

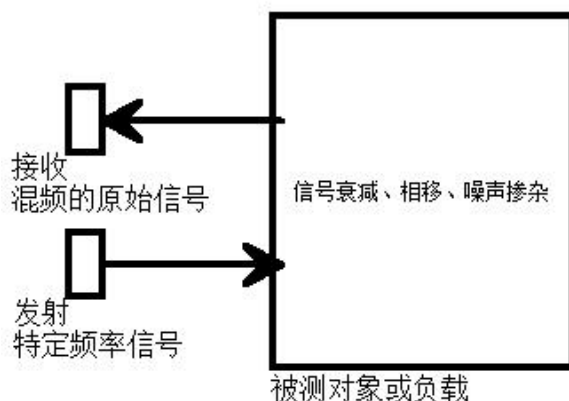
第八章 数字相敏检波 DPSD

我是在 2012 年开始接触数字相敏检波算法(DPSD)的，对它进行了深入的研究。它在工程上有很大的实用意义，其主要作用是从原始信号中提取出特定频率的信号，包括它的实部、虚部、模值以及与参考信号之间的相位差。

1、DPSD 的基础知识

1.1 应用模型

基本的应用模型如图 8.1。



我们经常会有这样的需求：向被测对象发射一段信号，然后接收其经过被测对象之后的返回信号。通过对返回信号与发射信号的比较，来推算被测对象的物理性质，比如电阻率、容性或阻性负载等等。

只是被测对象的性质可能会比较复杂，它会对信号产生衰减、相移、噪声掺杂等作用，使得接收到的信号面目全非，有用的信号被完全淹没了。为了解决这一问题，通常对发射信号以特定频率进行调制，然后到接收信号中去找这个特定频率的信号分量，我们比较关注的是信号的等效幅值以及与发射信号的相位差。

实际的应用情况可能更复杂一些，如图 8.2 所示。

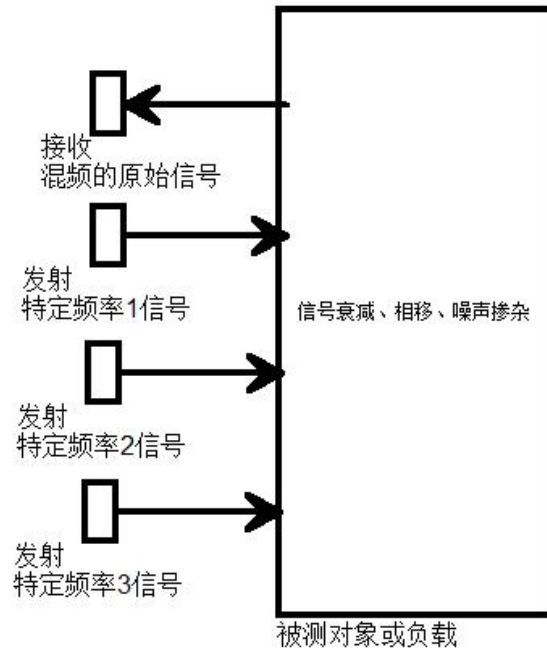


图 8.2 较复杂的 DPSD 的应用模型

为了获取被测对象更多信息,我们可能并不只给他发射单一频率的信号,而是多种频率。这些信号在被测对象中混频,夹杂着衰减、相移和噪声一同回到接收端。我们需要把各个频率的信号分量从接收信号中检测出来。

1.2 原理推导

我知道大家看书最烦的就是公示罗列,我也很反感这样的书籍。但是很多技术的根源从本质上说是数学,有时一些逻辑清晰的数学推导,可以为我们揭示更深层的原理,提升我们的认知。关于 DPSD,当时我公司的一位资深专家,留美的博士给出了它的数学推导,奠定了数字相敏检波应用的基础(这一算法有一定的专利性质)。数学推导如下,我保证所有人都能接受。

假设待测量的信号,即接收信号中的特定频率分量 $d(t)$ 为

$$d(t) = D \cos(\omega t - \varphi) = D \cos(\varphi) \cos(\omega t) + D \sin(\varphi) \sin(\omega t)$$

式中, D 为待测量信号幅度; ω 为待测信号与参数信号的频率; φ 为待测信号与参考信号之间的相位差。我们将 $D \cos(\varphi)$ 记为 D_R , $D \sin \varphi$ 记为 D_X 。它们分别为待测信号幅值的实部与虚部。

