

干涉仪测向原理

国家无线电监测中心 肖秀丽

干涉仪测向的实质,是利用无线电波在测向基线上形成的相位差来确定来波方向。一般情况下,测向机只需得到来波的方位角就够了。特殊情况下,要求测向机具有对来波的方位角和仰角同时进行测向的能力,如对空中目标、对短波天波信号测向。

1 一维相位干涉仪

1.1 一维相位干涉仪测向原理

图1是一维相位干涉仪原理图。其中(a)为一维单基线相位干涉仪原理,(b)为一维多基线相位干涉仪原理。“一

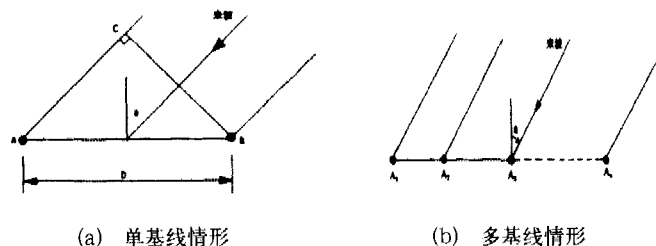


图1 一维相位干涉仪测向原理

维”是指测向天线为“线型”布阵,即所有的测向天线阵元都处于同一条直线上,与之相对应,“二维”是指测向天线为“面型”布阵,即所有的测向天线阵元都处于同一个平面内。

一维相位干涉仪测向公式为:

$$\phi = (2 \pi D \sin \Theta) / \lambda \quad (1)$$

其中, ϕ 为 A-B 基线相位差; D 为基线长度; Θ 为来波方位角; λ 为来波波长。

由于干涉仪测量的相位差(测量值)只能在 $\pm 180^\circ$ 范围内,由式(1)可知,当基线长 $D < \lambda / 2$ 时,对于任一方向入射波基线实际相位差(实际值)在 $\pm 180^\circ$ 以内,测量值反映实际值;当基线长 $D > \lambda / 2$ 时,对某方向入射波基线相位差实际值可能超过 $\pm 180^\circ$ 的范围,但测量值只能在 $\pm 180^\circ$ 范围内,此时从测量值推算实际值时就存在若干个可能,这就是“相位模糊”。所以基线长度 D 必须小于 $\lambda / 2$, 否则会引起示向多值,即不能保证实际示向与相位差的一一对应,即一个测定的 ϕ , 可以计算出两个或两个以上的示向度,这当然是不允许的。然而,对基线长度的限制却制约着测向准确度的提高。为了解决这个矛

盾,一般采用长短基线结合的办法。对于某个工作频率,多基线相位干涉仪中既有“长基线”也有“短基线”。尽管“长基线”存在相位多值,但利用相位单值的“短基线”相位,可以解算出“长基线”的实际相位的精确值,这个过程称为“解相位模糊”。当最长基线长度越长时,解相位模糊所需辅助天线元的数量越多,此时,系统的测向精度越高。

对一维相位干涉仪来说,就是采用一维多基线相位干涉仪。下面举一个最简单的例子,见图2。

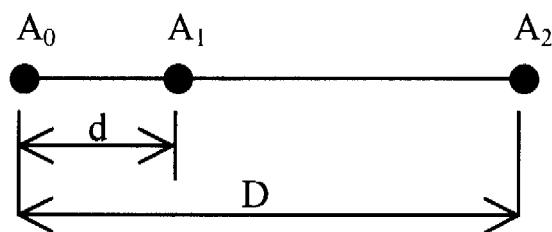


图2 一维多基线相位干涉仪

A_0 、 A_1 、 A_2 组成如图2所示的天线阵,其中 $d < \lambda / 2$, $D = md$ ($m > 1$)。

因为 $d < \lambda / 2$, 所以 $\phi_1^* = \Psi_1$; (2)

因为 $D > \lambda / 2$, 所以 $\phi_2^* = \Psi_2 + 2k\pi$; (3)

$\phi_2^* = m\phi_1^*$ 。 (4)

