

TDOA 定位技术和实际应用简介

上海聚星仪器有限公司 俞一鸣
美国国家仪器 姚 远
北京邮电大学 程学虎

摘 要: 介绍了 TDOA (Time difference of Arrival) 的基本原理, 列举了 TDOA 定位的优势, 并且通过实例分析其在实际应用中的有效性, 结合实验数据分析了影响 TDOA 的因素。本文提出 TDOA 是一种简单高效的定位方式, 可以被广泛应用在无线电监测工作中。

关键词: TDOA 定位 误差分析

1 TDOA 介绍

对干扰源的定位是无线电频谱管理的重要内容之一, 主要的定位方法包括两大类: 复合角度定位法和时间差定位法。复合角度定位法基于无线电测向工作, 通过多个无线电监测站点对同一个信号进行测向, 利用测向射线 (角度) 的交会进行定位。时间差定位法则基于信号到达监测站的时间, 通过时间距离换算进行交会定位。

TDOA 是一种利用时间差进行定位的方法, 通过测量信号到达监测站的时间, 可以确定信号源的距离。利用信号源到多个无线电监测站的距离 (以无线电监测站为中心, 距离为半径作圆), 就能确定信号的位置。通过比较信号到达多个监测站的时间差, 就能作出以监测站为焦点、距离差为长轴的双曲线, 双曲线的交点就是信号的位置 (见图 1、图 2)。

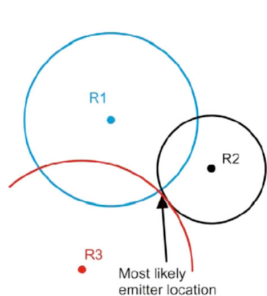


图 1 TDOA 定位示意图

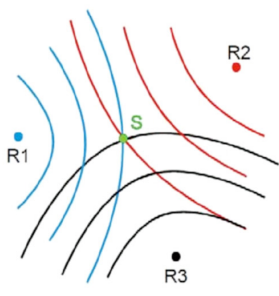


图 2 双曲线交会定位示意图

TDOA 是基于多站点的定位系统, 因此要对信号进行定位必须有至少 3 个以上的监测站进行同时测量。而每个监测站的组成则相对比较简单, 主要包括接收机, 天线和时间同步模块。理论上现有的监测站只要具有时间同步模块就能升级成为 TDOA 监测站, 而不需要复杂的技术改造。

2 TDOA 的优势

相比复合角度的定位方法, TDOA 有以下的优点:

(1) TDOA 不存在相位模糊的问题, 因此测向基线可以不受限制。传统的测向方法需要通过相位来计算方位角, 而相位测量存在 2π 周期的不确定性, 所以往往利用天线基线小于信号波长的方法来避免 2π 周期的回绕。但是高频信号的波长较短, 使得测试天线的距离较近, 容易产生信号耦合, 使得测量产生误差。而每个 TDOA 监测站只需一个天线, 从根本上解决了信号耦合的问题。

(2) TDOA 系统复杂度低。对于 TDOA 监测站, 只需配置监测天线和接收机即可, 而且对于天线的要求不高, 即便不同的监测点用不同的天线也没有关系。而测向天线本身就是一组天线组成的天线阵列, 并且阵列中各个天线的性能尽可能保持一致, 否则会对测向的准确度带来影响, 从而使系统成本较高, 不利于广泛开展监测。

(3) TDOA 系统定位的精度较高。对于 TDOA 检测站而言其定位精度取决于时间测量的准确程度。通过优化后的

算法, 时间差的计算误差在 100ns 量级, 从定位的准确度来说大约是 30m。而 A 级测向站的误差一般是 1 度, 对于 5km 外的信号误差在 87m, 10km 外的信号误差达到了 174m。

3 TDOA 的实际案例

本文选择基于 NI PXI 平台的接收机产品作为 TDOA 实验的主要设备, 包括宽带接收机模块、GPS 时钟模块和高速数据处理模块。NI PXI 宽带数字接收机最大带宽达到了 50MHz, 可以满足高速数字信号的接收需求, 同时本底噪声仅为 9dB, 对弱小信号有很强的监测能力, 也使得监测的覆盖半径更大。高灵敏的 GPS 模块可以同时跟踪 12 颗 GPS 卫星, 为时间差的测量精度提供保证。信号处理和计算模块则选用了 NI (美国国家仪器公司) 最新推出的嵌入式控制器, 其采用的 i7 处理器, 对多站信号的相关计算提供强大的处理能力。与此同时, 开放的 PXIe 系统总线除了提供高速数字传输外, 很短的触发延时也保证了时间测量的准确性。

此外, 在 TDOA 的天线选择上面则更体现了系统的灵活性。实验所选择的监测站包括了一个新建的固定站 (站点 A)、一个 10 年前建成的监测站 (站点 B) 和一个搬移式监测站 (站点 C)。在站点 A 使用的天线是一套高灵敏度的监测天线, 其灵敏度达到了 $0.1 \mu V/m$ 。而站点 B 则复用的原有的监测天线, 通过开关切换实现不同设备的分时复用。站点 C 采用的是搬移式天线, 天线尺寸小。

