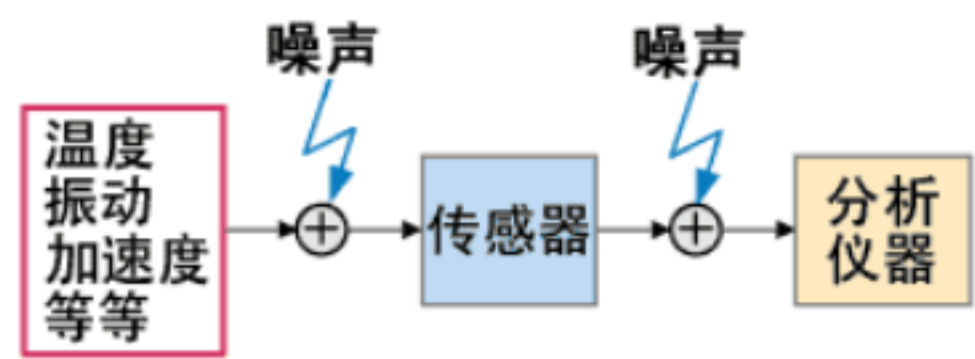


如何测量被噪声埋没了的信号？

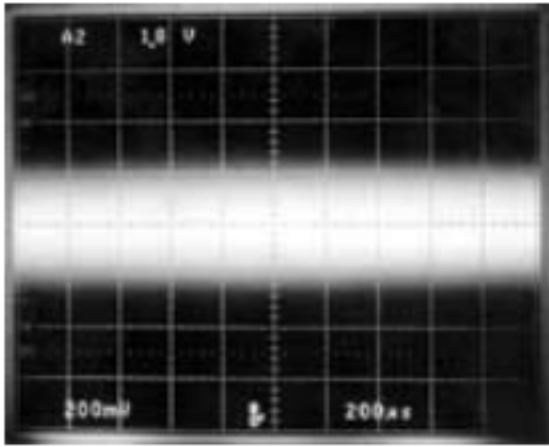
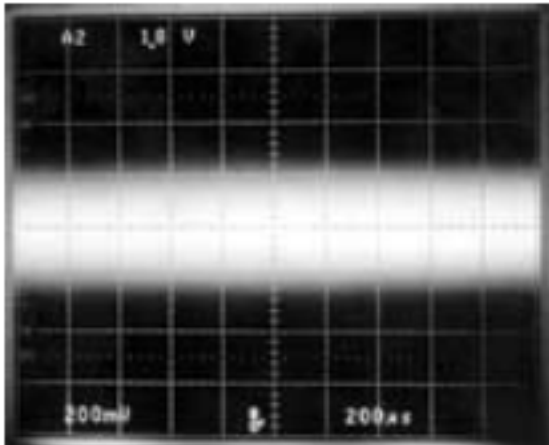
在测量各种物理量（温度、加速度等）时，用传感器将其变换成为电信号，然后输入到分析仪器（测量仪器）中去。但是，仅想获得必要的信号是很难做到的。通常是连不必要的信号（也就是噪声）也一起被测量了。在各种情况下，噪声都有可能混进来。



噪声并不仅限于电信号，也有包含在被测量的物理量中的情况。另外，根据不同场合，也出现噪声强度远远高出所需要的目的信号电平的情况。想要测量的信号越微弱，那么噪声就相对地越大。

在这里，让我们来看一下用交流电压表来测量不同电平的1kHz的正弦波信号的结果。在信号上叠加了0.1Vrms的白噪声。“毫伏计”是一般的交流电压表，“锁相放大器”是一种专门测量微小信号的（特殊的）交流电压表。

信号电平 （正弦波信号）	波 形 （叠加了噪声的波形）	毫伏计的 测量结果	锁相放大器的 测量结果
1Vrms		1Vrms	0.999Vrms
100mVrms		140mVrms	99mVrms

1mVrms		105mVrms	1.01mVrms
0.1mVrms		105mVrms	0.107mVrms

毫伏计也同时测量噪声。即使用数字万用表（ DMM ）来测量，也会得到与毫伏计相同的测量结果。

但锁相放大器，能在比目的信号（ 1kHz 正弦波 ）强 1000 倍的噪声中把目的信号几乎准确无误地检测出来。

在测量埋在噪声中的信号时，使用 锁相放大器 最为合适。

为什么锁相放大器具有那么强的抗噪声能力？

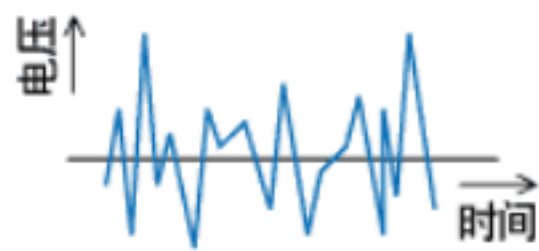
锁相放大器不容易受到噪声影响的原因， 是因为很好地利用了噪声 （白噪声）与目的信号（正弦波）之间在性质上的差别。

