系统属于被动的收信台,需要综合利用来波场强和相位信息,因而对无源干扰更加敏感.计算无源干扰造成的测向误差需要结合干扰源性质、测向体制及其系统参数,目前没有通用算法.

国家无线电监测中心上海监测站(以下称上海监测站)附近正在建设高压输电线路,其保护间距不能满足

国标 GB 13617-92 规定.为此,我们对该站测向系统的抗干扰性能进行了理论分析和计算机仿真,并结合输电线路建设进度和抗干扰措施实施情况,制定了系统的测试方案,建立了固定的地波测试点,进行了全程的测向精度跟踪和比较测试,获得了高压输电线路对无线电测向精度影响的实测数据.

2 测向误差的理论分析

现代无线电测向体制大致分为幅度测向、相位测向和矢量测向三大类.幅度测向是历史悠久的测向方式,精度低于后两种方法,固定监测站已经较少采用;相位测向体制一般采用相关干涉仪法,通过测量天线阵元间的相位差来获取来波方向,因此对相位扰动非常敏感;矢量测向法综合利用来波的幅度和相位信息,目前就是指空间谱估计测向,是阵列信号处理理论在无线电测向

领域的应用^[6],其原理是对信号在空间各个方向的能量分布进行分析,以获得信号传播方向。

对于相关干涉仪测向和空间谱估计测向系统,来波的相位信息是最重要的测向计算依据,而无源干扰造成来波相位误差.为简化计算,我们对 2° 相位误差和没有相位误差情况下上海监测站所用相关干涉仪测向系统和空间谱估计系统的测向误差进行了计算机仿真^[7],结果如图1所示。

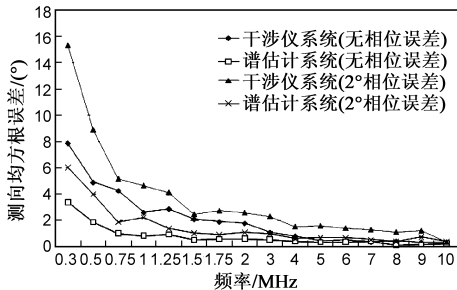


图1 测向误差的计算机仿真结果

可以看出,在 2° 相位误差情况下,系统的测向误差明显增加,在频率低端影响尤其明显.对于干涉仪测向系统,9MHz以下不能满足测向均方根误差小于 1° 的指标.而空间谱估计测向系统即使在 2° 相位误差的情况下,测向准确度1.5MHz以上也基本满足均方根误差小于 1° 的指标要求.因此,可以采用空间谱估计测向系统作为减轻高压输电线路无源干扰的措施。

需要指出,测向结果是以与真北夹角表达,由于角度测量的特殊性,没有相对误差的概念,因此,直接对测向误差的分析就是对测向精度的分析。

3 测试过程与测试方法

在上海监测站共进行了四轮次测量:第一次是在高压输电线路开工建设前,大约2009年8月;第二次是在输电线铁塔建成后,时间为2009年11月;第三次是2010年4月,输电线路基本建成,通电测试阶段.第四轮测试在2011年6月,空间谱估计测向系统建成之后。

首先在监测站接收天线场地周围,以测向天线场为中心,距离1.6km~3km范围内,选定16个测试点,并通过GPS定位,计算监测站到该测试点的真实示向度;其次,在1.6MHz~30MHz的短波频率范围内,均匀选择64个空闲频率点.实际测试时,在各测试点用无线电台发射以选定频点为载频的AM空载波,用相关干涉仪测向系统接收并测量,得到各信号源的实测示向度,再与理论示向度相减,即得到每个测试点的测向误差值.在这16个测试点共进行了三轮测试,选用测试频率完全相同,每次测试发射点距离误差不大于两米.由于修路,有两个测试点没有进行第三轮测试。

由于第四轮测试时间间隔很长,原来选定的16个点的标记已经被毁,而且测试目的与前三轮有所不同,也没有必要使用完全相同的测试点.因此,重新选定8个点,重复上述测试,即对同一个发射源信号,同时用两套测向设备进行测量,根据各自场地中心,分别计算理论示向度和测向误差。

