踪注入信号缓慢变化;(3)输出幅度保持恒定,且能随输入信号功率而自动改变带宽,起自适应滤波作用。故保证了解调系统的宽带、大动态范围和线性。

3 实验系统及其测量

线性和非线性表面振动测量的实验系统如图11所示。系统中未采用固定移相器,而是通过微调载波(即Bragg Cell70MHz信号)频率来改变鉴相器两个输入信号之间的相差,来达到移相90°的目的。

采用双频差频法进行非线性测量

激光探针已广泛用于检测表面振动,但以往对激光探针光声信号的解调方法,由于系统的线性不够好,常附加相当大的非线性畸变,因而不能反应样品本身的非线性畸变。由于上述系统的良好线性,我们试着用这套系统来检测样品的非线性振动。

由于声非线性很弱,通常二次谐波分量远小于基波分量,而信号源输出信号中一般含有较大的谐波分量,故在测量二次谐波时,往往需要对送入样品的信号进行滤波。本文则采取双频差频法避开了滤波:将送入样品的信号(频率为f)先与一低频信号(频率为F)进行调制,实验中用一乘法器作调制器,即$\cos\ t\times\cos\ t=[\cos(\ +\ )t+\cos(\ -\ )t]/2$,其中$=2f$,$=2F$,可见所得信号中包含$f\pm F$频率分量,由于样品的非线性信号,即$A=A_0+A_1u+A_2u^2+\cdots$把$u=[\cos(\ +\ )t+\cos(\ -\ )t]$代入上式,得

$$\begin{aligned}A &= A_0+A_1[\cos(\ +\ )t+\cos(\ -\ )t]\\ &\quad +A_2[\cos^2(\ +\ )t+2\cos(\ +\ )t\\ &\quad \cos(\ -\ )t+\cos^2(\ -\ )t]\\ &= A_0+A_1[\cos(\ +\ )t+\cos(\ -\ )t]\\ &\quad +A_2[1+(1/2)(\cos2(\ +\ )t)\\ &\quad +\cos2(\ -\ )t+\cos2\ t+\cos2\ t]\end{aligned}$$

可见输出中包括$2f$,$2F$,$2(f\pm F)$等频率分量。另外由2路信号源的二次谐波($2f$,$2F$)经调制器产生了另三种频率组合$f\pm2F$、$2(f\pm F)$、$2f\pm F$等频率分量,这些谐波分量相对于基波只有30～40dB,再经过样品的非线性效应产生的$2f$、$2F$分量相对于由基频产生的$2f$、$2F$只有60～80dB,可以忽略不计。

用相关处理方法提取非线性分量电压,实验中利用二极管检波,产生低频信号的二次谐波($2F$),再经中心频率为$2F$的多路反馈无限增益带通滤波器滤波放大,得到$2F$信号,此路信号作为参考信号。将鉴相器信号的$2F$信号用同样的带通滤波器滤波放大,再与参考信号相乘,经积分器得一直流信号,此信号就能反映出样品的非线性。

这部分成功地代替了锁定放大器的作用。

采用鉴相器输出的$2f$信号的双频和频法,也能真实地反映样品的非线性。

4 结 论

实验结果表明,以ILSO为基础的相干解调系统,有许多优越之处,它使激光探针不仅用于线性测量,还可用于非线性测量。进一步完善该系统,通过移动样品,我们可以使该系统应用于非线性成像。

参考文献

1 Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1993; 12: 2051～2058

2 但森. 相干通信技术, 国防工业出版社, 1997; 11

3 吴伯修等. 调频技术理论及新发展. 人民邮电出版社, 1988; 5

4 Int. J. Electronics, 1985; 58(6): 963～967

5 林靖波. 声表面波注入锁相振荡器和信号提纯

6 Proceedings of the IEE 1965; 53(11): 1723～1727

$1/f$ 杂音探索

许生龙

(昆明物理研究所 昆明·650223)