在这里， 我们一方面整理白噪声的性质和正弦波的性质， 一方面解说为什么锁相放大器会具有很强的噪声抑制能力。

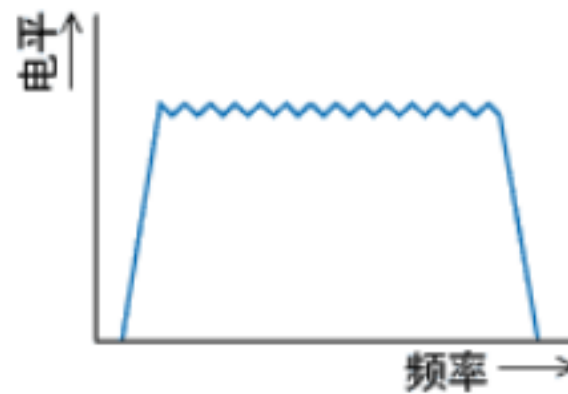
噪声的性质

平坦的频谱

在宽阔的频率范围内，该信号具有几乎相同的频谱。信号的瞬时电平成为预测不到的随机的值。



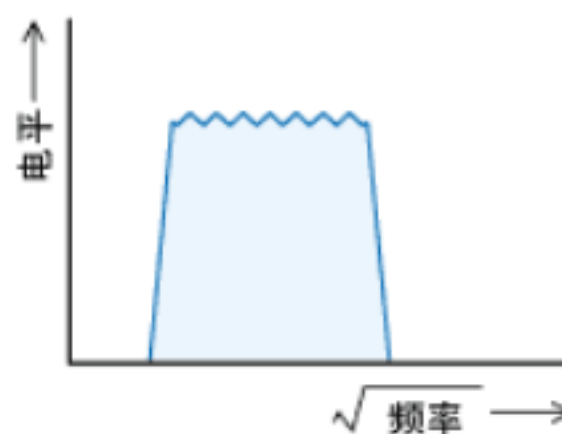
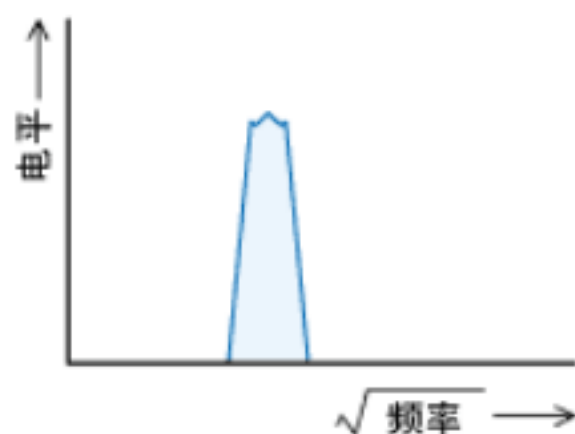
●白噪声的波形



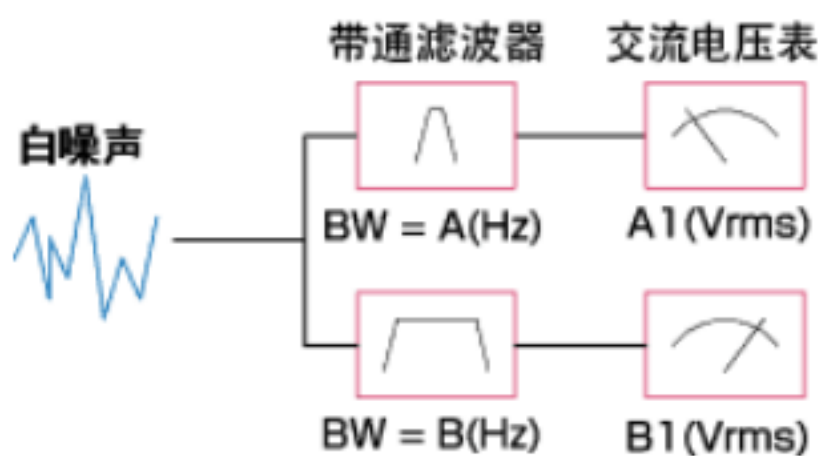
●白噪声的频谱

随着频带宽度不同测量电压会改变

在用毫伏计测量白噪声时，得到的测量值和白噪声所具有的频谱带宽（ BandWidth: B.W. ）的平方根以及电平成比例。测量得到的电压值，与下图中的浅蓝色部分的面积成比例。



即使对于同样的噪声，如果用带通滤波器（ BPF ）来限制所通过的频带，那么测量所得的电压值就会不同。



如果 $A < B$, 那么 $A1 < B1$

$$\frac{A1}{\sqrt{A}} = \frac{B1}{\sqrt{B}} = \text{噪声电压密度} [V/\sqrt{Hz}]$$

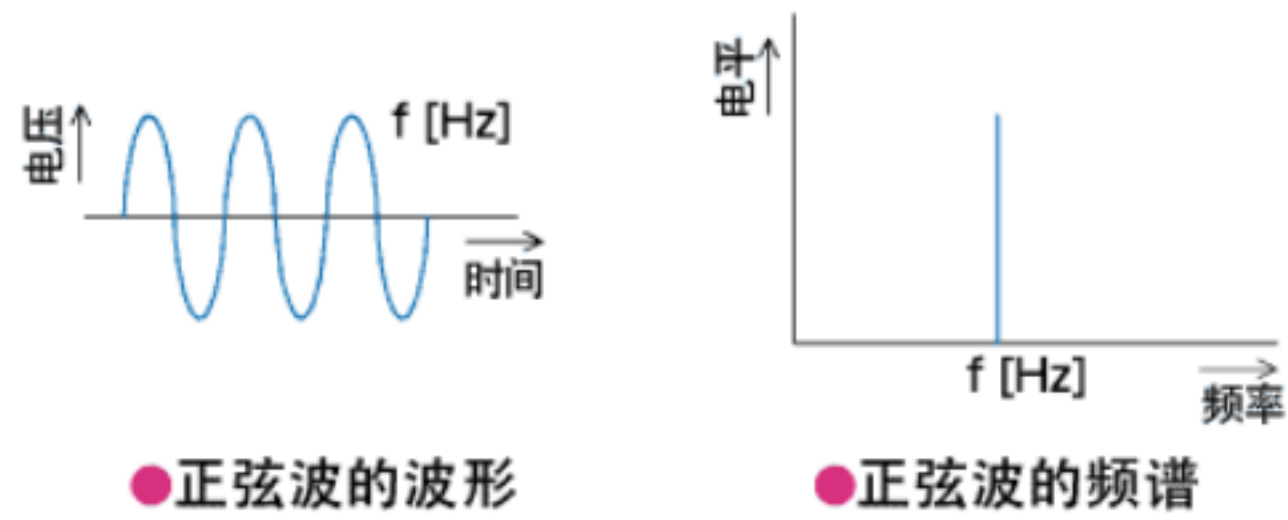
把测量所得的噪声电压（ V_{rms} ），除以频带宽度的平方根，就得到用表示噪声大小的单位、也即称作噪声电压密度（ V/\sqrt{Hz} ）来衡量的值。 频道宽度如果缩小到 $1/100$ ，那么测量所得的噪声电压就缩小到 $1/10$ 。