本次实测过程中,有两条线路对监测站产生影响,两条线路的铁塔位置、塔高和档距等已经进行了优化,有关参数不在此罗列,与监测站测向天线场中心距离分别为1493m和1553m。

4 测试设备

信号源系统:

发射机型号为BARRETT 2050(宝丽2050)全能短波电台,澳大利亚宝利通信公司制造.发射信号频率范围:1.6MHz~30MHz;发射天线为垂直鞭状天线,长2.1m;智能天调,SGC公司生产,型号为SG-230 Smartuner.

发射信号为AM调制信号,发射功率大约30~40W,以接收机接收到的信号稳定,测向设备显示的示向度变化小于 0.1° 为准。

测向系统:

(1)相关干涉仪测向系统:接收频率范围:0.3MHz~30MHz,德国R&S公司生产,型号:DDF01E,9阵元交叉环有源天线阵,半径:25m,测向带宽300Hz。

(2)空间谱估计测向系统:接收频率范围:0.3MHz~30MHz,国内自主研发,20元非均匀圆形天线阵列,天线阵半径:55m,测向带宽300Hz。

5 测试数据处理

对各测试点测得测向误差进行均方根处理,结果见表1.可以看出虽然三次测量的测向误差在逐步加大,但总有测试点例外,缺乏一致性.同样如果按照频率对各个测试点测试结果进行分析,也看不出规律,由于数据比较庞大,在此不罗列.出现这种情况的原因,我们初步考虑是测试时的随机误差很大.从原始数据可以直观地看出,有大量的测向误差达到的 5° 以上,而在同一测试点,也有的频点测向误差小于 1° .由于除了频率变化这一因素外,其他所有的测试条件完全相同,这说明由于开放测试,发射点周边的环境不理想,如存在房屋、路边有农用电线等,与频率有关的传播变化或谐振等偶发因素很多,导致各频点随机误差很大.而一般测向系统的测向准确度在 1° 至 3° 之间,如果测试本身的随机误差也比较大,两者之间的比例偏小,就会造成测向误差分析异常困难。

但是,与输电线路造成的系统性测向误差相比,随

机误差是随机发生的,可以通过重复测量加以抵消,因此,通过一定的方法,一定可以找出输电线路带来的系统性误差.根据第2节分析,输电线路对测向系统的干扰存在于整个短波频段,且低频段受影响更大.如果能借助数学手段,尽可能的消除测量过程中的随机误差,同时,找出测向误差与频率的相互关系,绘制输电线路建设前后的测向误差——频率变化曲线,就可找出输电线路建设前后测向误差变化规律.

表1 各测试点平均测向误差均方根

发射点	第一次测试	第二次测试	第三次测试
1	3.2982	3.7118	2.2853
2	1.9187	1.7247	1.4519
3	1.5125	2.0113	4.0389
4	1.7364	1.8791	2.2758
5	1.0388	1.5771	1.3679
6	2.1879	2.3348	1.7937
7	1.5984	1.8158	3.1180
8	1.6723	1.9913	2.6425
9	1.3684	1.6249	1.5463
10	1.5222	1.7206	1.3898
11	1.3562	1.4914	
12	0.9700	0.9532	
13	1.1298	0.9298	0.9461
14	2.0686	1.8314	2.3531
15	1.8507	1.9727	1.8410
16	1.1379	1.2888	1.3003

注:由于修路,第三次测试时第11、12个发射点没有数据

数学上对离散数值处理,找寻数据间内在关系的方法主要有插值和逼近两种.函数逼近又称为曲线拟合,是求近似函数的一种数值方法^[8].它不要求近似函数在节点处与函数值相同,即不要求近似曲线经过已知点,只要求它尽可能反映给定数据点的基本趋势,在某种意义下与函数最“逼近”.这非常适合于原始数据不可避免含有误差的情况.所以,我们选定函数逼近来进行数据处理,通过有限的测量频点反映全频段测向误差与频率的关系,发现数据变化的基本趋势,消除随机误差带来的不利影响.