文献[1]指出:"所谓$1/f$杂音,是功率谱与振动数f的倒数f^{-1}成比例时摆动的总称。同时也叫模糊(flicker)杂音或粉红色杂音。这一杂音,虽然在各种现象中都能普遍观测到,但从60年前就想解决这个问题,到现在也不知它的原因究竟在哪里。

除电路以外,能观测到$1/f$杂音的有,水晶片的振动、高速公路上的汽车流动、气温的季节变化、音乐、脉搏、神经纤维的膜电压等等[3]。之所以能在这

众多领域中找到, 可能是由某种非常普遍的单纯机制而发生的, 但正如最初所说那样, 现在还没一个令人满意的解释。

实验证实, 所有 $1/f$ 杂音都具有某种自相似性, 功率谱为[4] $S(f)\propto 1/f^{M}$, 其参数 M 一般不是整数, 却十分接近, 大多介于 $0.8\leq M\leq 1.2$ 之间。但令人困惑的不仅仅是 M 的量值不是整数, 即使对同一研究对象, 不同的测量可得到不同的 M 值。另外按 $S(f)$ 的表式、应有

$$\lim_{f\to o} S(f)=\infty$$

即在直流下应有众多的无穷大, 现实中并不如此。过去在对器件的研究中, 将 $1/f$ 杂音归咎于某些参数的 "不良" 影响, 显然用这些微观机理无法解释音乐、脉搏等中的 $1/f$ 杂音。因此有必要找寻另一种解释。如前所述, 由于 $1/f$ 杂音在十分广泛的领域中皆能观察到, 这就提示, $1/f$ 杂音的机理是宏观性的。本文从牛顿第二定律出发, 提出一种解释方法, 理论分析得出, $1/f$ 杂音系由测量而引发, $1/f$ 杂音是宏观领域中的 "测不准关系"。

首先研究一随机干扰 $F(t)$, 作傅氏变换

$$F(t)=\int_{-\infty}^{+\infty} B(f)\,e^{2\,\mathrm{i}ft}\,\mathrm{d}f \qquad (1)$$

$B^{*}(f)B(f)$ 定义为功率谱, 注意到对 $F(f)$ 的物理要求, 则可在 $f=0$ 处作泰勒展开

$$B^{*}(f)B(f)=\frac{L^{2}RT}{{}^{2}+f^{2}g(f)} \qquad (2)$$

其中: $g(f)=a_0+a_1f+a_2f^{2}+\cdots\cdots$。$R$: 克分子气体常数, T: 产生 $F(t)$ 的环境背景的绝对温度。显然(2)式的特例就是白噪声、维纳谱等。

下面考察一个 "物质集团", ("物质集团" 可能是原子、分子, 也可能是原子分于的聚集体, 也可能是宏观物体或是其他等等), 它由 N 个 "子物质集团" (m_k, U_k) 构成, $k=1.2,\cdots,N$。m_k 为编号为 k 的 "子物质集团" 的质量, U_k 则是该 "子物质集团" 在无外界作用时的速度。

下面假设这个被考察的 "物质集团" 受到探测信号 $A\mathrm{e}^{\mathrm{i}\ t}$ 的作用, 使得其速度由 U_k 变至 $U_k+\ U_k$。根据牛顿第二定律, 得运动方程

$$\mathrm{d}(\ U_k)/\mathrm{d}t=A_k\mathrm{e}^{\mathrm{i}\ t}+F_k(t) \qquad (3)$$

得到 $U_k=\dfrac{A_k}{\mathrm{i}\ m_k}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\ t}+\displaystyle\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{B_k(f)}{\mathrm{i}\ m}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\ t}\mathrm{d}f$ (4)

下面计算由 U_k 而引发的附加能, 得

$$W=\ E+\int_{-\infty}^{+\infty}\sum_{k}\frac{A_k^{*}\ B_k}{2m_k}\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\ -)t}\,\mathrm{d}t$$

$$+\int_{-\infty}^{+\infty}\sum_{k}\frac{D_n(\ -\ )}{m_k}\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\ -)t}\mathrm{d}t+\ \text{共轭项} \qquad (5)$$