下面，让我们来看一看正弦波的性质

正弦波的性质

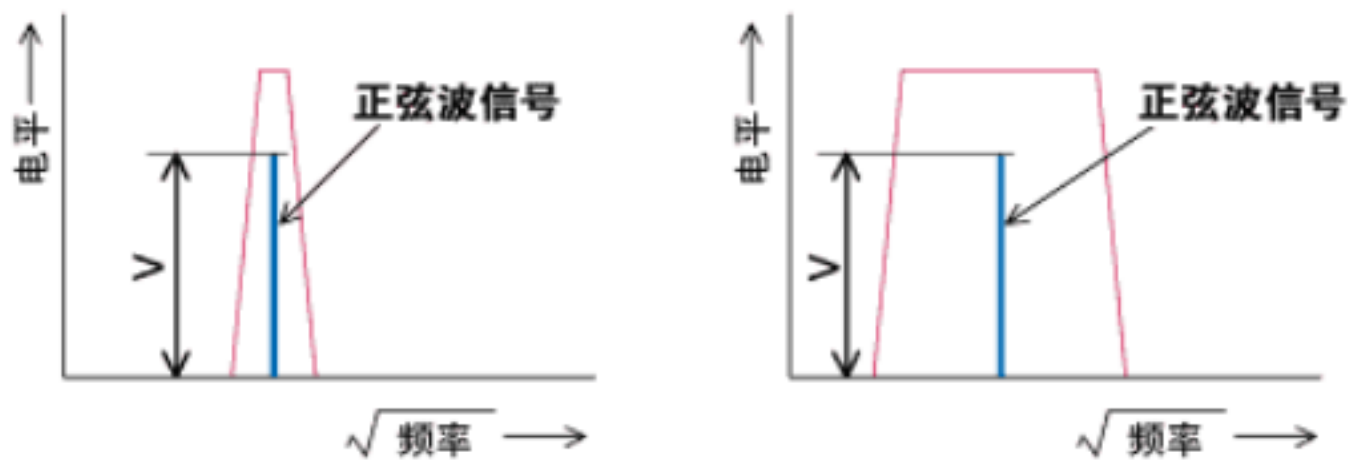
频谱非常集中

1kHz 正弦波信号的频谱，只存在于 1kHz 的位置，其他地方的频谱的电平都为零。

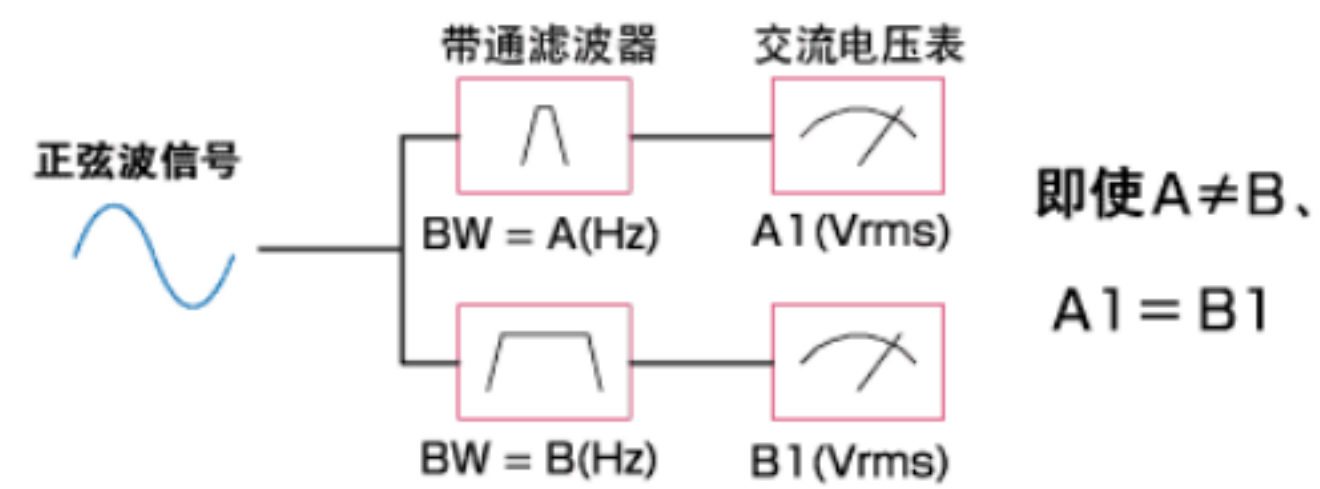


与频带宽度无关，测量所得电压保持一定的值。

因为频谱是集中分布的，所以不受频带宽度的影响，测量所得的电压保持一定的值。但是，必须要使信号频率存在于所取的频带之内。



用交流电压表所测量的电压值，与频带宽度无关，是上图中的 V 。



那么，在正弦波上叠加了白噪声以后会怎么样呢？

白噪声与正弦波合成的信号

即使白噪声与正弦波进行加法运算所得的信号，测量所得的电压对于频带宽度所具有的各种性质也不会有变化。

所以，当带通滤波器的频带宽度变狭窄时，就会有以下结果：

- 1. 想要测量的信号的电平不变；
- 2. 白噪声的强度减小；
- 3. 交流声等频率不同的成分也当然被削弱。

从以上这些结果可知， 为了测量被噪声所掩埋的信号，应该将 带通滤波器的频带宽度变窄。

如果将频带宽度缩小到 $1/N$ ，那么噪声就减小到 $1/N$ ，而信号却不改变，其结果 SN 比（信噪比）改善为 $1/N$ 。

但是，这样的带通滤波器也是有一个限度的。

为了说明「锁相放大器利用了噪声与目的信号所具有的不同性质，所以不容易受到噪声的影响」，前面已解说了以下几个要点：

- 噪声（白噪声）的性质；
- 正弦波的性质；
- 从白噪声与正弦波合成的信号中，使用带通滤波器可以使目的信号（正弦波）从噪声中浮现出来。

带通滤波器的限制

使通带变狭窄的限度

使用带通滤波器只让想要测量的频率信号通过，可以抑制噪声，让目的信号浮现出来。但是，使带通滤波器的通带宽度变窄，这也是有限度的。

在带通滤波器中，中心频率与通带宽度的比值称作 Q 值，作为衡量带通滤波器的滤波尖锐程度的一项指标来使用。

Q 值越大，通带宽度就越窄，抑制噪声的能力就越强。但是，一般的滤波器所能够实现的 Q 值，大约在 100 左右。对于 1kHz 的中心频率， 相应的通带宽度的限界大约在 10Hz 左右。Q 值不能任意增大的原因，在于组成滤波器的零部件的精确度和时间 / 温度的稳定性是有限的。

