非线性声参量测量中的衍射修正*

孙永臣　董彦武
(陕西师范大学应用声学所)

在超声传播参数的测量中，衍射效应会给测量引来假象。本文结合前文[1]中的实验问题，讨论了衰减及非线性声参量B/A测量中的衍射修正问题。证明加入此修正后的测得值更加可靠。

引　言

在前文[1]中，我们研究了生物组织的非线性声参量B/A。在测量的过程中，由于收发换能器之间的衍射效应，会使测得的结果不很准确。因此需要对衍射带来的影响做修正，以及对介质衰减的影响给出一个恰当的评价。再者由于换能器的非理想情况（厚薄不均，极化不均匀，边缘不圆，无穷大刚性障板的条件不能满足等），使得在讨论衍射问题时，不能得到很好的结果，因此也需要对这种非理想条件影响做出评价。

本文结合前文[1]中的实验，讨论了发射、接收换能器同样大小时，基波、二次谐波的衍射修正，以及换能器半径的测量对超声传播参数测量的影响。

一、基波的衍射修正

在半径为 a 的发射器发射声波的理想情

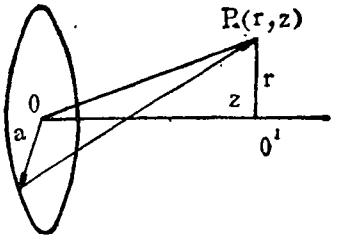


图1　换能器发射示意图

* 中国科学院科学基金资助的课题。

Eds. New York: Plenum, 1982
[2] R. Jost and W. Kohn, "Construction of a potential from a phase shift," Phys. Rev. Vol. 87, No. 6, PP. 977-994, Sept. 1952
[3] H. Moses, "Calculation of the Scattering Potential from Reflection Coefficients," Phys. Rev. Vol. 102, No. 2, PP. 559-567, Apr. 1956
[4] R. T. Prosser, "Formal Solutions of Inverse Scattering Problems I, " J. Math. Phys. Vol 10, No. 10, PP. 1819-1822, Oct. 1969
[5] R. T. Prosser, "Formal Solutions of Inverse Scattering Problems II, " J. Math. Phys. Vol. 17, No. 10. PP. 1775-1779, Oct. 1976
[6] R. T. Prosser, "Formal Solutions of Inverse Scattering Problems III," J. Math. Phys. Vol 21, No, 11, PP. 2648-2653, Nov. 1980
[7] Z. Q. Lu ,"Multicimensional Structure Diffraction Tomography for Varying Object Orientation through Generarized Waves," Inverse Problems, Vol. 1, No. 4, PP. 339-356, Nov. 1985
[8] I. M. Gel'fand and G. E. Shilov, Generized Functions, Vol. 1, New York: Academic, 1953
[9] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, New York: McGraw-Hill, 1968

况下，发射轴上的声压为

$$P/P_0=1-\exp[-ik(\sqrt{z^2+a^2}-z)] \tag{1}$$

其中 $P_0=\rho CU_0\exp[i(\omega-kz)]$，为换能器作均匀发射时表面上的声压。$\rho$，$C$，$U_0$，$\omega$，$k$分别为介质密度、声速、初始振速、角频率和波数。$z$为与源换能器的距离。当用一半径为 b 的小接收器与源换能器同轴接收其近场时，由于接收换能器面上的相位抵消效应，其响应为

$$\bar{P}/P_0=1-\frac{2\sqrt{z^2+a^2}}{Kab}J_1\left(\frac{kab}{\sqrt{z^2+a^2}}\right)\cdot\exp[-ik(\sqrt{z^2+a^2}-z)], \tag{2}$$