其中

$$\begin{cases} W=\displaystyle\sum_{k}(1/2)\,m_k\quad U_k\ ^{2} \\ E=\displaystyle\sum_{k}\ A_k\ ^{2}/2m_k\ ^{2} \\ D_K(\ )=\displaystyle\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{B_k^{*}(f_1)B_k(f_1-f)}{4\ _1(\ -\ _1)}\mathrm{d}f_1 \end{cases} \qquad (6)$$

$$_1=2f_1$$

显然 W 就是由于 U_k 而引发的整个物质集团的附加能, E 则是所接收到的探测信号能, 其余各项则是噪声能。分析噪声能得知, 只有

$$S(f)=\frac{1}{2f}\Big[\ _k\frac{A_k^{*}\ B_k}{m_k}+\ _K\frac{A_k\ B_k^{*}}{m_k}\Big] \qquad (7)$$

才具有 $1/f$ 杂音特征, 它是探测信号与随机干扰相互作用而引发的噪声能。

如果考虑 $A_1\ \ A_2\ \ \cdots\ \ A_N$ 这一特殊情况, 并注意到(2)式, 则可导出

$$S(f)\propto\ \overline{RTE}/f \qquad (8)$$

下面计算(7)式中的求和项。若要求物质集团在被探测过程中保持宏观不变, 就必须 $A_k/m_k=\ a$; 因被考察的是同一类型的物质, 可得 $g_k(f)=g(f)$ 且用积分替代求和

$$_k\frac{A_k^{*}\ B_k}{m_k}=\ _k\frac{a\ \ L}{\overline{{}^{2}_{k}+f^{2}g(f)}}$$

$$\propto\int\frac{\mathrm{d}}{\overline{{}^{2}+f^{2\alpha}g(f)}}=\log\Big[\ \overline{{}^{2}+f^{2}g(f)}-\ \Big] \qquad (9)$$

共轭项也有同样的结果。再注意到 $K(T,E)$ 比例系数, 可能与绝对温度 T 及信号探测能 E 有关, 故最后得到 $1/f$ 杂音的功率谱为

$$S(f)=K(T,E)\quad\overline{RTE}$$

$$\cdot\ \log\Big[\ \overline{1+(f/f_0^{*})^{2}g(f)}-1\Big]\ /f \qquad (10)$$

其中 f_0^{*} 为该物质集团的 "标志频率"。由于在(10)式中含有两个任意函数 $g(f)$、$K(T,E)$, 故它可描述众多情况, 其中包含了前人的一切成果。若赋于 $g(f)$ 不同的函数结构, 就可获得从细节上来看相差很大的 $S(f)$, 见图1～图4。(10)式同时表明, 无论哪一种 $1/f$ 杂音, 在低频段内, 却又有着共同的频谱:

$$S(f)\propto\ \log f\ /f$$

下面对实验结果 $S(f)\propto 1/f^{M}\ 0.8\leq M\leq 1.2$ 进

行解释。仅以 $\log f$ / f 而论,在一定频段内,都可以改写成 C/f^M 的形状。下面是两个改写的例子:在 $10^{-4} \le f \le 10^{-3}$ 内, $\log f$ / f = 1.2778/$f^{1.1245}$, < 0.67%;在 $10^2 \le f \le 10^3$ 内, $\log f$ / f = 0.90350/$f^{0.82464}$, < 1.31%, 为两种函数的相对误差。其他频段,有完全类似的结果,至此可归纳几点:

由(10)式可知,为什么所有的 $1/f$ 杂音从总体上看都有十分相似的功率谱,特别是在 f 极小时,$S(f)$ 皆有同一数学表达式 $\log f$ / f。

理论预言 $S(f) \propto \overline{T}$,实验还未见报导。

由式(10),$S(f)$ 的大小,还依赖探测信号 E 的强弱。

$S(f) \propto \overline{E}$ 还可以解释诸如太阳黑子、汽车流动等等现象中的 $1/f$ 杂音。如果没有探测信号 E= 0,则 $S(f)$ = 0,即是 $1/f$ 杂音根本不会出现。