设

$$\begin{aligned} R' &= \int_0^T d(t) \cos \omega t \, dt \\ &= \int_0^T D \cos(\omega t - \varphi) \cos \omega t \, dt \\ &= \int_0^T \frac{D}{2} [\cos(2\omega t - \varphi) + \cos \varphi] \, dt \\ &= \frac{TD}{2} \cos \varphi = \frac{T}{2} D_R \end{aligned}$$

即

$$D_R = \frac{2}{T} R'$$

同理

$$X' = \frac{TD}{2} \sin \varphi = \frac{T}{2} D_X$$

$$D_X = \frac{2}{T} X'$$

推导就此打住，我们从宏观认知上来解释一下推导的结果。 $D_R = \frac{2}{T} R'$ 的意思是待测的特定频率信号分量的幅值实部是接收信号与特定频率标准参考信号的乘积的积分的均值的 2 倍。

1.3 硬件 PSD

基于数学原理的 DPSD 的实现必然需要高性能的 DSP 和高速 ADC，这限制了 DPSD 很多的工程应用，尤其是比较老的产品中。那它们是如何实现相敏检波的呢？工程师们使用纯硬件电路来实现相应的功能（PSD 电路的相关原理和实现细节，大家可以百度一下，这里不再赘述），但是精度和稳定性并不理想，尤其是在一些极端的工业场合，比如石油勘探（地下每深入 30 米温度上升 1 摄氏度）、极寒环境、超长期工作等，主要是因为电子元件的温漂时漂等物理特性而导致的。

但是随着半导体技术的飞速发展，芯片的性能和价格趋于平衡，使得产品的外围电路得以精简，原来的电路功能更多被纯数字方式和信号处理算法替代。从某种意义上来说，传统电路工程师的地位在下降，而对嵌入式软件和算法工程师的要求在不断提高。传统的嵌入式软件工程师，更多的工作集中在业务逻辑、用户界面、数据采集存储等方面，现在则需要更多的技能，比如数字信号处理，如 FFT、DLF 等等，以及随之而来的算法仿真与验证。

2、DPSD 的典型应用

现在我们知道 DPSD 可以实现精确的选频，以及两个同频信号之间相位差的计算，这使得它有着非常广泛的应用。我们不说那些高大上的应用，只就几个实用而又不失趣味性的应用来进行介绍。

2.1 石油测井仪器

2011~2017 年我在中国石油供职，主要负责测井仪器中的嵌入式软件开发。说些题外话，测井仪器可能是一个不被大家所熟知的行业。有人曾经问过一个问题：“上天难，还是下地难？”应该说都很难，但如果非要比较一下，那我说是下地难。人类的太空探索已经临近太阳系，但是钻到的最大深度也只有 12263 米，而且花了 30 年的时间(大家可以去了解一下前苏联的科拉深孔，还有同名的电影)。如前面所说，地下每深 30 米，温度上升 1 摄氏度(这只是估算，实际情况可能更甚)，可想而知下面几千米的深度，钻头就已经变成面条了。这对于电子元件和仪器材料都提出了非常高的要求，甚至是十分苛刻的。我们知道一般的电子元件的标准工业温度范围是 -20~+85℃，军品是 -40~+125℃，哪怕是航天级也只不过是 -55~+150℃。大家可以想像一下研发测井仪器到底有多难。有一部电影叫《地心末日》，其想像力比太空题材要丰富的多，大家可以看一下。