式中$\bar{P}$表示平均声压。由文献[2]知，当发射与接收换能器的半径均为 a 时，则得到的平均声压为

$$\bar{P}/P_0=A+iB \tag{3}$$

其中

$$A=1-\frac{4}{\pi}(C\ \cos kz+D\ \sin kz)$$

$$B=\frac{4}{\pi}(D\ \cos kz-C\ \sin kz)$$

$$C=\int_0^{\pi/2}\cos[f_1(\theta)]f_1(\theta)d\theta$$

$$D=\int_0^{\pi/2}\sin[f_1(\theta)]f_2(\theta)d\theta$$

$$f_1(\theta)=k(z^2+4a^2\cos^2\theta)^{1/2}$$

$$f_2(\theta)=\sin^2\theta$$

即在没有衰减的情况下，由于衍射的作用，随着发射与接收换能器间距离的增大，接收到的信号逐渐变小。当有衰减时，上式中应有

$$f_2(\theta)=\exp\left[\left(\alpha z-\alpha z\left(1+\frac{4a^2\cos^2\theta}{z^2}\right)^{1/2}\right)\right]\sin\theta$$

应用计算机，以上的修正容易算出。

但是，由于(3)式很复杂，在做其它推导的时候，需要得出(3)式近似的解析式。Bass[3]给出了一个平均压力振幅随距离 z 变化的表达式

$$\bar{P}(z)=P_0\left\{1-2[\pi\zeta(z)]^{1/2}\left(1-\frac{\zeta^2(z)}{2K^2z^2}\right)+2[\pi\zeta(z)]^{-1}\left(1-\frac{\zeta^2(z)}{2K^2a^2}\right)^2\right\}^{1/2} \tag{4}$$

其中 $\zeta(z)=k[(z^2+4a^2)^{1/2}-z]/2$，$P_0$ 为源声压振幅。在$a<z<\frac{k^2a^2}{2\pi}$的范围内，此式的准确度在2% 以内。应用上式，可对衰减测量时的误差进行修正。

二、二次谐波的衍射修正

当一个正弦波在介质中传播时，由于介质的非线性，在传播了一定的距离之后将会产生高次谐波。谐波的产生将使波形发生畸变，畸变的程度与声波的强度及介质的非线性特性有关。在间断性波前出现之前，二次谐波的声压可以表示为

$$P_2=P_{10}^2\frac{\gamma+1}{4}\ \frac{\omega z}{\rho_0C_0^3}\sin2\omega\left(t-\frac{z}{C_0}\right)$$

故有

$$\frac{B}{A}=\frac{P_2}{P_{10}^2}\ \frac{4P_0C_0^3}{\omega z}-2 \tag{5}$$

其中$\gamma=B/A+1$，B/A为非线性声参量，ω为基波角频率，P_{10}和P_2分别为基波和二次谐波的声压振幅。

考虑到实际介质中声波的衰减及声波本身的衍射效应，实际中二次谐波的声压振幅可以表示为[1]

$$P_2=\frac{P_{10}^2\omega}{2\rho_0C_0^3}\beta\cdot(I_1-I_2) \tag{6}$$

其中

$$I_1=(e^{-2\alpha_1z}-e^{-\alpha_2z})/(\alpha_2-2\alpha_1) \tag{7}$$

$$I_2=Q\left(\int_{z/2}^{z}e^{2\alpha\theta}[(\theta^2+4a^2)^{1/2}-\theta]^{-1}d\theta\right.$$

$$\left.\frac{1}{8a^2}\int_{z/2}^{z}e^{2\alpha\theta}[(\theta^2+4a^2)^{1/2}\right.$$