我们选用最小二乘法作为曲线拟合的数学优化方法,这是一种有效和经典方法,通过最小化原始数据与拟合曲线差值的平方来寻找最佳匹配函数.通过对测试数据的多次分析与试算^[9],最终我们选定的测向误差与频率关系目标函数为

$$y = \frac{c}{x^k}, \text{其中 } c, k \geq 0$$

由于最小二乘法仅适用于线性函数,因此我们还需对目标函数进行对数化处理,求出待定系数 k, c 后,即为拟合结果.

在本课题所有的函数逼近运算中,对所有原始测量数据都做同样的处理,不因为某些数据明显偏差过大或超出误差估计范围而进行数据筛选,以确保拟合曲线的真实和客观.

6 同一设备受影响测试结果分析

6.1 整体分析

将16个测试点的测向误差数据,按频率计算均方根误差,得到平均误差,进行输电线路影响的曲线拟合,结果如图2,可见:三次测量的测向误差有明显的不同,相对于输电线路建设前的情况,输电线路建设后的测向准确度明显降低,而且低频段恶化更严重,说明低频段受输电线路影响大,这与理论分析完全吻合.

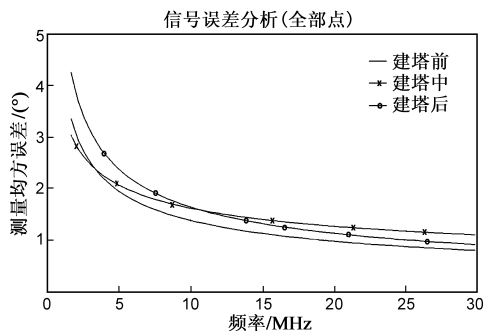


图2 全部测试点误差均方根拟合曲线(0~30MHz)

根据理论推算,输电线路建设对20MHz以上频率影响不大,从图2可以看出,20MHz以上频段三条曲线非常靠近,相差不到 0.3° .由于这部分测量数据影响,第二次测量的拟合误差曲线大于第三次测量的拟合误差曲线,似乎与理论分析相悖.其原因,估计是由于高频段两次测量过程本身的随机误差所造成,因为这一频段内第二、第三次测量差距较小,较难区分,而测试过程本身的偶发误差大于两次测量结果的差异,造成拟合曲线失真.为此,我们舍弃20MHz以上频段数据,

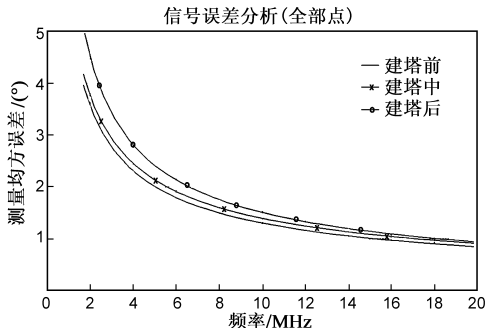


图3 全部测试点误差均方根拟合曲线(0~20MHz)

将 0~20MHz 频段数据重新进行曲线拟合,结果见图 3,可见在 0~20MHz 频段的拟合误差曲线与理论分析测向完全一致.也就是,随着高压输电线路建设推进,对测向系统的影响逐步增加,测向误差逐步加大.

6.2 各测试点对比分析

对各个测试点三次测量结果逐一进行分析,可以得到以下结果(图略):

(1)我们将各点曲线拟合的情况分为四类,第一类拟合曲线与理论分析基本相同,这类点有 5 个,占 31%;第二类点共 5 个,占 31%,不同频点三次测试结果对比与理论分析不完全一致,但除个别频段外,总体输电线路建设后比建设前测向误差增大;第三类点有 3 个测试点,不能分辨出建设前后测向误差有变化趋势;第四类测试点也有 3 个,结果显示基本上与理论分析相反:在大部分频段内,输电线路建设后的测向误差比建设前还要小.

