

用低速采样A/D板分析稳态高频信号

赵松龄 雷 彬

(上海, 同济大学声学研究所 200092)

数字信号分析技术中, 一般在时域采集一系列离散的样本信号来逼近连续的实际信号, 对采样有一定的技术要求, 这在有关信号处理的著作中有详细论述。^[1,2] 对于稳态的谐频信号, 通常要求在一个周期内采集到两个以上的样本, 即要求采样率不低于信号频率的两倍, 为此, 在分析高频信号时, 一般必须采用相应的高频采样的A/D板。

从实际情况考虑, A/D板的采样率除了受到它本身瞬态响应特性的限制外, 还受到计算机运算速率及数据贮存量等方面客观条件的制约, 并不能任意加以提高。因此, 如果采取适当措施, 能用低速采样的A/D板来分析高频信号, 则将具有重要的理论意义与实用价值。

要突破A/D采样率传统限制的主要技术

关键是要排除高频信号采样后产生频谱混叠的现象。设待测信号P的频率为f, 其瞬时值为

$$P(t) = Ae^{j(2\pi ft)} \quad (1)$$

A/D板的采样率记为 f_b , 即采样的时间间隔为 $T = 1/f_b$ 。在时域中采样后所得第n个样本值为

$$P_n = Ae^{j(2\pi nf/f_b)} \quad (2)$$

把频域划分成一系列带宽为 $f_b/2$ 的区间, 频率f可以写成下面的形式

$$f = \nu f_b + f_0 \quad (\nu = 0, 1, 2, \dots) \quad (3a)$$

$$\text{或 } f = \nu f_b - f_0 \quad (\nu = 1, 2, \dots) \quad (3b)$$

式中 f_0 为小于 $f_b/2$ 的正值。对于频率高于 $f_b/2$ 的高频信号, ν 值不为零, 在时域中采样后所得第n个样本值可改写为

$$P_n = \begin{cases} Ae^{j(2\pi nf_0/f_b)} & (f = \nu f_b + f_0) & (4a) \\ Ae^{-j(2\pi nf_0/f_b)} & (f = \nu f_b - f_0) & (4b) \end{cases}$$

上式表明, 频率为f的高频信号, 经采样分析后得出表观频率为 f_0 的低频信号。在式(4b)中指数取负号, 表示频域中相应的傅里叶系数应取其共轭值。这就是说, 在频域上频率高于 $f_b/2$ 的高频信号, 采样后会混叠到低于 $f_b/2$ 的频率范围内而产生严重的干扰。

目前, 避免这种混叠干扰的流行措施是采用低通滤波器把频率在 $f_b/2$ 以上的信号滤去。不过, 这样一来, 关于高频信号的信息也就同时丢失了。

我们认为, 对于给定的A/D板, 采取下

列措施可以克服采样后频谱混叠产生的干扰, 从而能有效地拓宽测试频率的范围。

1 采用带通滤波器

对带通信号直接采样时, 采样率可以不受传统的限制, 即它可以远低于带通信号最高频率的两倍。这就是说, 只要在测试系统中引入适当的带通滤波器, 原则上即可保证采样后不发生频谱混叠的现象。资料[3]中对带通信号的采样定理作了论述, 但文中着

重于选择适当采样率的一般步骤。对拓宽给定A/D板的应用范围方面未作深入讨论。我们对这种措施的理论基础与实际应用阐明如下：

在测试系统中引入一种理想的带通滤波器 F_v ，它只让频率在 νf_0 至 $(\nu + \frac{1}{2})f_0$ 范围内的信号通过，其中 ν 为零或正整数。对所得带通信号采样并作傅里叶变换，在频域上表现频率为 f_0 的傅里叶系数记为 $p(f_0)$ ，由式(4a)可知，它就是实际频率为 $f = \nu f_0 + f_0$ 的傅里叶系数，即