回到正题。测井仪器中大量使用了 DPSD，可以说这是一种基础性的方法，大家请看 8.3。

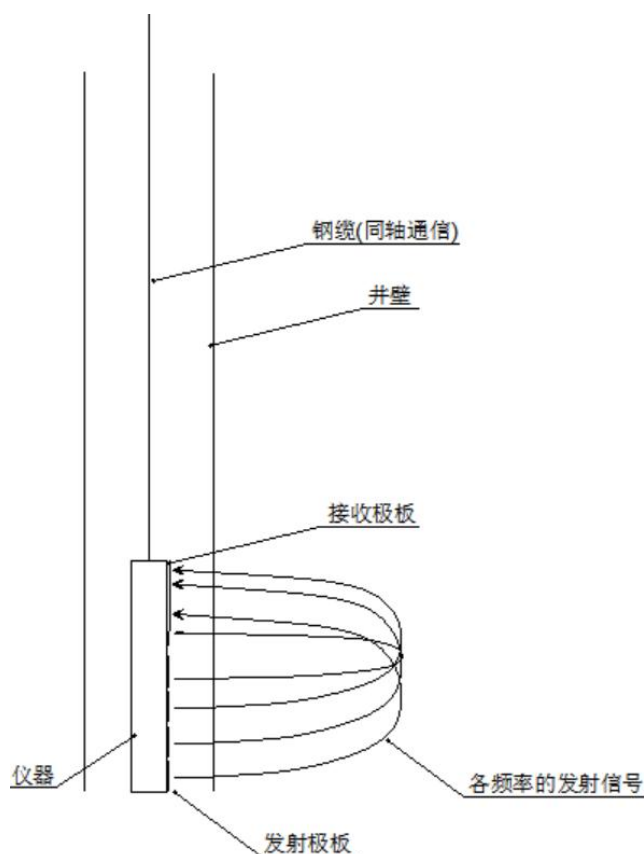


图 8.3 侧向测井仪器基本工作原理

上图描述了侧向测井仪器的基本工作原理,此类仪器主要的功能是用子地层电阻率的测量。它通过发射极板向地层中注入大功率的特定频率的电流,电流流经地层,产生相移与衰减,最终进入接收极板。很显然接收极板上接收到信号是混合频率的,我们需要将各个频率提取出来,计算其幅值与相位变化。发射通道可能会有很多,即接收信号会有很多种频率成分。通常这些通道的处理是同时的(各通道的检波结果会被代入电阻率计算公式),因此我们需要完成多路信号的同步采样以及计算,这需要高性能的 ADC 和 DSP。当时我主要负责的就是这部分,数据采集集中大量使用了 DMA,数据处理则不断精简优化算法,最终榨干 DSP 的所有性能。

说到这,可能会有人问:“石油深深的埋在地下,到底是怎样找到的?”没从事过石油行业的人可能对石油勘探不甚了解。石油人首先会去确定油气藏的大致区域,主要靠地表地形来进行初步的判断。一般呈凹陷形态的区域储油的可能性比较大,比如盆地。然后是验证,通常采用地震法,就是在确定的区域人为制造一场小地震,通过分析地震波来进一步定位油气藏的具体位置。接下来会在确定区域,钻很多的深井,将测井仪器放下去,从而探明实际油气藏所在的深度、范围,并评估储量。所以,测井这个环节是非常重要的。有很多作测井仪器的公司,它们研发仪器并对外提供测井技术服务。就像计算机行业有巨头 Intel、AMD、ARM 这样,测井行业也有几大巨头,比如斯伦贝谢、哈里伯顿等。什么?有人调皮的问:“南哥,那你当时在哪个公司?”你猜!

再多说一些。测井仪器是很大市场,相关产品也是类型繁多。单从测井方法上说就有侧向、中子密度、自然电位、超声,还有近些年比较流行的核测井。对这个行业感兴趣的同学,可以找相关资料看一下,还是很有前瞻性的。

OK, DPSD 在测井仪器中的应用就讲到这。

2.2 功率检测

2016~2017 年，我一直处于创业的状态。经朋友介绍，我认识了一个善于市场运作的哥们，他很有创业的热情。我以前也一直有创业的想法，自己在搞产品，甚至在作一些风口上的东西，比如共享充电宝等。但是并没有什么大的起色和成果，究其原因还是我把技术看得太重，或者说我更擅长技术研发，而并不擅长市场推广和销售，把技术转为价值。认识了这哥们之后，我觉得我俩能整出点动静来。而且，他的想法当时来看确实很有前瞻性和市场潜力，电动车共享充电柜。关于这一项目详细内容我们还是放到专门的章节去，不在这里赘述，我只介绍一下 DPSD 在其中的应用。