(2)从各个测试点单独分析结果看,与理论预计基本相符和大致相符的测试点共有 10 个,占全部 16 个测试点的一半强,而与理论预计不符的点有 3 个,占 19%,还有 3 个点不能说明问题,出现这些情况,主要原因是,电磁传播模式非常复杂,在开放环境下测试,条件有限,特别是选择测量点,受到很大制约,部分测试点周边的环境不理想,如存在房屋、农用电线、附近可能有电子加工设备等,这些设施会对电台发射的信号造成反射或折射,由于距离近,叠加的反射信号对电波传播的影响较大,因此造成的测向误差也较大,这种误差随每次测量的时间、测试点和频率的不同而不同.

(3)各个测试点单独进行曲线拟合出现较大差异,恰恰说明单个测试点的测试过程中,测试本身的随机误差所占比重较大,与我们进行数据分析前的判断基本吻合,但是,经过对多个测试点数据进行平均并进行曲线拟合,可以认为是消除了随机误差,基本反映了系统误差,由于三轮测试时间只相隔半年,最主要的环境变化就是输电线路从无到有,其他的环境改变非常少,因此,可以认定,三轮次测试前后系统测向误差的变化,是由输电线路所引起的.

7 其它测试结果对比

7.1 不同设备测试结果对比

为了提高抗干扰能力,上海监测站新建了空间谱估计测向系统,该系统天线阵与原有干涉仪测向系统天线阵比邻,可以认为是两者电磁环境完全一致.因此,当该设施建成后,具备了对两种测向设备进行对比测试的条件,而此时,高压输电线路已经建成.通过第四轮 8 个测试点测试,获得两套测向设备在相同电磁环

境下对同一信号源测向的对比结果,其各点平均测试数据的拟合结果如图 4,可见,空间谱估计测向设备测向误差明显小于相关干涉仪测向设备,5MHz 以下频点,空间谱估计设备比相关干涉仪测向设备对测向精度改善 1°以上,5MHz~10MHz 频段,改善 0.5°以上.

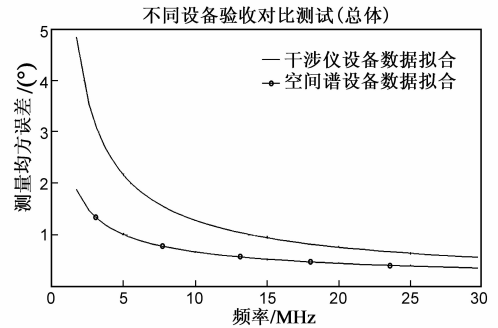


图4 各测试点测向误差均方根拟合曲线

从各个测试点独立进行曲线拟合(图略)结果看,除 1 个测试点 6MHz 以上频段外,其余所有测试点在全频段上空谱估计设备测向精度全部优于相关干涉仪设备,即使例外的测试点,两者之间的误差也非常小,可以认为所有测试点测试结果表明,空间谱估计设备测向抗干扰能力较高.

7.2 与仿真结果对比

为了验证理论分析与实测数据的一致,我们对第 2 节 2°相位误差情况下的仿真数据也进行曲线拟合,再与实测结果进行对比,结果见图 5 与图 6.由于仿真只进行了 0~10MHz 频段,为便于对比,10MHz~30MHz 的曲线也是由 0~10MHz 数据得到的拟合函数绘制的.