把带通滤波器与锁相放大器做一个比较。

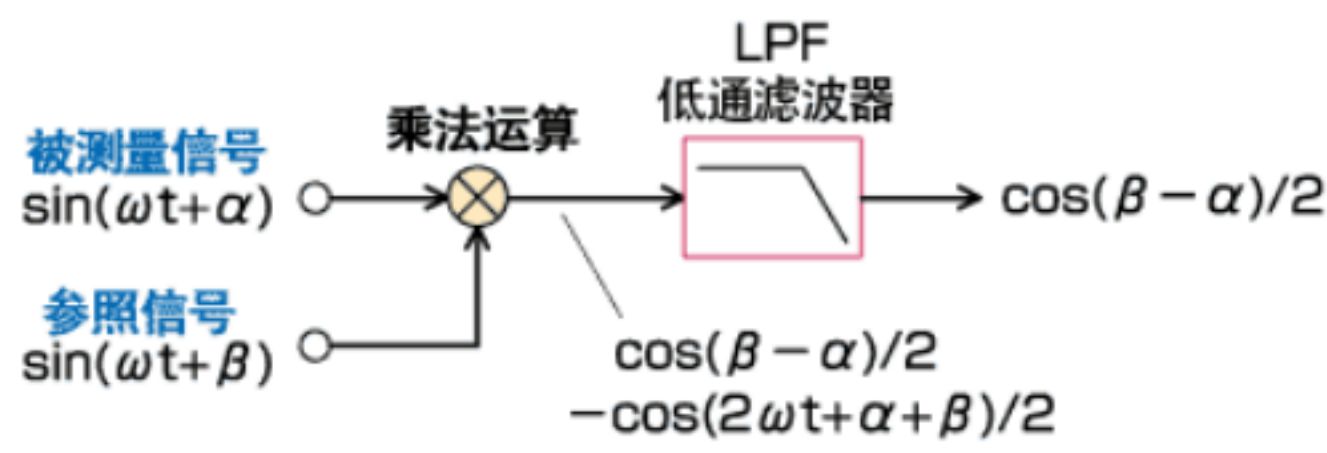
	Q（中心频率 / 通带宽度）	中心频率
带通滤波器	100 左右（10Hz@1kHz）	固定（不容易改变）
锁相放大器	$\sim 10^7$ 左右（0.1mHz@1kHz）	追随测量信号

锁相放大器用特殊的方法，使 Q 提高到约为 10^7 （通常的带通滤波器约为 100 左右），而且实现了一种特殊的带通滤波器，能够自动地将中心频率跟踪和保持在测量频率上。