其中, Ψ_1 为 A_0 - A_1 基线相位差测量值; Ψ_2 为 A_0 - A_2 基线相位差测量值; k 值为 $0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。

解相位模糊步骤如下:

(1) 由式(2), 根据 Ψ_1 直接得到 A_0 - A_1 基线相位差 ϕ_1^* ;

(2) 由式(4), 根据 ϕ_1^* 计算出 A_0 - A_2 基线相位差的一个粗值 ϕ_2^* ;

(3) 由式(3), 根据 Ψ_2 计算得到 A_0 - A_2 基线相位差的一组精确值 ϕ_2^* ;

(4) 将一个粗值 ϕ_2^* 与一组精确值 ϕ_2^* 进行数据匹配, 寻找出最接近于粗值的唯一精确值 ϕ_2^* ;

(5) 将 ϕ_2^* 代入式(1)即可得到精确的测向结果。

假设 A_0 - A_1 基线(短基线)相位差测量值为 100° , A_0 - A_2 基线(长基线)相位差测量值为 -112° , 长短基

线长度比值为2.5, 则长基线相位差的一组精确值为 $-112^\circ + 2k\pi$ (其中 k 取 $0, \pm 1, \pm 2, \dots$), 根据基线相位差与基线长度成正比, 可以得到长基线相位差的一个粗值为 $2.5 \times 100^\circ = 250^\circ$, 显然只有当 $k=1$ 时, $-112^\circ + 2k\pi = 248^\circ$ 与 250° 最接近, 所以长基线相位差的精确值为 248° 。

1.2 一维相位干涉仪测向存在的缺陷

如图3所示, 当同一频率电波分别从前方和后方以相同的夹角入射到基线时, 可以得出电波到达 A_0 - A_1 基线相位差均为 $(2\pi D \sin \Theta) / \lambda$, 但是来波的方位角却分别为 θ 和 $180^\circ - \theta$, 所以一维相位干涉仪无法区分前方与后方。

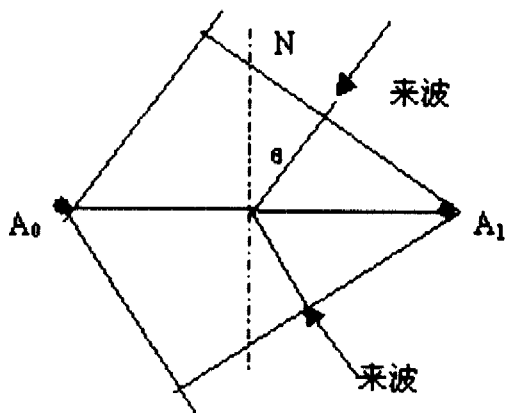


图3 前后方来波示意图

一维相位干涉仪测向存在以下缺陷:

(1) 一维相位干涉仪测向的测向方位角范围只能为 $[-90^\circ, +90^\circ]$, 存在无法区分前方与后方的缺点, 即前后方来波以相同夹角入射到基线形成的基线相位差无区别(由 $\sin \Theta$ 的对称性也可看出)。

(2) 一维相位干涉仪测向仅适合于来波入射方向与基线不存在仰角的测向场合。式(1)中仅针对俯仰角等于零的情形, 如果存在仰角, 则等式(1)不成立, 如仍沿用此式计算方位角, 会引起额外的测向误差。

因此, 一维相位干涉仪不适合以下来波有仰角的测向场合: 机载测向、地对空目标测向、短波天波测向。

2 二维相位干涉仪测向原理

2.1 二维单基线情形

如图4所示,以直角三角形顶点布阵等长基线的三元阵为例,x轴、y轴、z轴构成直角坐标系XYZ,x轴上的 A_0-A_1 基线、y轴上的 A_0-A_2 基线长度都为D。