由于站点 A 和站点 B 是固定站, 站点架设过程已经先期完成。而在架设 C 站时, 只需将信号天线、GPS 天线接入接收机, 展开天线即可, 整个过程只需一个技术人员完成。

本文选取 A 站点作为中心站, 汇总 B 站、C 站的信息进行计算。监测站之间的数据交换采用原始 IQ 信号, 汇总到 A 站之后还能进一步记录存盘, 方便以后对算法的验证和研究。整个数据传输使用 3G 网络和压缩算法。实验中, 该系统响应及时、可靠。

在时间差的计算方面, 目前采用的是信号相关算法。在本次实验过程中, 相关算法精度较高, 并且对待测信号没有特殊要求, 是比较通用的信号算法。而存盘记录的数据, 可以用作干扰排查的证据记录, 通过回放数据显示干扰源的发射状态。同时, 这些数据也能用于今后的算法研究、干扰排查的典型案列。

在实验过程中, 为了测试 TDOA 的性能, 本文选择了 4 个不同位置的信号源进行测量。表 1 是信号源和监测站之间的相对位置情况。表 2 所示为实际测试信号的到达时间差。

表 1 信号源和监测站之间的相对位置 (单位: 米)

	站点 A	站点 B	站点 C
信号源 a	8370	14713	3137
信号源 b	13008	10470	4578
信号源 c	18969	6004	10630
信号源 d	20921	4273	13154

表 2 实际测试信号的到达时间差 (单位: μs)

	Delta T [A-B]	Delta T [B-C]	Delta T [C-A]
信号源 a	21.252	-38.616	17.400
信号源 b	-8.128	-20.072	28.212
信号源 c	-43.328	15.817	27.632
信号源 d	-54.590	28.596	26.172

通过换算, 得到信号源到不同监测站的距离差, 并且将这个差值用双曲线标记在地图上, 可以得到测试结果 (见图 3)。

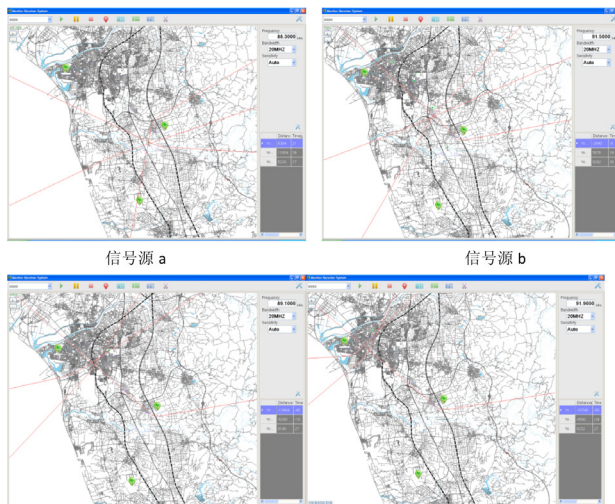


图 3 实验测试的结果

表 3 所示为测试结果与实际台站距离的误差情况。

表 3 测试结果与实际台站距离的误差 (单位: 米)

	Delta T [A-B]	Delta T [B-C]	Delta T [C-A]	平均
信号源 a	32.6	8.8	13.0	18.1
信号源 b	99.6	129.6	33.6	87.6
信号源 c	33.4	119.0	49.4	67.3
信号源 d	271.0	302.2	84.6	219.3

测试结果表明, 最小定位误差在 18 米, 最大的定位误差在 220 米, 匹配并且超过 A 级测向站的定位水平, 说明 TDOA 是一种非常有效的定位方法。

4 TDOA 测试结果讨论

进一步分析不同位置的信号源的测试结果, 可以看到当信号源落在监测站所组成的三角形内部时, 定位的准确度最高, 越靠三角形边沿的位置, 误差越大。这一点可以从双曲线曲率变化来解释。图 4 中, 蓝色点是监测站的位置, 双曲线以等间隔组成坐标网格。黄色区域由相邻一格双曲线组成, 对于三角形边沿区域, 相同的网格围成的区域越大, 测量的误差也越大。修正这一问题的办法是增加更多的监测站, 通过初步定位选择最合适的 3 个站进行定位。这样可以提高信号定位的准确度。

此外, 针对 TDOA 定位方式的特点, 时间测量的精度十分重要, 而影响测量的主要因素包括 GPS 授时准确度和信号采样误差。本案例中采用了高性能的 GPS, 其标称误差仅为 15ns, 但是考虑到多个站点的 GPS 信号误差, 在实际测量中两个监测站 GPS 的抖动小于 20ns, 不影响系统的整体指标。(下转第 70 页)