请看介绍锁相放大器的构成！

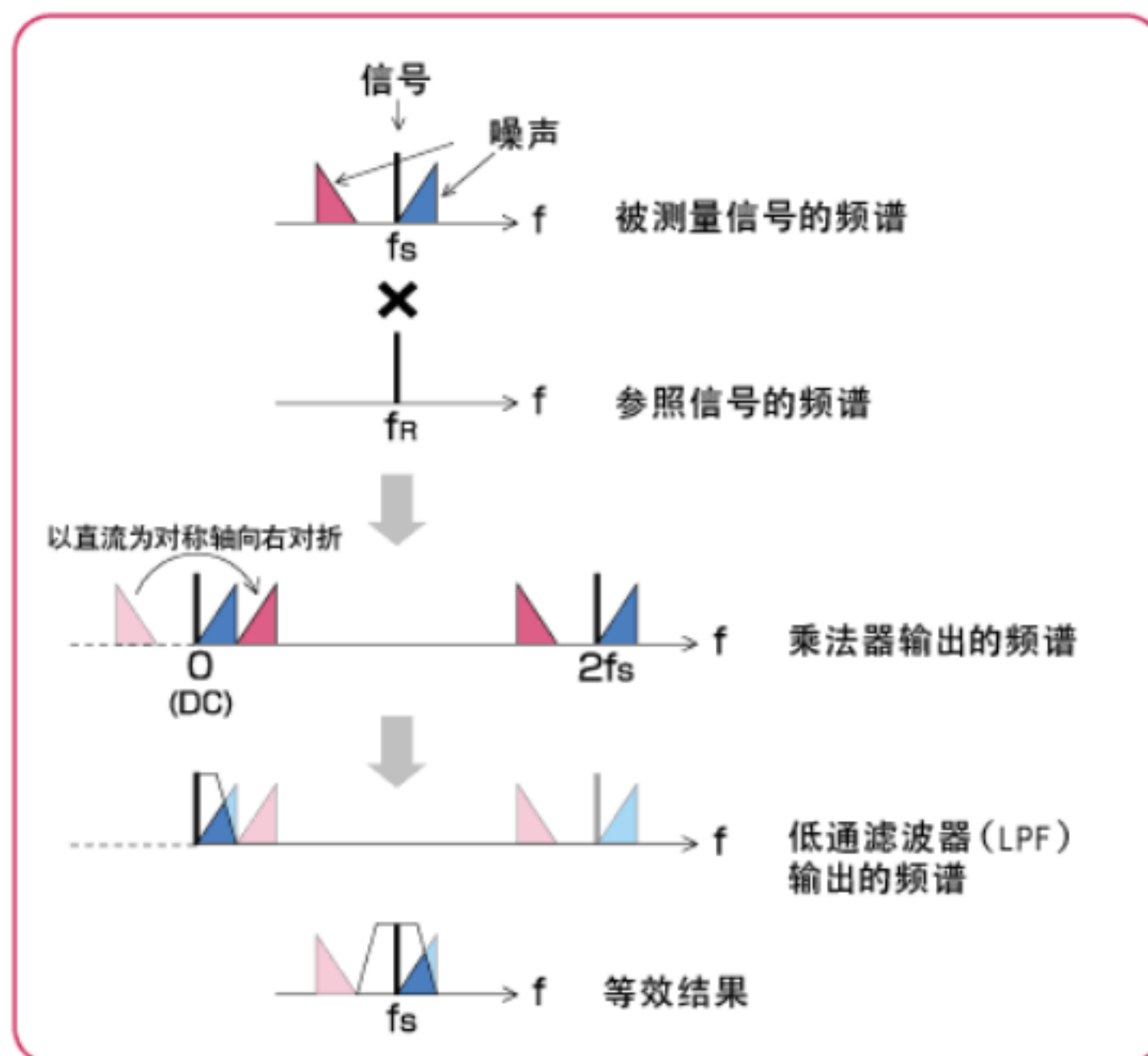
锁相放大器的构成

锁相放大器采用在无线电电路中已经非常成熟的外差式振荡技术，把被测量的信号通过频率变换的方式转变成为直流。



在外差式振荡技术中被称为本地振荡（ Local Oscillation ）的、用于做乘法运算的信号，在锁相放大器中被称为参照信号，是从外面输入的。锁相放大器能够（从被测量信号中）检测出与这个参照信号频率相同的分量。在被测量的信号里所包含的各种信号分量中，只有与参照信号频率相同的那个分量才会被转换成为直流，因而才能够通过低通滤波器（LPF）。其他频率的分量因为被转换成为频率不等于零的交流信号，所以被低通滤波器（LPF）滤除。

在频率域中，如下图所示。



锁相放大器对于噪声的抑制能力，是由上图中低通滤波器（LPF）的截止频率来确定的。例如，在测量 10kHz 的信号时，如果使用 1mHz 的低通滤波器（LPF），那么就等效于在使用 $10\text{kHz} \pm 1\text{mHz}$ 的带通滤波器时的噪声抑制能力。如果换算成为 Q 值，就相当于 5×10^6 。要想真正制造这样高的 Q 值的带通滤波器，那是不可能的。但是，使用锁相放大器，这就很容易实现了。

如同前面所解说的那样，在使用通频带非常狭窄的带通滤波器（BPF）时，如果其中心频率与被测量信号的频率有所偏离，那么就会产生测量误差，最糟糕的情况下可能会把被测量信号也滤除了。

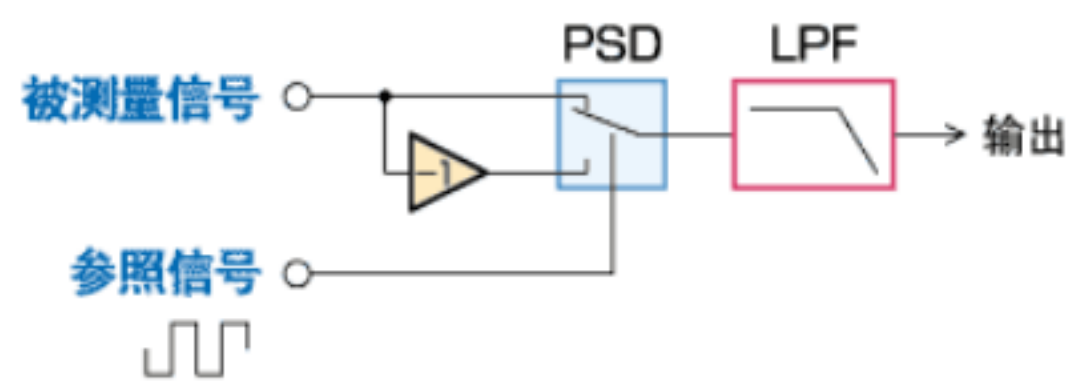
与这种情况相比较，对于锁相放大器来说，即使低通滤波器的截止频率多少有些偏离，只要还能够让直流通过，那么对测量结果也不会有大的影响。与带通滤波器相比较，锁相放大器更容易实现通频带非常狭窄的低通滤波器，不管通频带多么狭窄都能实现。由此可见，锁相放大器具有强大的能力从噪声中检测出被掩埋的信号。

那么，实际的锁相放大器又是怎样的呢？

使用 PSD（相敏检波器）作为乘法器。

如前面所解说的那样，频率变换是通过乘法运算来进行的。一般的乘法运算模拟电路，

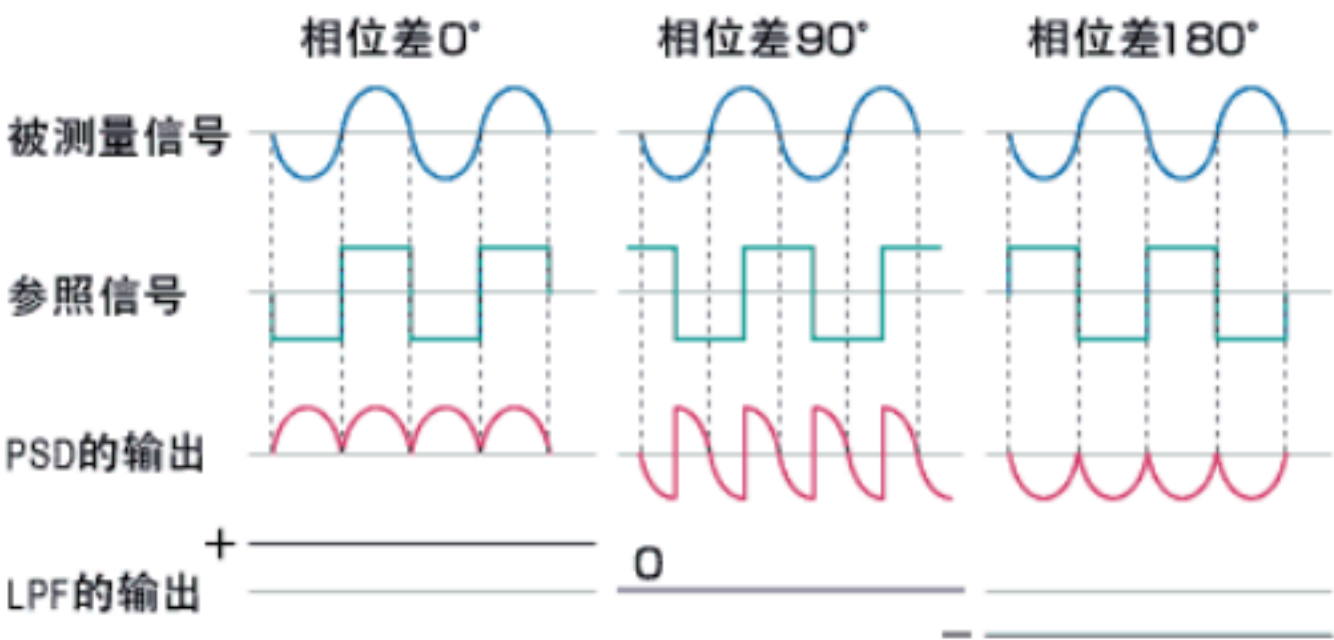
其 线性程度和温度稳定性都存在问题。所以，在实际的锁相放大器中，采用开关元件进行同步检波， 由此实现频率变换。 由开关元件所进行的同步检波电路， 称作 PSD（相敏检波器， Phase Sensitive Detector）,这是组成锁相放大器的心脏部分。