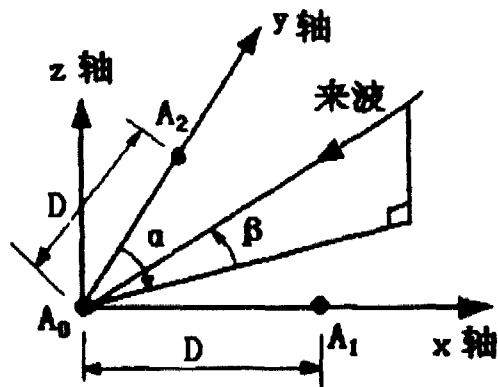


图4 二维单基线相位干涉仪测向原理图

测向公式如下: $\phi_1 = (2\pi D \sin \Theta / \lambda) \cos \beta$ (5)

$\phi_2 = (2\pi D \cos \Theta / \lambda) \cos \beta$ (6)

其中, ϕ_1 为 A_0-A_1 基线相位差; ϕ_2 为 A_0-A_2 基线相位差; D 为基线长度; Θ 为来波方位角; β 为来波仰角; λ 为来波波长。

对于同样长度的基线,比较式(1)与式(5)或式(6),可知基线相位差还与仰角有关。因此,对有仰角的来波进行测向时,一维相位干涉仪的基线相位差还会因仰角不同而呈现出多值性,从而造成另外一种相位模糊,而二维相位干涉仪则不存在这种相位模糊。

从式(5)和式(6)可以求出来波入射方位角 Θ 和来波入射仰角 β :

$$\Theta = \arctan(\phi_1 / \phi_2), \quad (7)$$

$$\beta = \arctan[\sqrt{(\phi_1^2 + \phi_2^2) / (2\pi D / \lambda)}]。 \quad (8)$$

二维单基线相位干涉仪与一维相比,具有以下优点:

(1) 二维相位干涉仪可 360° 全方位测向,而一维干涉仪只能 180° 测向;

(2) 与一维相位干涉仪相同,当 $D < \lambda / 2$ 时,基线相位差不会超出 $[-\pi, +\pi]$ 范围,无相位多值,可得到真实来波方向; $D > \lambda / 2$ 时,存在相位多值,造成测向多值;

(3) 一维相位干涉仪只能测方位,且存在因仰角引起的相位模糊,而二维相位干涉仪可同时测方位与仰角,不存在因仰角引起的相位模糊;

(4) 在 $D < \lambda / 2$ 条件下,基线长度越长,测向精度越高。

2.2 二维多基线情形

二维多基线相位干涉仪的测向天线阵排列比较灵活,常见排列图如图5所示。

图5中,(a)是 n 元圆阵,相邻天线元之间的距离是相同的,且小于二分之一波长。采用圆阵的好处是天线元位置相互对称,易于实现测向校正。(b)是基线长度不等的五元正交双基线直角三角形顶点天线阵排列。

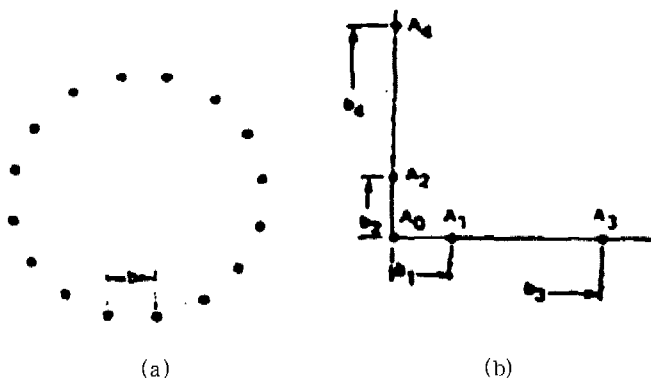


图5 二维多基线相位干涉仪常用天线布阵图

由1.1节的论述可知,一对单元天线在 $D > \lambda / 2$ 时,会产生相位模糊,进而产生测向的多值现象。在二维多基线阵列中,我们可以选取多个天线对,一个天线对可以通过测量相位差得到测向值(多值),通过对每个天线对所得到的测向值进行统计和处理,可以确定唯一真实的测向值,消除测向的多值现象。这个过程可以看成联合多个天线对得到方程组,尽管每个方程是多解的,我们还是可以通过求解方程组的方法求得唯一解。因此,二维多基线干涉仪天线阵单元间距不受小于半个工作波长的约束,这样