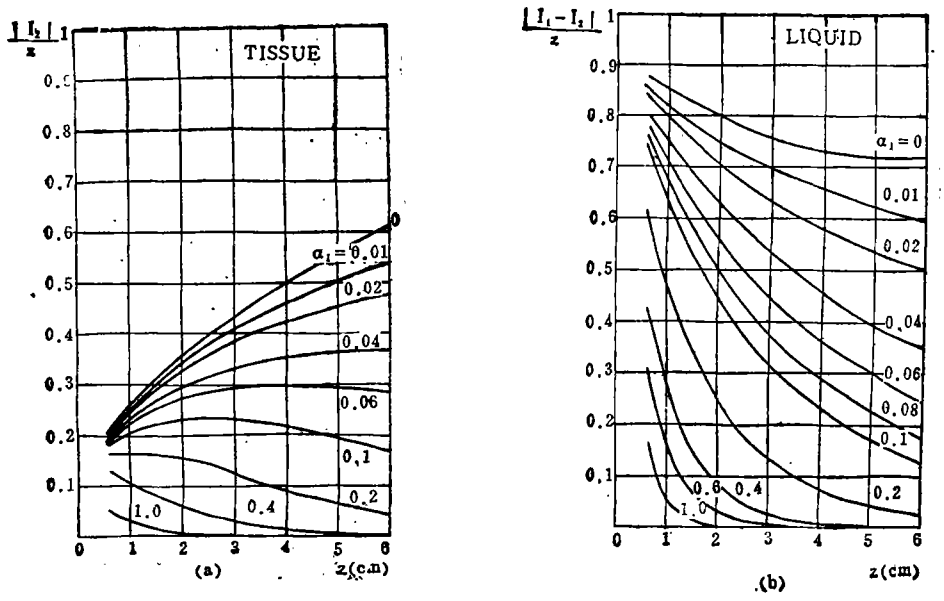


图2 衰减不同的液体里衍射及衰减对二次谐波的修正。
其中(a)为衍射的修正，(b)为衰减与衍射叠加的修正

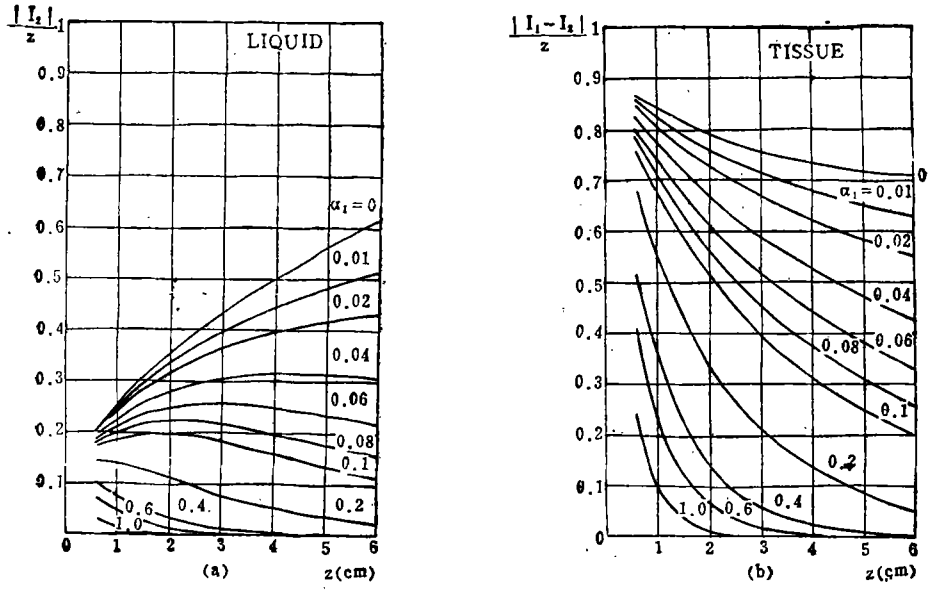


图3 衰减不同的生物组织里衍射及衰减对二次谐波的修正
其中(a)为衍射的修正，(b)为衰减与衍射叠加的修正。

$$-\theta]^{3/2}d\theta\Big) \qquad (8)$$

这里$Q=8e^{i\pi/4}/(\pi k)^{1/2}]\exp[-2(\alpha_2-\alpha_1)z]$，$a=\alpha_2-2\alpha_1$，此式要求条件为$Ka\sim100$，$1<z/a<10$，此范围之外误差较大。