共享充电柜是按充电电量来收费的，它提供了一个可远程控制的 220V 插座，我通过采集等效电压与电流来计算电量，请看图 8.4。

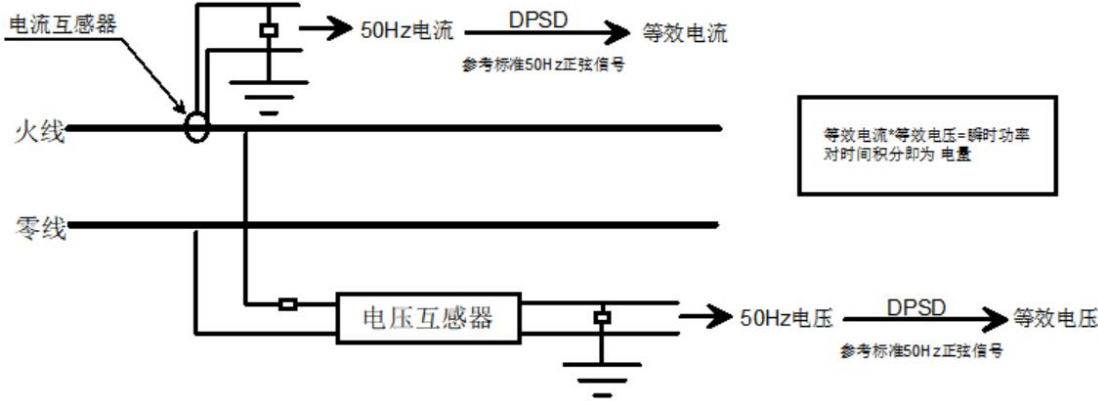


图 8.4 DPSD 在交流电量统计中的应用

我们使用单片机或 DSP，对互感器产生的 50Hz 交流电压和电流进行相敏检波，从而得到其等效值以及相位差，进而可以计算视在、有功和无功功率。

可能你会问：“有专门的电力计量芯片，何必自己搞？”主要还是成本考虑。现成的芯片，比如 ATT7022，价格基本在 10 元左右，而且互感器这些周边器件也不能少。其实我们对电量计算的精度要求并不高，因此使用软件算法来实现，可以使产品成本大幅下降。而且还可以简化电路，提高产品稳定性。

我想，现在很多工业和消费电子产品的功能越来越多，电路规模越来越大。这也许是各大芯片厂商不断提高采集器件和处理器性能的一个原因。把更多的功能交由处理器以数字方式来实现，比如滤波、信号提取等等。另一方面芯片的集成度越来越高，一颗芯片集成了 ADC、通信接口等，还有多核，甚至是异构多核（芯片中集成几种不同类型的处理器内核，如常见的 ARM+DSP、DSP+FPGA 等）。可以设想，以后电子产品基本上都会使用单芯片方案。实际上，现在很多产品已经向这个方向发展了，比如电视、机顶盒。

整体方案数字化是以后的大趋势，所以建议广大电子行业从业者学习一些编译、算法、数字信号处理的方面的知识，这样才会有发展。

2.3 电池内阻测量

2019~2022 年，我供职于清华的一家创业公司，主要作低功耗智能传感器。很多产品都是电池供电的，很长一段时间都在研究如何评估电池剩余电量。“什么电池？如果是锂电池那很好办，测量电池电压就行了。”确实，如果是锂离子电池的话，是这样的，网上有一张电池电压与剩余电量的对照表，如表 8.1。

表 8.1 锂离子电池电压与电量对照表

电压(V)	剩余容量	备注说明	电压(V)	剩余容量	备注说明
4.16~4.22	100%		3.77	45%	

4.15	99%		3.76	42%	持久电压点
4.14	97%		3.76	40%	
4.12	95%		3.74	35%	
4.10	92%		3.73	30%	
4.08	90%		3.72	25%	
4.05	87%		3.71	20%	持久电压点
4.03	85%		3.69	15%	
3.97	80%		3.66	12%	
3.93	75%		3.65	10%	
3.90	70%		3.64	8%	
3.87	65%		3.63	5%	
3.84	60%		3.61	3%	
3.81	55%		3.59	1%	
3.79	50%		3.58	0%	一般手机等设备此时会自动关机

但是很多一次性电池，比如磷酸铁锂电池，它们的电压与电量之间并没有明显的对应关系。剩余电量在 20%以上时，电池电压几乎没有什么变化。拿两串的电来说，电压基本都在 7.0~7.2V。当电量到达一定水平时，电压会发生骤降。那到底如何评估电量呢？电池内阻。