若不涉及随机干扰,也可导出 $S(f) \propto 1/f$。

假定用一正弦信号 $e^{2\pi i f t}$(因为它简单也最标准)去探测某一物质集团。此物质集团的状态由函数 $x(t)$ 描述。则至少要经过 = $1/f$ 时段之后,才能完成探测过程(也就是确实接收到完整的 $e^{2\pi i f t}$ 形状)。在从开始探测到结束这一时段内,物质集团的 $x(t)$ 变至 $x(t+$)、其变化量为

$$x = x(t+\ ) - x(t) = \ x/\ t$$

若将上式理解为偏离"平均值"的"随机起伏",即是噪声。由于噪声功率谱实质是能量概念。为获得准确值,需求"标准误差",并将此视为噪声功率谱,即

$$S(f) = \overline{\langle\ x)^2\rangle} = b \propto 1/f$$

其中 b 是 $x/\ t$ 的均方根值,故可认为是常数。

换句话说,探测讯号的频率越低,$S(f)$ 越发显示出 $1/f$ 杂音的特征。由于上述推导对 f 没有限制,因此可以认为 f 是以 0 为极限的。另一方面,无论使用什么频率的探测信号。在探测 $x(t)$ 的过程中,同时 $x(t)$ 也发生了变化。故此我们认为:$1/f$ 杂音是宏观世界中的"测不准关系式"。

虽然从形式上看,在 $f \to 0$ 时,有 $S(f) \to \infty$ 的趋势,但(5)、(6)式表明它贡献的能量是有限的。这符合经验常识。

如果换一个角度来理解,要进行 $f \to 0$ 测量,就必须花 $\to \infty$ 的时间,这在事实上办不到,因此也就不存在 $\lim_{f \to 0} S(f) = \infty$ 的问题。

排除 $10^{-2} \le f/f_0^* \le 10^2$ 中间频段, $\log f$ / f 函数在每一具体的频段内都可以改写成与经验公式完全吻合的式子 C/f^M。虽然 C、M 之值与所适用的频段有关,但是它的取值范围 $0.8 \le M \le 1.2$ 却与实验完全一致。

反过来可以解释为什么实验上求得的 M 的量值不固定?原因是不同的实验是在不同的频段内,M 之值是按直线方法获得的。这种求 M 值的方法本身就有问题,因此求得的 M 值不固定也就是十分自然的事情。

理论分析发现,对每一个具体的物质集团而言,都存在一个"标准频率 f_0^*"。它不仅与该集团的质料有关,可能还与其内部结构有关。不同集团的 f_0^*,量值可能相差甚大。故即使在同一频段 $f_1 \le f \le f_2$ 内,对甲集团而言,可能得到 M < 1;而对乙集团而言,可能得到 M > 1。这样就可以对不同的实验所获得的表面看来是矛盾的结果,得到合理的解释。

前面已述,由于在 $S(f)$ 中含有"任意函数——$g(f)$、$K(T、E)$"。赋予 $g(f)$、$K(T、E)$ 不同的形式,就会得到频谱特征截然不同的 $S(f)$,因此(10)式实际能描述一切 $1/f$ 杂音。这是本理论另一重要之点。而且理论分析表明,在中频波段,$S(f)$ 呈复杂情况。这即是说,对每一个具体的物质集团而言,一定有一个,而且仅有一个 $S(f)$ 变化复杂的频段范围,了解 $S(f)$ 在此的变化特征,可获得 及 $g(f)$ 的信息、$K(T \cdot E)$ 亦然。

感谢梁宏林、朱惜辰先生的帮助。

参考文献

1 高安秀树. 分数维. 地震出版社, 1994: 63~65

2 M · A · Caloyannides. J. Appl. Phys., 1974; 45: 307; F. N. Hoage. physica, 1976; 83B: 14

3 武者利光, 世界讲谈社 1980

4 朱惜辰、姚英. 红外研究, 1989; 8(5): 395~380