在我们的实验条件下，应用的样品其声速与水中声速接近，在计算中取水中声速为1495m/s，用测量系统的有效半径（见下节）a为半径，以消除采用几何半径做修正给测量带来的误差。本实验所用收、发换能器半径均为7.0mm，实验测量结果得出系统的有效半径为6.00mm（见下节）。基波频率2.00

MHz，z值取a～$10a$之间，此处即6～60mm之间。因为在此范围之外，由式(8)的适用范围可知该式误差较大。计算结果如图2、3所示。图2代表液体中衰减不同时衰减和衍射的修正曲线，在计算中取衰减系数$\alpha_2=4\alpha_1$。其中图2(a)为仅有I_2的曲线，图2(b)为I_1-I_2的曲线。图3为在生物组织情况下衍射和衰减的修正曲线。衰减系数取$\alpha_2=2^{1.2}\alpha_1$，这是因为对于大多数组织，$\alpha=a\cdot f^d$，d在1.1到1.3之间，f为频率。图3(a)，图3(b)的意义与图2相同。在具体应用中，可以作出以上参量均为实验值时的修正。在这些图中，为了便于看到衍射和衰减修正后与理想情况的比较，纵座标都是与z相比过的。可以设想距源换能器为1.5cm的例子，理想情况下，此比值应为1。而当基波衰减为0.1奈泊/厘米时，则按式(7)可得平面波情况修正为0.6400，而衍射修正为0.1988，叠加后得到修正值为0.5188。

由Q的表达式可知，在I_2中含有一项$e^{ix/4}$，因而在I_1与I_2相叠加的过程中，不但应计入模量，且应计入相位的关系。根据Ingenito和Williams[5]的计算，当z每经过一个a时，则相位可能改变1°。因此，模的计算应用下式

$$|I_1-I_2|=[|I_1|^2+|I_2|^2-\sqrt{2}|I_1||I_2|]^{1/2}$$

在以上的运算中，即应用此式。

三、有效半径及其测定

由上面的讨论，要想做出衰减，声速，非线性声参量的准确测量，都需要加入衍射的修正。衍射修正的大小，与收、发换能器间的距离、发射频率、介质声速、以及换能器本身的特性有关。当发射的距离和声速都有了准确的测定之后，修正主要由发射换能器的半径a决定。由于换能器本身的极化不均匀性，以及边缘圆度、互辐射阻抗等因素的影响，无穷大障板的条件不能满足等，使得换能器的辐射不能满足$u(o,\ t)=u_0\sin\omega t$，$(r<a)$的边界条件。这些因素综合起来，使我们在做衍射修正时所得的结果不很理想。其解决办法归结为在做衍射修正时，应当应用实际辐射中换能器表现出来的有效半径，而非发射换能器的几何半径。有效半径定义为激励均匀分布的等效源的半径。在实际的测量中，有效半径与几何半径有时竟相差30%之多[6]。

以前测量有效半径的方法主要是测量声轴上的声压极大和极小，而后通过极值间的距离关系来求出有效半径。R. C. Chivers[6]于1980年提出通过测量声轴上最后一个极小值办法，利用极简单的算法求出有效半径。但是，这种方法也有技术上的困难。因为，第一，面积很小的针形接受器很难保证其在声轴上；第二，由于换能器辐射的不均匀性，轴上的声压表达式可能不准确，比如R. C. Chivers就曾注意到声轴上的声压极小并不为零。当用半径为b的小接收器接收半径为a的同轴源的近场时，响应用式(2)，而非式(1)表示。由于这个原因，极大极小位置的测定就不准确。即使用这种方法得到了源发射器在发射状态下的有效半径，而且也得到了接收换能器在发射状态下的有效半径，那么，由于应用中发射与接收器互相影响，所以要求的发射器加介质加接收器系统的有效半径的问题还没有得到解决。