可以覆盖更宽的频段,同时提高测向的精度。

二维多基线相位干涉仪的测向算法和解模糊方法比较复杂,在此不再赘述。

3 传统相位干涉仪存在的问题

如上所述,传统相位干涉仪是建立在天线阵元获取入射波电场相位分页基础上的,当入射波是平面波时,天线阵元相对位置就决定了相位分页。而实际上,由于天线阵元间互耦、天线支架或天线阵载体等种种因素的影响使波阵面发生了畸变,入射波相位和幅度分布失真,从而导致测向误差。此时要降低测向误差,就要消除或降低这些畸变和失真,这往往很难做到。如为了降低天线元互耦,应该使阵元间距设计大一些,而阵元间距的增大,必然会引起测向模糊,从而在一定程度上限制了间隔的扩大。此外,对于某些机动应用场合,特别在行进中需要而限制天线阵升高的情况下,金属载体对天线阵影响更是难以避免。

4 相关干涉仪测向原理

4.1 相关干涉仪测向机的设计思想

相关干涉仪,既然也称“干涉仪”,当然也主要是利用天线阵元获取入射波相位分布来测向的。而所谓“相关”,其含义是“比较”,即通过比较获取的入射波相位分布与事先已存的各方位、各频率来波相位分布的相似性来得到入射波方向。

相关干涉仪测向机正是根据这个思想设计的,由于采用了相关处理技术,弱化了传统干涉仪中由于互耦、载体等对测向精度的不利影响。这些影响虽然还存在,还影响着波阵面畸变和相位分布的失真,但这些影响是稳定的,由于这些失真已经存入“样本”之中,通过相关处理,实际上弱化了它们对测向精度的影响。也就是说,相关干涉仪并不注重消除或减少这些因素本身,而是在“承认”这些因素存在的前提下,设法弱化它们所造成的影响。

4.2 相关干涉仪测向原理

以多单元均匀圆阵为例。在多单元圆阵中,选取若干个天线对,对于一个确定入射角的空间来波,从这些天线对可以得到相应的相位差,这些相位差值由天线阵的结构决定。根据已知的天线阵结构可以计算出相位差值,也可以通过实际的测量得出。在 360° 全方位上,等间距地选取若干方向 $\theta_i (i=1, \Lambda, n)$,每一个方向有若干个天线对的相位差值 $\phi_j (j=1, \Lambda, m)$ 相对应, m 为选取的天线对数量。这些天线对的相位差值称为干涉仪系统的原始相位样本,原始相位样本包含了系统的所有参数信息。对于某一个实际目标信号,系统测量出一组相位差,将这一组值和系统原始相位样本进行相关处理,计算出它们的相关系数,相关系数的最大值对应的方位角就是目标信号的方位值。

我们把预先得到的空间方向和相应的系统原始相位样本写成复矢量形式 $\theta_i = (\phi_{i1}, \phi_{i2}, \Lambda, \phi_{im})^T, i=1, 2, \Lambda, n$ 。对于一个空间实际信号得到的相位样本为复矢量 θ ,将 θ 分别和 $\theta_i (i=1, \Lambda, n)$ 进行相关运算,相关函数的表达式为:

$$\rho_i = \frac{\theta' \cdot \theta_i}{(\theta' \cdot \theta)^{1/2} \cdot (\theta_i' \cdot \theta_i)^{1/2}}, \quad (9)$$

