

换能器的非线性及其对声参量阵的测量和应用的影响

许振夏

(中国科学院东海研究站)

本文提出一种表征接收换能器非线性程度的量——换能器非线性优劣系数MF，并介绍了对MF的测量方法，以及如何根据要求的信号、干扰比确定测量换能器所必须具备的MF值，或者相反，根据已知的换能器优劣系数预估测量时可能达到的信号、干扰比。

一、引言

声参量阵是一种利用介质中声传播的非线性效应构成的特殊的辐射声源。由于它具有高指向性、低旁瓣级和宽频带等优点，自从 Westervelt^{[1][2]}从理论上指出其可能性后，20年来在理论、实验和应用上得到了飞速的发展。它的基本原理表示于图1。发射换能器把两个不同频率的原频声信号同时辐射到介质中去。由于介质中声传播存在着非线性，因此，在原频信号所到达的每个体积元中都产生了“和频”和“差频”信号。和频信号的频率为原始频率平均值 f_0 的两倍，在介

质中被很快地吸收掉。各体积元所产生的差频信号，随原频信号一起向前传播并累加起来，成为参量阵的主要输出。参量阵是一种在介质中实际存在着的“虚端射阵”，阵的长度很长，因此具有高指向性等优点。一般介质（例如水）的非线性系数是很低的，因而必须在系统中小心地排除由其它环节的非线性所产生的干扰。最常见的干扰有两种：

1. 由于电发射系统的非线性而形成的差频信号再通过发射换能器直接辐射出去；
2. 由于电接收系统的非线性而形成的差频干扰。

通常的解决办法是，在发射换能器前插入一只高通滤波器，以抑制电发射系统输出

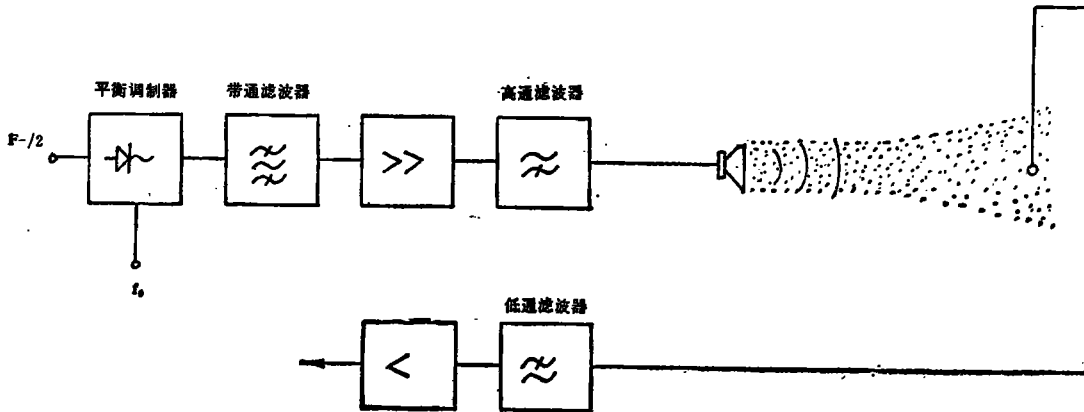


图1 参量发射阵示意图

的差频(低频)干扰;在接收换能器之后插入一只低通滤波器,以抑制输入电接收系统的原频信号。虽然压电换能器的非线性特性是众所周知的,但是在参量阵的测量和应用中,人们却一直把换能器当作线性部件而没有遇到过问题。随着参量阵工作频率向低频发展以及近场应用情况的日益增多,换能器非线性性的影响就越来越显露出来了。在参量阵的近场中(也即作用区内),参量阵输出的差频信号还没有经过足够的累加,因而比较弱,但是原始频率信号和由发射换能器直接辐射的差频信号却比较强,这样,换能器的干扰作用就显得相对突出。参量阵的输出声压基本上正比于差频频率的平方,当差频频率降低时,参量阵的输出将大大衰减,因而其它环节(例如换能器)的非线性所产生的干扰也将相对地突出起来。