$$p(f) = p(f_0) \quad (5a)$$

$\nu = 0$ 时的情况对应于目前常用的采样条件。

同样，在测试系统中引入另一种理想的带通滤波器 G_ν ，它只让频率在 $(\nu - \frac{1}{2})f_0$ 至 νf_0 范围内的信号通过，其中 ν 为正整数。对所得带通信号采样并作傅里叶变换，在频域中表现频率为 f_0 的傅里叶系数仍记为 $p(f_0)$ ，由式(4b)可知，信号实际频率为 $f = \nu f_0 - f_0$ 的傅里叶系数为：

$$p(f) = p^*(f_0) \quad (5b)$$

式中， $p^*(f_0)$ 为 $p(f_0)$ 的共轭复量。

在实际应用时，只要保证带通滤波器的通频带处在 F_ν 或 G_ν 的通频带范围内，即可根据上述方法对带通信号进行频谱分析，并不受采样率必须高于待测信号频率两倍以上这一传统条件的限制。

作为应用实例，我们以A、B两个通道轮流采样的A/D板来分析稳态频带噪声信号。单个通道的实际采样率为13kHz，在信号源中引入三分之一倍频程的带通滤波器，设滤波器的中心频率为8kHz，则带通信号最高频率的两倍超过了单个通道的采样率，不符合常用的采样条件。现按通常的测试步骤，在单个通道对带通信号采集1024个样本，经傅里叶变换后所得表现的频谱如图1(a)所示。频率变化范围从0到6.5kHz，分辨率为6.3Hz，噪声频谱的表现中心频率为5kHz。由表现频率换算实际频率，根据式

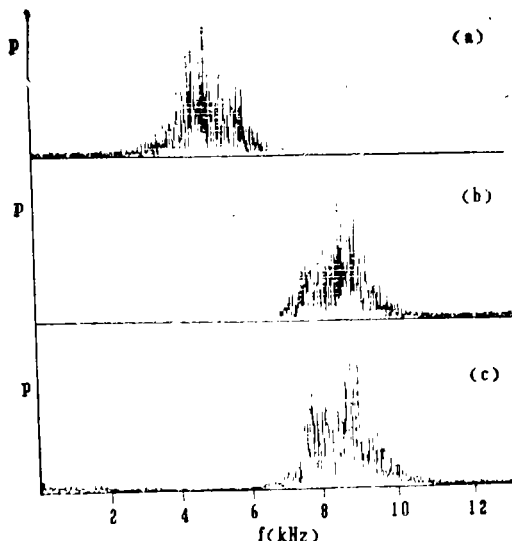


图1 中心频率为8kHz的1/3倍频程噪声频谱
(a)采样率为13kHz时的表现频谱
(b)恢复后的实际频谱
(c)采样率为26kHz时的常规频谱

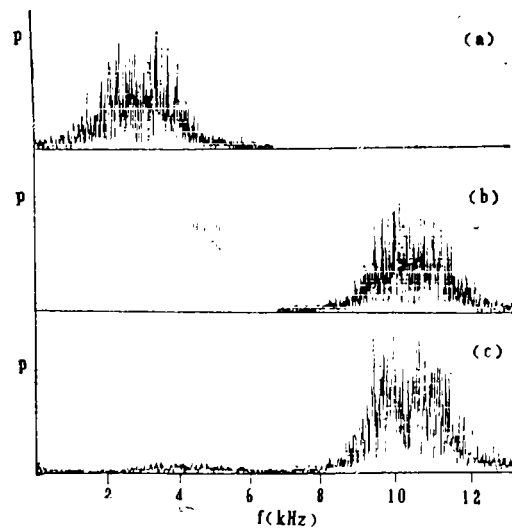


图2 中心频率为10kHz的1/3倍频程噪声频谱
(a)采样率为13kHz时的表现频谱
(b)恢复后的实际频谱
(c)采样率为26kHz时的常规频谱

(5b)得实际的频谱如图1(b)所示，频率变化范围变为6.5~13kHz，分辨率不变。为了作比较，把A、B两个通道轮流采集到的样本合并在一起，样本数加倍，采样的时间间隔减半而总时间保持不变，这相当于实际采样率提高为26kHz，从而符合了常用的采样