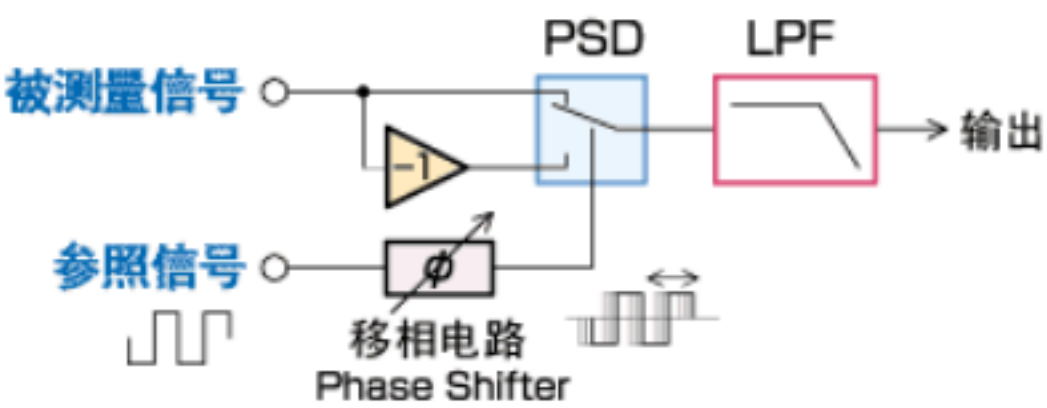
采用方波作为参考信号，与参考信号同步使被测量信号的极性翻转，也就是在 $\times 1/ \times (-1)$ 这两者之间进行切换。

需要进行相位调节。

如下图所示， PSD 的输出信号会由于被测量信号与参考信号之间的相位差， 而产生很大的变化。由此，低通滤波器（ LPF ）的输出信号（也就是锁相放大器测量所得到的值）也会产生变化。



除了相位差为 0 °之外，在其他状态下不能很好地测量被测信号的大小。 这样，就需要把参考信号与被测量信号之间的相位差调节到 0 °，然后再输入到 PSD。这个相位调节的电路，称作移相电路（ Phase Shifter ）,是锁相放大器中必不可少的电路。



上述的锁相放大器，称作「单相位锁相放大器」。 为了能够正确地测量振幅和相位，需要有

能够调节移相电路的「相位调节」部分。另外，如果将参照信号的相位移动 90° ，使用两个 PSD，那么也可以组成不需要调节相位的「双相位锁相放大器」。

最后，让我们来说明锁相放大器的一个重要参数——「动态保留」。

动态保留是什么

对于通常的电压表，是有测量量程的。在 10V 量程，能测量的最大电压为 10V 。如果超过了 10V 电压，那么就需要增大量程，例如，用 20V 的量程进行测量。

锁相放大器也是一种电压表，当然也有测量的量程。但是，锁相放大器是用来测量被掩埋在噪声中的微弱信号的，所以除了通常的测量量程之外，还具有被称之为「动态保留」的一个参数。该参数表示可以容忍测量量程的最大多少倍的噪声，由下面的公式来定义。

$$\text{动态保留 [dB]} = 20 \times \log_{10} \frac{\text{最大容许噪声电压 [V}_{\text{p-p}}\text{]}}{\text{测量量程 [V}_{\text{rms}}\text{]}}$$

对于几乎所有的锁相放大器，与被测量的信号在一起，「动态保留」是有若干个档级可以变更的。

例如，在一开始介绍的「[在要测量的 \$0.1\text{mV}_{\text{rms}}\$ 的目的信号上，叠加了 \$0.1\text{V}_{\text{rms}}\$ \(\$0.8\text{V}_{\text{p-p}}\$ \) 的噪声电压](#)」的那一个例子中，如果把测量量程设定为 0.1mV 量程，那么就需要有 78dB 以上的动态保留。