严格意义上来说，电池内阻与电量并没有直接关系。电池内阻是由其材料特性决定的。但是电池电阻可以反映电池放电的能力，由此我们可以大体估计其电量水平。

1、直流检测

如图 8.5 所示。

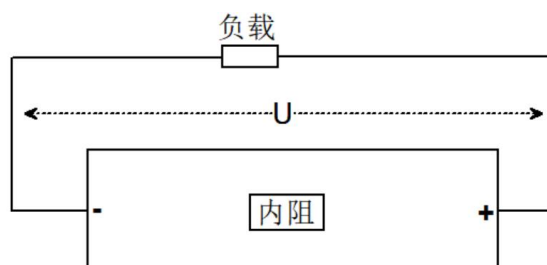


图 8.4 直流检测电池内阻的基本原理

我们在电池两端接入放电负载，在不同电流下，U 会有不同的电压值，由以下公式可以计算内阻：

$$r = \frac{U1 - U2}{I2 - I1}$$

但实际上电池的内阻都很小，在一定电流下的电压变化并不大，要准确测量并不容易。而且测量是在电池放电过程中进行的，这就使得测量更加不准。所以，实际上这种方法测内阻的重复性很差，结果可信度较低。

2、交流方法

如图 8.6 所示。



图 8.5 直流检测电池内阻的基本原理

向电池馈入一个交流电流信号，测量由此信号产生的电压变化即可测得电池的内阻。在实际使用中，由于馈入信号的幅值有限，而电池的内阻在微欧或毫欧级，所以产生的电压变化也在微伏级，信号很容易受到干扰，直接去采集如此小的交流信号（比如使用传统的过零或峰值检测方法）比较困难。此时，我们使用 DPSD 就可以很好的解决这个问题。因为 DPSD 有很强的选频特性，可以将干扰过滤掉。如果在信号前端再加上滤波器（可以是硬件或数字的），那效果就会更好。

2.4 风速风向检测

如果说前面的这几个应用，都算是比较传统的话，那这里要介绍的风速风向检测就是 DPSD 比较妖魔化的应用了，其背后是一种被称为声共振的技术，应该很多人都不了解，振南着重说一下，来满足一下大家的好奇心。

先说说传统的风速风向检测技术，这样在比较之下，大家才能认识到声共振技术的先进之处。

1、风杯式（旋转式）

这种风速风向仪应该是大家最常见的了，如图 8.6。



图 8.6 旋转风杯式风速风向仪

这种就不用多说了，原理一看就明白。什么？没见过？抬头看一下电线杆子上那个旋转的半球。有人说那是赶鸟用的，那个半球是小镜子，想像力也是挺丰富的。（以上文字仅代表振南本人观点，不一定对，网上有关于这方面的讨论，大家可以搜索看一下）

很明显这种风速风向仪是靠机械转动来实现测量的，其缺点就显而易见了：故障率高、

易老化，受天气影响较大等。尤其在结冰条件下，它基本形同虚设。

2、超声波风速风向

这种的原理也很简单，如图 8.7。

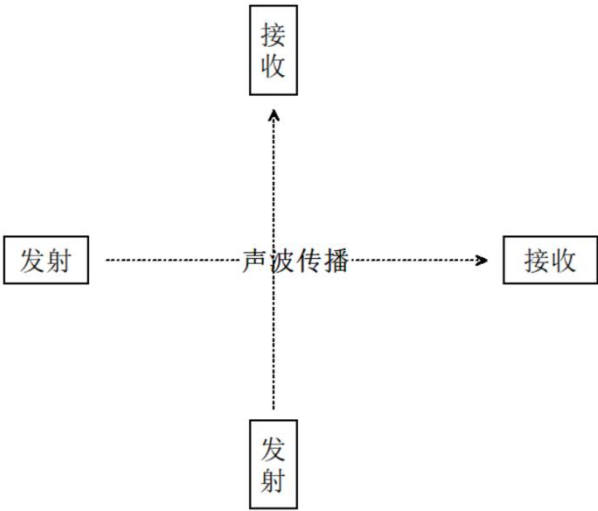


图 8.7 超声波测风速风向的原理示意

我们知道声波在静止空气中的传输速率是 $340\text{m/s}@15^{\circ}\text{C}$ 。所以，如果两点之间距离固定，那声波传播所需要的时间就是一定的。风的本质是空气的流动，顺风助力声波传播，逆风则阻碍传播。基于这样的特性，我们可以通过精确测量超声发射头与接收头之间的时间来评估风速（这种用到达时间来测速或测距的方法被称为 **TOF**，即飞行时间，又称时差法，这种方法应用甚广，比如现在很流行的 **UWB**、还有激光测距等，大家感兴趣可以深入了解一下）。两个正交方向上的风速作矢量和即可得到风向。这类风速风向仪看似高端，但实际上有一个很大的弊端，别忘了声速与海拔是有很大关系的。