Khimunin[7]提出了一种方法，同时测定介质的衰减系数和系统的有效半径。如果衰减值用分贝表示，则衰减值随距离的变化可写成

$$20\log_{10}\bar{P}/P_0=-\alpha z$$

由于实际中没有平面波，因而在测得的点衰减里应包括衍射的效果，因此有

$$20\log_{10}\bar{P}/P_0=-\alpha z+20(\log_{10}\bar{P}/P_0)_{\text{。}}$$

这里$(\log_{10}\bar{P}/P_0)_{\text{。}}$为没有衰减的理想情况下的衍射修正。也就是说，在计算衰减系数时，应把理论修正从测得的总衰减里减去。当在

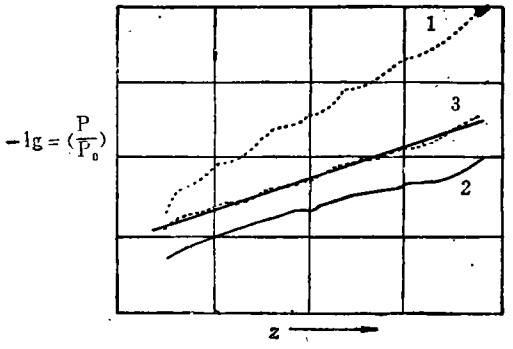


图 4　源半径一定时超声衰减系数实验数据处理示意图。

一系列 z 上测得了 $\bar{P}$ 之后，即可用这种方法求出衰减系数。图 4 即是此方法的图解。曲线 1 是实验测得的衰减值，减去理论修正(曲线2)之后，得到了如曲线 3 所示的一系列值，作最小二乘法拟合，即可求出曲线的斜率(即衰减系数)。

但是由于前述的原因(非理想辐射等)，得到的曲线拟合可能误差较大，这主要归结于理论修正时半径 a 的选择问题。因此，为了得到比较切合实际的修正，我们可以考虑用不同的半径做拟合修正。如果选择某个 a 时得出的误差最小，则我们认为这个 a 值即为系统的有效半径。而此时拟合曲线的斜率

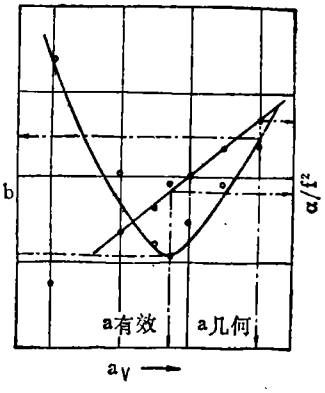


图 5　测得的超声衰减系数及相对误差随不同半径的变化

才是真正的衰减系数。

在我们的实验中，拟合的误差为

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_n[y(z_i)-g(z_i)]^2}{n(n-1)}}$$

这里 $y(z_i)$为经过修正的实验曲线，$g(z_i)$ 为拟合所得之曲线。图 5 为用不同的半径作修正时，得到的误差曲线，直线对应的是衰减系数。在实验中衰减的修正应用式(3)。图 6 为本实验系统在水中测试时所得的实验曲线以及与理论修正的比较，测量的结果有效半径为6mm。衰减系数与文献中的数据相符合。