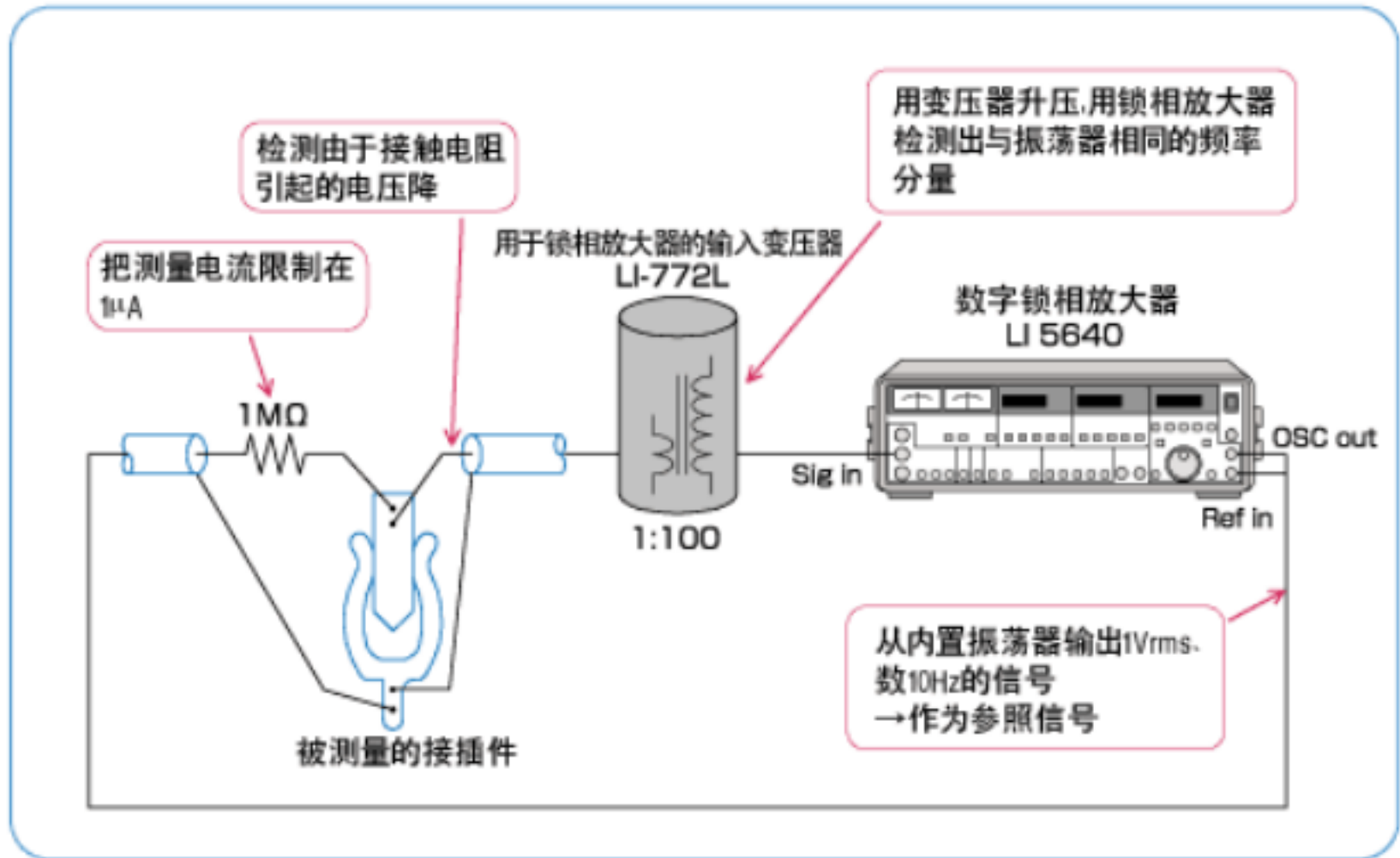
「用微小电流来测量接插件的接触电阻」

～是否用大电流来测量接插件的接触电阻？～

接插件的接触电阻，是通过电流流过接触点时所产生的电压降来进行测量的。在 JIS 等标准中，规定了测量电流为 $10 \sim 20\text{mA}$ 。但是，除了电源线以外，实际上真正使用这样大的电流的接插件几乎是没有的，这是实情。用于传递信号的接插件，在实际使用情况下的电流接近于 0 ，所以，用大电流测量所得的值很可能与实际的使用状态不同。

如果使用锁相放大器，那么即使是用以往在事实上不可能的 $1\mu\text{A}$ 左右的微小电流，也能够稳定地测量接触电阻。

测量框图



测量结果

零部件名称	电阻值
印刷电路板插头座	9.2m?
用于设备内部连接的插头座	3.9m?
用于设备之间连接的插头座	1.8m?
用于设备之间的金属插头座	1.1m?
小型拨动开关	1.2m?
集成电路插座	3.9m?