说了这么多风速风向的测量方法，**DPSD** 的应用在哪里？振南老师你是不是写书写嗨了，跑题了！

别着急，马上就到 **DPSD** 了。

3、声共振风速风向

声共振技术，英文是 **Acu-Res**，是由英国 **FT Technologies** 发明的，依靠这一技术 **FT**（国内称风拓）已经成为全球最大的中高端风速风向仪研发和制造商，真可谓是一招鲜吃遍天。

引用 **FT** 官网的一些内容，如图 8.8。

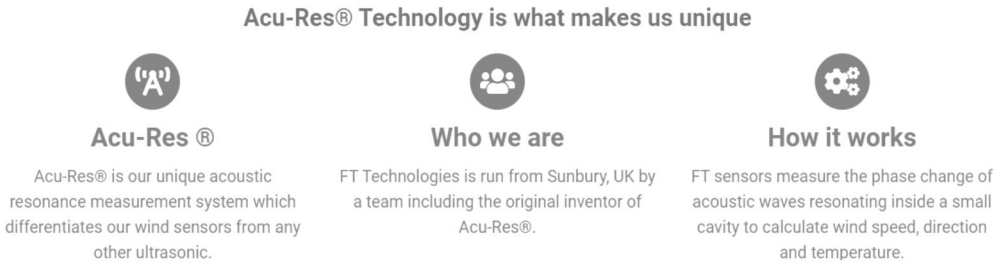


图 8.8 FT 官方对 **Acu-Res** 的介绍

大意是声共振技术是一项独立，而又不同于其它传统超声波风速风向的技术。它源自于英国山伯利团队的一项发明。它基本的原理是测量超声波在一个狭小腔体中的相位变化，从而计算风速风向和温度。