ρ_i 最大值相对应的原始相位样本值所代表的方位值,就是空间实际入射信号的方位角。

图6是一个9单元等间距的圆阵相关图。圆阵直径和工作波长之比 $D/\lambda = 2$,原始相位样本数为18。

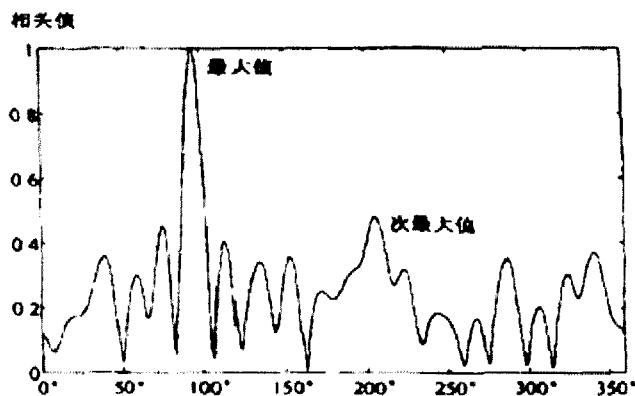


图6 9单元圆阵相关图 ($D/\lambda = 2$)

图6描述的是一个方位角为95°的信号相位样本和系统原始相位样本相关处理的结果。图中相关的最大值在方位值95°处，而次最大值在206°附近。我们称相关主峰为主瓣，次主峰和其他相关峰为旁瓣，从图中可得出如下结论：

- (1) 大孔径的圆阵可以得到非常窄的主瓣，因此具有很高的角度测量精度；
- (2) 消除模糊就是降低相关图中的副瓣的高度，使主瓣和副瓣易于分辨。

从另一方面来看，引入相关处理等效在360°方向内形成了若干个空间滤波器，对空间信号产生的相位样本复矢量 $\theta(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m)$ 进行空间滤波，最佳匹配是 θ 的共轭匹配，这与相关处理的结论是吻合的，相关处理的过程就是空间滤波的过程。事实上，空间滤波器的个数是有限的，参数也是预先设定好的，因此对空间任一入射方向的信号进行空间滤波时，必然存在一定程度的失配，失配损失引起相关主瓣幅度的降低和旁瓣幅度的增加，造成测向精度的降低，甚至带来测向模糊。

相关干涉仪相对于二维多基线相位干涉仪的优势：

- (1) 相关处理特别适合现代的数字处理技术，将采集的系统原始相位样本进行存储，测向过程实际上就是一种典型数字相关匹配处理过程，过程简单明了。原始相位样本包含系统的固有偏差、设备制造误差和所有的方位角信息，所以设备本身可以达到很高的精度。
- (2) 相关干涉仪测向算法利用相关匹配运算避开了较为复杂的解模糊问题，直接解得来波的入射方位角和仰角，并且运用所有独立基线上的相位差信息来综合求解，在测试环境恶劣、相位差波动较大的情况下，测向结果的准确度高于相位干涉仪的测向准确度。

4.3 相关干涉仪测向系统举例

4.3.1 THALES 公司 HF 频段固定测向系统（双信道相关干涉仪测向系统）

如图7所示，该系统天线阵由8个交叉环天线组成等边三角形，其中Reference为参考天线，也作为监听天线使用。

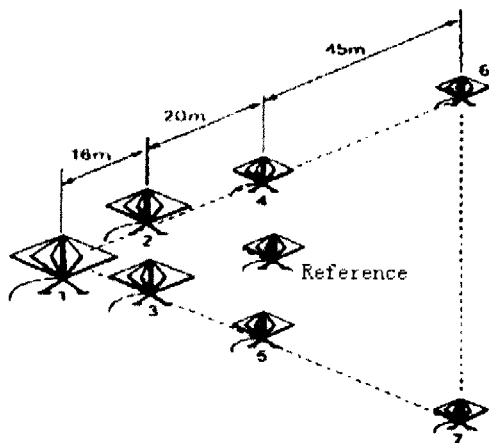


图7 THALES 公司 HF 频段固定测向系统天线阵

表1为测量出的5个相关差与计算出的5个校准相位差的比较。

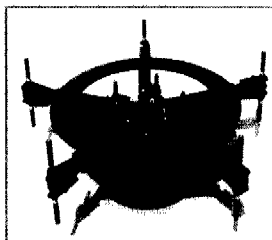
表1 不同频段的原始相位差与校准相位差

10.9 MHz ~	原始相位差	R-1	R-2	R-3	R-4	R-5
30 MHz	校准相位差	1-3	3-5	5-4	4-2	2-1
3 MHz ~	原始相位差	R-1	R-4	R-5	R-6	R-7
10.9 MHz	校准相位差	1-5	5-7	7-6	6-4	4-1