能够用 $1\mu\text{A}$ 左右的微小电流来测量接触电阻。

因为采用交流法进行测量，所以不会受到接触电位、温差电动势的影响。

「测量光源的方向特性」

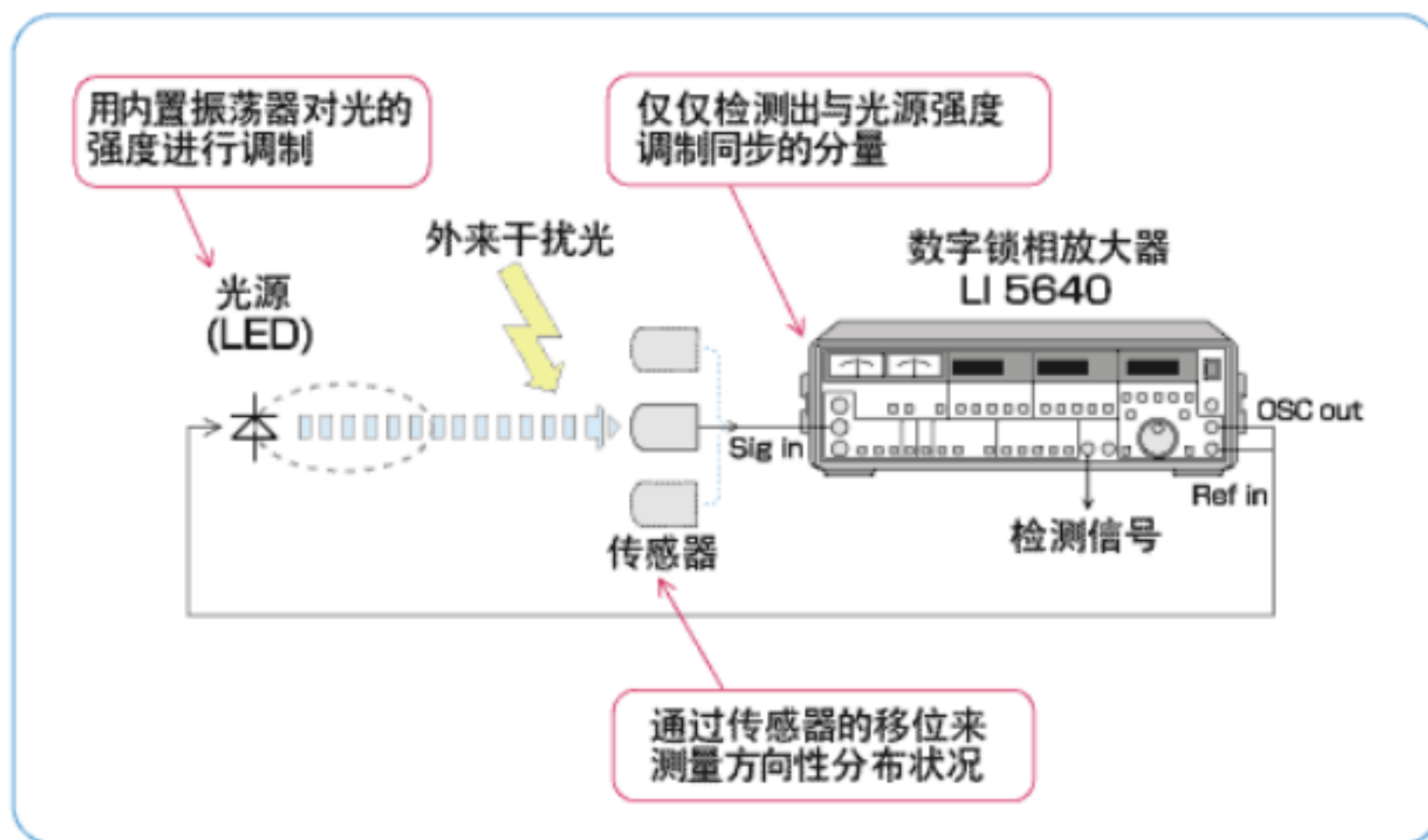
~ 有干扰光的影响，不会降低测量精度
吗？~

在进行光的测量时，为了避免外来光线的干扰，需要在暗室里进行测量，这是一般的常识。但是，不管设置多么好的暗室，也不可能使外来的干扰光线化为零。另外，在用红外光谱仪测量时，周围的温度本身就成为外来的干扰光线。

被外来干扰光线所掩埋的微弱光信号，如果使用锁相放大器，就能够「将外来干扰光线除去」、也就是「将噪声除去」，而仅将目的信号检测出来。

下面所示的是一个测量光源的发光强度分布状况（方向特性）。光源向着正面方向发射最大的光通量。越偏离正面方向，光通量就越少。

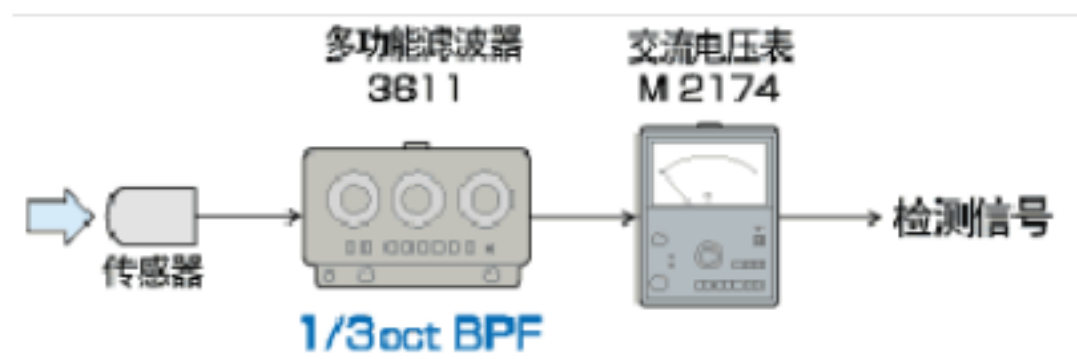
测量框图



在处理传感器检测出来的信号时，除了有上图所示的锁相放大器之外，也有使用下图所示的 交流电压表 + 带通滤波器 + 交流电压表 来进行测量的例子。

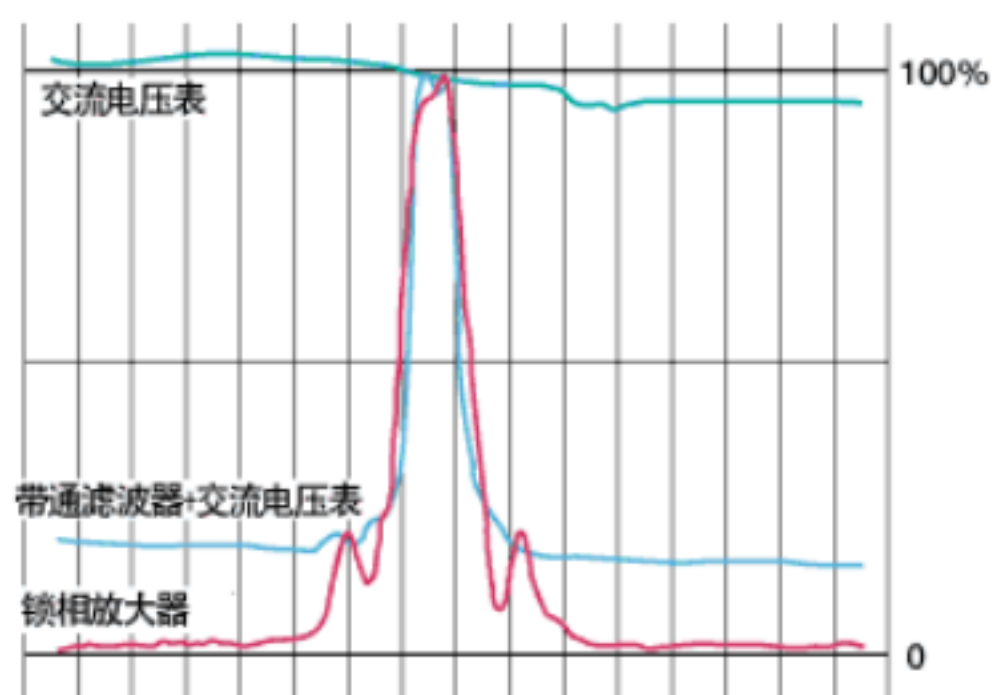


用带通滤波器限制通频带，再用交流电压表进行检测。



—— 用三种不同测量方法进行的测量结果比较 ——

测量结果



在使用锁相放大器进行的测量中，外来干扰光线的影响几乎都被消除。在使用交流电压表得到的测量结果中，所测量到的只是外来干扰光线的强度。



能够进行不受外来干扰光线影响的测量。

比被测量信号强 100dB ($=10^5$) 的外来干扰中，能够把目的信号检测出来。

可以进行 nV 量级的微弱电平测量。