排除互调干扰后,剩下的最大可能是电视发射机本身产生的杂散信号干扰。7月23日,沧州无线电管理局派出执法和技术人员再次前往肃宁县对干扰信号产生的原因进行测试分析。此次技术人员采取了在线测试方法,利用频谱仪N9020A直接连接发射机的测试端口进行测试。这样能够检测出发射机真实的频谱特性。图4显示除了电视主信号之外,从100MHz至600MHz范围内电视发射机还产生了大量杂散信号,其中在12X.XXMHz频点信号电平达到-55.44dBm(见图5)。由此可以确定,此次民航干扰信号为肃宁电视6频道产生的杂散信号。其原因是发射机老化、滤波器性能变差,没有有效滤除杂散信号,从而形成了有害干扰。

2. 干扰信号原因分析

电视图像载频为168.25MHz,伴音载频为174.75MHz,怎么会产生12X.XXMHz的干扰信号呢?技术人员又对12X.XXMHz信号产生的原因进行了分析。该电视发射机型号为北广TVV313型,其图像中频为37MHz,伴音中频为30.5MHz。经变频后电视图像频率变为168.25MHz,伴音频率变为174.75MHz。变频器、双工器等设备器件的非线性造成这4个频率在发射机内部形成很多互调产物,产生了大量杂散信号。图4中较强的互调产物包括伴音频率与伴音中频产生的 $174.25+30.5=204.75\text{MHz}$ (Peak3)、图像频率与图像中频产生的 $168.25-37=131.25\text{MHz}$ (Peak4)等等。这些形成的较强互调产物与主信号之间能进一步产生互调,形

成新的互调信号,如上述图像互调产物131.25MHz与主信号图像、伴音互调就产生了航空频率干扰信号12X.XXMHz,属三阶二型互调。☞

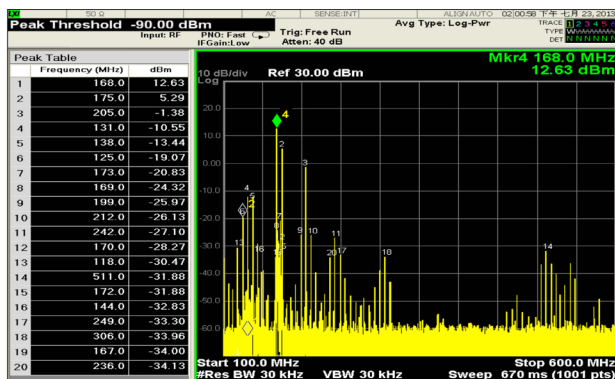


图4 电视6频道在100MHz~600MHz频段内杂散频谱(在线测试)

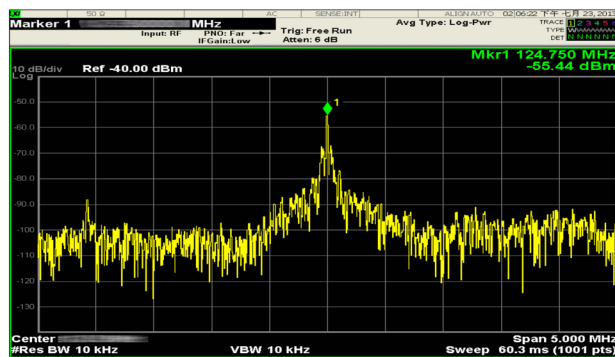


图5 12X.XXMHz测试频谱(在线测试)

(上接第58页)

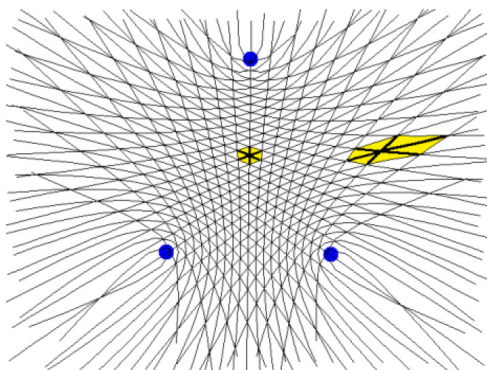


图4 TDOA双曲线示意图

而采样率则提供了信号分析的最小时间单位,如果采样率太低,则时间分辨率不够高,从而影响系统测量精度。在本实验中采用的高速数字化仪,最高采样率达到150Mb/s,

时间分辨率在6.7ns,能够充分满足系统要求。

5 TDOA定位小结

综上所述,TDOA定位是一个稳定可靠的基于网络化的定位方式。美国国家仪器公司提出的基于模块化仪器系统所搭建的频谱监测接收机,可以提供具有高带宽、低本底噪声的高性能接收机模块以及高精确定性的时钟模块,是实现TDOA定位系统的理想平台。模块化的结构可以最大限度地利用现有的检测设备资源,适合新型无线电信号的定位与检测。☞

参考文献:

- [1] 朱庆厚. 到达时间差(TDOA)测向定位研究. 电视技术, 第47卷第1期, 2007年2月
- [2] Spectrum Monitoring Handbook, Edition 2011