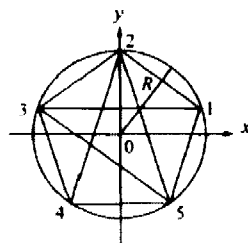
假如电波到达参考天线R与天线单元1、3的相位差的测量值分别为 Φ_{R-1} 和 Φ_{R-3} ，理论值分别为 ϕ_{R-1} 和 ϕ_{R-3} ，电缆与接收机两个信道不匹配引入的误差为 δ 。则有：
 $\Phi_{R-1} = \phi_{R-1} + \delta$ $\Phi_{R-3} = \phi_{R-3} + \delta$ ；电波到达天线单元1和3的相位差为：

$$\Phi_{1-3} = \Phi_{R-3} - \Phi_{R-1} = (\phi_{R-3} + \delta) - (\phi_{R-1} + \delta) = \phi_{R-3} - \phi_{R-1}。$$

4.3.2 THALES公司VHF/UHF频段车载测向系统（双信道相关干涉仪测向）



(a)



(b)

图8 ANT-184A

(1) 天线系统

该系统所采用的天线系统如图8所示。它由内外两个五元均匀圆阵组成，分别覆盖20 MHz~700 MHz及700 MHz~3 GHz频段。为了达到满意的测向精度及抗模糊能力，内外两个圆阵又分为两个频段，采用不同的基线长度，如表2所示。

表2 不同频段对应的不同基线

频段	20MHz~500MHz	500MHz~700MHz	700MHz~2GHz	2GHz~3GHz
基线	星形(五边形的五条对角线)	环形(五边形的五条边)	星形(五边形的五条对角线)	星形(五边形的五条边)

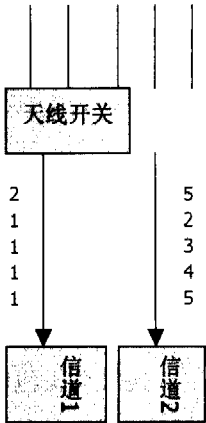


图9 通过天线开关测得天线对相位差值

(2) 测向原理

如图9所示，通过天线开关，可以直接测量得到一组天线对的相位差值：2-5、1-2、1-3、1-4、1-5。由直接测量得到的这组天线对相位差值计算得到不同频段的原始相位差值，与校准文件中存储的该系统的原始相位差值。

表3 原始相位差和计算所得相位差

原始相位差值	20MHz~3GHz	2-5	1-2	1-3	1-4	1-5
由原始相位差值计算得到的相位差值	20MHz~500MHz	1-3	2-4	3-5	4-1	5-2
	500MHz~700MHz	1-2	2-3	3-4	4-5	5-1
	700MHz~2GHz	1-3	2-4	3-5	4-1	5-2
	2GHz~3GHz	1-2	2-3	3-4	4-5	5-1

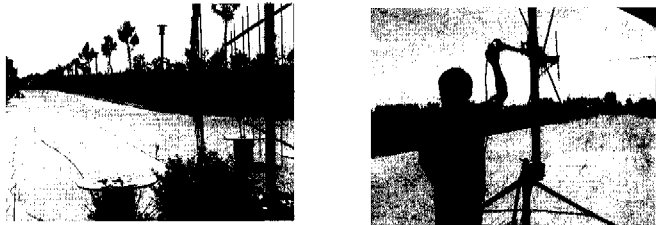
注：表中2-5代表2-5基线相位差或电波到达天线单元2和5的相位差，其它类似。

位样本进行相关运算（见表3），相关系数的最大值对应的方位角就是目标信号的方位角。

不直接测量天线对相位差的方法通过减法，消除了电缆和接收信道的不匹配带来的相位测量误差。

(3) 监测车的校准

校准的目的是建立系统的原始相位样本。由于不同的车体对同一测向天线的影响是不同的，所以当测向天线安装到监测车上之后，需要建立新系统（测向天线+车体）的原始相位样本。校准过程中不能引入任何其它因素带来的测向误差，如反射、折射、其它干扰信号（如开启车门所造成的影响）等。故要求在电磁环境良好的开阔场地进行校准。