条件。对合并后的2048个样本作傅里叶变换, 所得“常规的”实际频谱如图1(C)所示, 频率变化范围为0~13kHz, 分辨率仍保持为6.3Hz。可以看出, 在测试频率范围内, 图1(b)和图1(C)实际上几乎完全相同。细微的差别来源于两通道不全同引起的随机误差。

与此相类似, 如果带通滤波器的中心频率改变而为10kHz, 相应的结果如图2所示。可以看出, 图2(b)和图2(C)也接近完全相同。

以上表明, 采用带通滤波器后可以突破传统采样条件的限制, 从而可以用低速采样的A/D板来分析稳态高频信号, 采样总时间与频谱分辨率保持与正常使用条件下的情况相同。

2 采用声延迟

在声学测量中往往需要作多点同步测量。在给定测点A处, 频率为 $f = \nu f_b \pm f_0$ 的高频信号与频率为 f_0 的低频信号采样后混叠在一起。当声波传播一定距离S而至另一测点B处时, 高低频信号的相位变化是不相同的。在频域中A、B两测点处所得的频谱按不同的规律变化。对于频率为f的高频信号, 傅里叶系数间满足:

$$p_B(f) = p_A(f) e^{-j(2\pi fs/c)} \quad (6a)$$

而对于频率为 f_0 的低频信号, 则得

$$p_B(f_0) = p_A(f_0) e^{-j(2\pi f_0 s/c)} \quad (6b)$$

式中, c为声速。因此, 尽管在A处频率为f和 f_0 的傅里叶系数相同或相共轭, 在测点B处两者一般是不相同的。把多点测量所得的数据经适当处理后, 可以把频谱混叠在一起

的高低频信号区分开来。

3 采用延迟重复采样

分析噪声信号时, 由于信号具有随机性, 重复采样所得数据一般并不具有重复性, 因此很难对信号本身获得根本性的改善, 只能通过作某种统计平均而减小其随机误差。如果对信号源加以控制, 使它能够重复再现, 并能精确地确定其起始点, 则采用信号处理技术就具有很大的优越性。这类具有再现性的噪声信号源至少可以用两种方法实现: 一是用一圈周而复始进行放音的磁带, 在磁带上录有噪声信号并录有作为起始点标志的窄脉冲信号; 二是采用伪随机噪声信号技术, 按一定规律发出不等间隔的脉冲信号。它可以重复, 对其起始点可以识别并准确定位。

采用这类信号源后, 重复采样所得数据原则上是可重复的。如果我们把前后两次采样的起始点延迟一段固定的时间 τ , 并设

$$\tau = T/N \quad (7)$$

式中, T为A/D板采样的时间间隔, N为正整数, 把重复N次采样所得的样本合并在一起, 使样本数增加N倍, 这相当于使A/D板的采样率提高N倍, 从而可以按通常的步骤, 用低速采样A/D板直接分析稳态高频信号。

参考文献

1. W. D. Gregg. Analog and Digital Communication. John Wiley and Sons, 1977.
2. 刘文生, 李锦林, 取样技术原理与应用, 科学出版社, 1981.
3. 杨福生, 戴先中, 带通信号的采样定理, 信号处理, 1986; 2(1): 58—61.

与诊断, 1989, 9(4):12

2. 汤和, 用噪声谱分析法定量诊断齿轮磨损, 天津大学学报, 1989, 22(2):4

3. 何正嘉, 屈梁, 生信号功率谱的再处理方法, 动态分析与测试技术, 1989, (3)

4. 蔡元龙, 模式识别, 西北电讯工程学院出版社, 1986. 6

(上接13页)

方法。希望这些工作能对实际中类似于蜗杆蜗轮传动装置的这一类特殊机械的故障诊断能有所启发和帮助。

参考文献

1. 鲍明, MDS-1轴承故障诊断系统, 振动测试