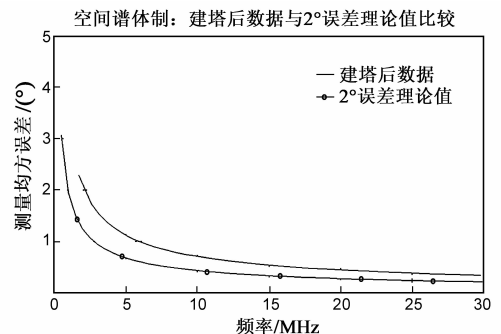


图5 空间谱估计测向理论与实测对比

可以看出,无论哪种体制下,理论仿真值与实测结果之间存在一定的差异,这主要是因为 2 度相位误差的假定与实际情况有差距.不过,可以看出,理论与实测数据的变化规律是完全一致的,曲线曲率变化也非常相近,可以认为两者基本相符.另外,相关干涉仪测向系统实测与理论的差值比空间谱估计测向相对要大一点,除了体制因素,可能与设备使用年限长,实际性能与计算机仿真的理想状态差距更大有关.

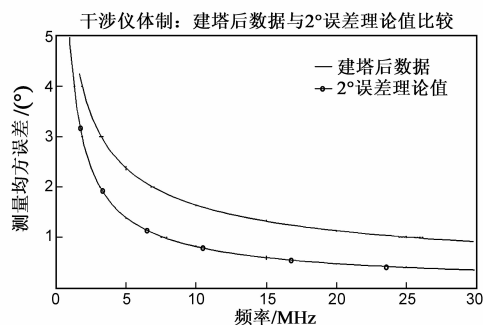


图6 相关干涉仪测向理论与实测对比

8 结论

通过对监测站受到高压输电线路影响的跟踪测试和数值分析,可以得到结论:高压输电线路对无线电监测站短波测向精度的影响是确实存在的,在低频段影响大,高频段影响小.20MHz以上,高压输电线路带来的系统误差小于测量的随机误差,可以忽略;采用空间谱估计测向体制的测向设备抗干扰能力明显优于相关干涉仪体制的测向设备.

在开放的自然环境中进行测向精度测试,测量结果的随机误差较大,与输电线路造成的系统误差相比,所占比重较高,误差相叠加后,会造成试验结果与理论预测不符的假象,采用曲线拟合的方法,可以有效地消除测量过程中的随机误差,对分析测向误差非常有效.

参考文献

- [1] Zhang Xiao-wu, Tang Jian, et al. Reradiation interference computation model of high voltage transmission line to the short-wave radio direction finding station[A]. Proceedings 20th Int Zurich Symposium on EMC, Zurich 2009[C]. Piscataway N J: IEEE Press, 2009. 309 - 312.
- [2] 唐波, 张建功, 等. 特高压输电线路对高频信号无源干扰的近似求解. 高电压技术, 2012, 38(6): 1420 - 1427.

Tang Bo, Zhang Jian-gong, et al. Approximate calculation of reradiation interference in high frequency signals from UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1420 - 1427. (in Chinese)

- [3] C W Trueman, S J Kubina. Scattering from power lines with the skywire insulated from the towers[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1994, 40(2): 53 - 62.
- [4] 干■渊, 张小武, 等. 特高压输电线路对调幅广播电台的无源干扰[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 9 - 12.
Gan Zhe-yuan, Zhang Xiao-wu, et al. Passive interference in receiving stations of AM broadcasting caused by UHVAC transmission lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 9 - 12. (in Chinese)
- [5] 张小武, 刘兴发, 等. 特高压交流输电线路与航空中波导航台间防护距离计算[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 1830 - 1835.
Zhang Xiao-wu, Liu Xing-fa, et al. Calculation of radio interference from HV AC transmission line to aeronautical radionavigation stations[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 1830 - 1835. (in Chinese)
- [6] 王永良, 陈辉, 等. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 2 - 39.
- [7] 瞿文中, 沈建峰, 等. 高压输电线路对上海监测站的影响、分析与对策[J]. 中国无线电, 2010, 21(7): 18 - 20.
- [8] 冯康. 数值计算方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978. 147 - 172.
- [9] 沈建峰, 朱斌, 等. 一种分析无线电测向准确度的方法[J]. 中国无线电, 2012, 23(2): 82 - 85.

作者简介



沈建峰 男 1963年8月出生于山东省德州市, 1990年在上海科技大学获工学硕士学位. 现为国家无线电监测中心高级工程师.

E-mail: jfshen777@hotmail.com