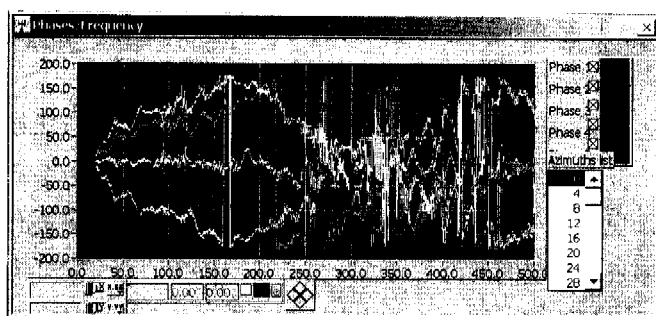


(a) 北京监测站内的测试场地 (b) 云岗测试场地

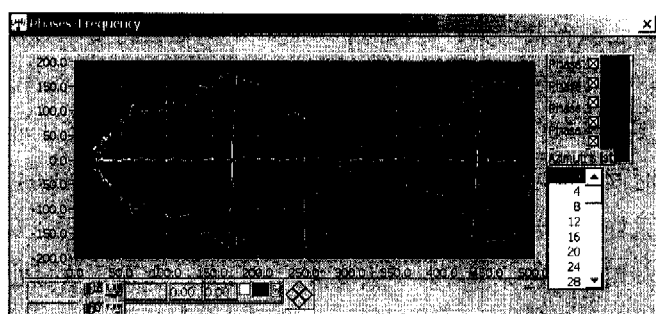
图10 选择校准场地

从图10中THALES公司的移动监测车在(a)、(b)两地所做测试的校准结果图可以看出，选择校准场地是非常重要的。

在校准结果图（图11）中，有五条不同颜色的曲线，分别代表5个基线相位差数据。图中是在0°方向，5个基线相位差数据随频率的变化曲线。比较两张图可发现，图(a)中的曲线有很多毛刺，这是由于站内的环境比较复杂，100米外有多个卫星接收天线、150米远有3层的办公楼，近处还有路灯等，这些都会对电波造成各种反射、折射；而图(b)中的曲线非常平滑（在标准天线测试场地测试所得）。如果采用图(a)中的校准结果作为系统的原始相位样本，由于引入了场地环境的因素，如果位置发生变化，那么测向结果就不可用了，该监测车系统只有在这种特定的环境和位置下测试才是准确的，放在标准场地也会不准确。而图(b)是在校准场地环境下测试所得的结果，没有引入环境因素，所以以该结果为系统的原始相位样本，



(a) 在北京监测站内场地所做校准结果图



(b) 在云岗场地所做校准结果图

图 11 校准结果图

当环境不变而位置发生变化时,测向结果仍然是正确的。同样,当车体发生变化时(或更换车型),原来所测试校准的结果也不能再用,需要重新做校准测试。一位非常有经验的法国专家校准了2000多部监测车,积累了多种车型的校准文件。2004年在为我们做两部同样车型的测向校准时,发现第一部车的校准文件在第二部车上根本就不能用。原因是两部车顶部安放天线的平台有所不同,一部车的平台支架上有一层平坦的金属板,另一部车上的平台只有支架没有铺金属板(为减轻车的整体负荷)。这对于测向天线来讲就相当于周围的环境发生了变化,导致原来的测试校准结果无法使用。

参考文献

- 1 吴红光.“二维相位干涉仪原理及其在短波战术测向机中的应用”.通信对抗,2003.
- 2 朱旭东.“相关处理在干涉测向仪中的应用”.现代雷达,2003(1)
- 3 严发.“浅谈相关干涉仪测向机的设计思想”.中国无线电管理,2003(7)