图 8.9 FT 风速风向仪产品效果图

官方不会深入去介绍，毕竟是它的核心技术。振南的团队为了验证这一技术，作了一些原型，如图 8.10 和 8.11。

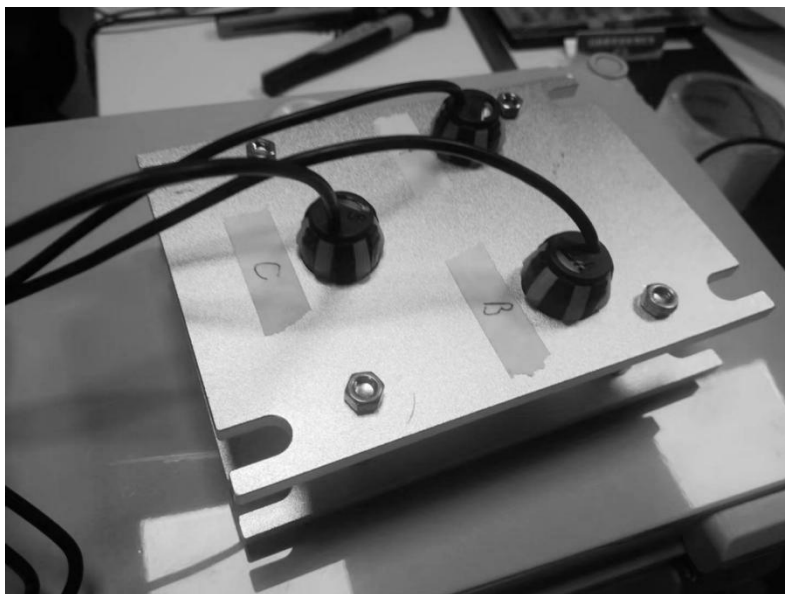


图 8.10 振南团队对于声共振技术的验证原型（俯视）

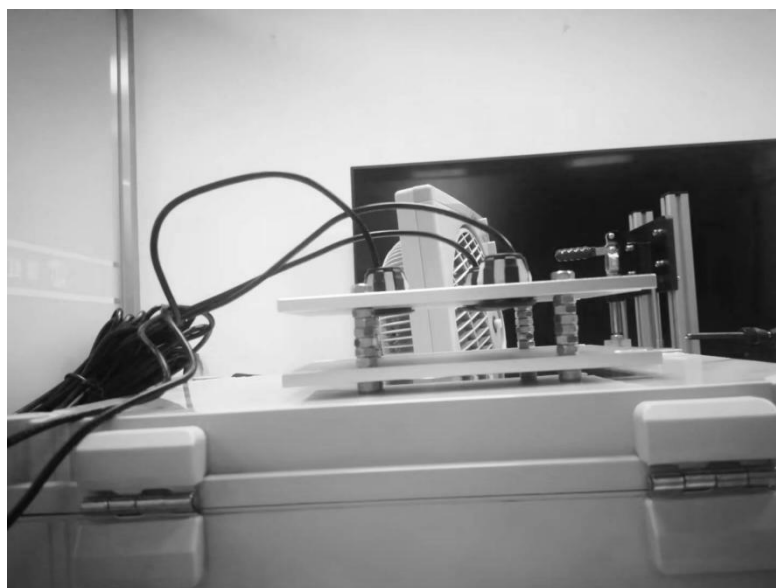


图 8.11 振南团队对于声共振技术的验证原型（俯视）

我们使用两片平行的铝板形成腔体（声波会在两种密度相差较大的材料界面上发生反射）。在上面的铝板上安装有 3 个呈等边放置的超声收发一体化探头（是从汽车倒车雷达上拆的）。我们拿出其中的两个，一发一收，如果把发射信号和接收信号放到一起来观察，会发现它们是几乎没有相位差的，也就是两个信号重合。

但是当我用风扇对着它们吹，就可以很明显的看到，两个信号产生相位变化，如图 8.12 所示。



图 8.12 声波在风吹作用下产生相位偏移

宏观上，我们可以理解为风把声波吹偏了。这个相位的变化可以使用 DPSD 来检测。那为什么要放 3 个探头？还要等边放置？请看图 8.13。

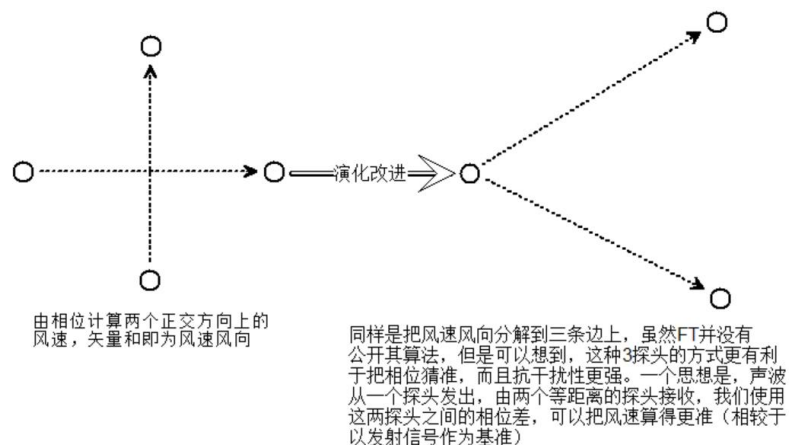


图 8.13 三探头方式具有更好的风速风向测量准确度

振南不再过多介绍，因为我也只不过是一些猜想。大家如果感兴趣，尤其是善于模型和算法仿真的同学，可以对声共振测风速风向深入研究一下。

“我基本理解了用声波相位测量风速风向的原理，但是这与声波共振又有什么关系呢？哪里共振了？”图 8.12 所示的波形其实就是共振后的效果。声波发射出来之后，会在腔体中经历几百次反射（也就是上下两片铝板之间）。这些波频率一致，最终会共振，振幅相互叠加，形成驻波。这使得声波信号被放大，从而更容易被采集。可以说，声共振测风速风向确实是一项了不起的发明，其根本上是物理基础研究成果和数学方法的应用。

其实本文一开始的公式还可以进一步推导下去，最终我们会发现根本不需要积分，从而可以降低计算量。经过再三考虑，这进一步的推导振南就不在这里展开了，因为这会就影响本书的可读性和接受度，也与我知识通过通俗易懂的方式传播出去的原则相悖。我曾经在国内核心期刊上发表过一篇名为《基于低通滤波的相敏检波算法改进与实现》的论文，感兴趣的读者可以百度一下。

OK，本章就到这里。