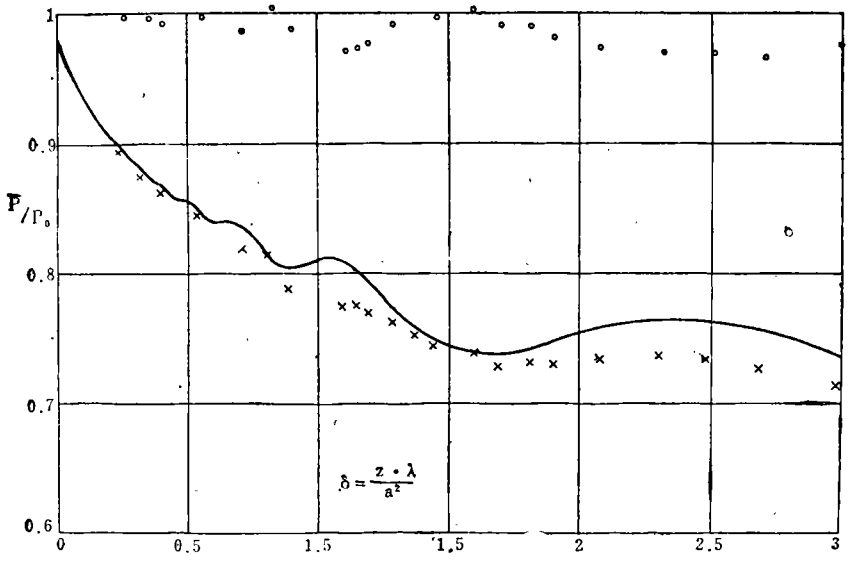


图 6　本实验所用的换能器系统在水中的测试结果。×为测量值，○为经理论修正后的实验值。—实曲线为无衰减时的理论值。

四、应　　用

在我们的实验中[1]，由于加入了这些修正，得到了比较好的测量结果。验证了Khimunin[7]提出的测量方法的实用性。在做各种有机液体的非线性参量的测定时，得到了与文献中用各种不同方法测出的结果符合甚好的数据。我们测定了猪的各种组织和非线性参量，发现了脂肪组织的B/A比其它组织都大，并把其原因归结为脂肪内类脂化合物的高含量。我们得到的结果是脂肪的非线性参量在9.6以上，与Dunn[8]等在第10届国际非线性声学会议上报道的数据11.0相差1左右，而与Chandra. M. Sehgal et al的结果符合的相当好，这都反映了脂肪组织具有高的非线性声参量。另外，也证实了我们的文章[1]对Ichida的结果的讨论是正确的。

南京大学声学所冯若先生提供了文献[8]，在此表示感谢。

参 考 文 献

[1] 孙永臣，董彦武，赵恒元，"高声衰减生物媒质非线性声参量的研究"，陕西师大学报，1985年第4期。

[2] A. s. Khimunin and E. A. Lvova, Acustica,53 (198), 107.

[3] R. Bass, J. Acoust. Soc. Am., 30(1958), 602.

[4] W. N. Cobb, J. Acoust. Soc. Am., 73(1983), 1525。

[5] F. Ingenito and A. O. Williams, J. Acoust. Soc. Am., 49(1971), 319.

[6] R. C. Chivers, et al, J. Acoust. Soc. Am., 68 (1980), 80.

[7] A. S. Khimunin, Acustica, 39(1978), 87.

[8] F- Dunn, W. Law and L. Erizzel, 10th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Kobe (1984), 221.

[9] Chandra M. Sehgal, Robert C. Bahn and James F. Greenleaf, J. Acoust. Soc. Am., 76(1981), 1023.

OOB—1型超声测距报警器

OOB—1 型超声测距报警器是根据脉冲雷达原理研制而成的，由传感器和信号处理机两部分所组成。使用本装置可以有效地防止同一跨度内相邻两部行车的碰撞。

传感器装在本行车上，向正前方发射超声波，并接收安装在相邻行车上反声板的回波。回波通过电缆送到放置于本行车驾驶室内的信号处理机中，当相邻行车的距离小于报警器最大作用距离时，信号处理机便给出距离指示或发出报警信号。

1.最大作用距离：大于10米。

2.搜索扇面角(主瓣半功率角)：20度左偏。

3.距离指示与报警方式：由电表指针指示本行车与邻近行车的间距；由一排发光两极管粗略指示本行车与邻近行车的间距；由扬声器发出连续声，声音的音调与响度随间距而变化，距离越近，声音就越响，并且音调越低，驾驶员凭这音响即可判断对方行车的大致距离。当两相邻行车间距小于1.5米时(距离可按需要预先调定)，信号处理机则另外发出一种紧急报警信号（这信号也可用作自动刹车信号)。

4.正常工作温度范围：－10℃～＋55℃。

5.供电：交流220伏。

该产品由中科院东海研究站三室研制。