对于一种典型的海上工作的参量阵,图2a—2d表示了在不同距离上实测的近场“指向性图”。发射换能器尺寸为30厘米,原始频

率平均值 f_0 为102千赫,而差频频率为10千赫。测量距离分别为2.98米,4.75米,6.4米和7.4米。可以看出:“指向性图”在声轴附近呈尖峰状,这将证明是由接收换能器的非线性所产生的干扰。这种“指向性图”呈现了虚假的尖锐指向性。随着测量距离的增加,尖峰将变得不明显,但在测量距离为7.4米时,声轴上仍然有4—5分贝的突起。对比图2d,图2e和图2f可知,在其它条件相同的情况下,差频频率越低则接收换能器的非线性干扰越严重(声轴附近尖峰越明显)。

二、发射换能器非线性性的影响

发射换能器的非线性表现在辐射面振动速度和激励电压的非线性关系中。由于在参量阵中,发射换能器的激励电压一般是双频的,因此在辐射面振动速度中以及在辐射的声压中就存在着“差频”和“和频”分量。对发射阵的这种直接辐射的差频信号进行了实验

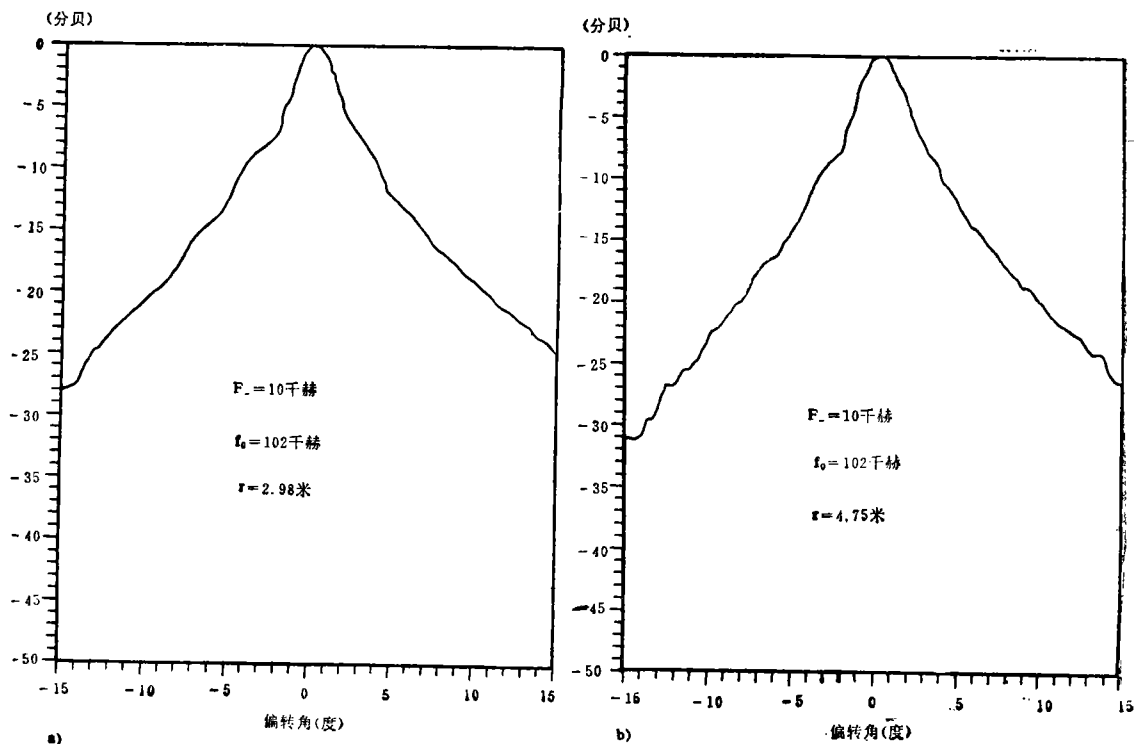


图2 水听器差频输出

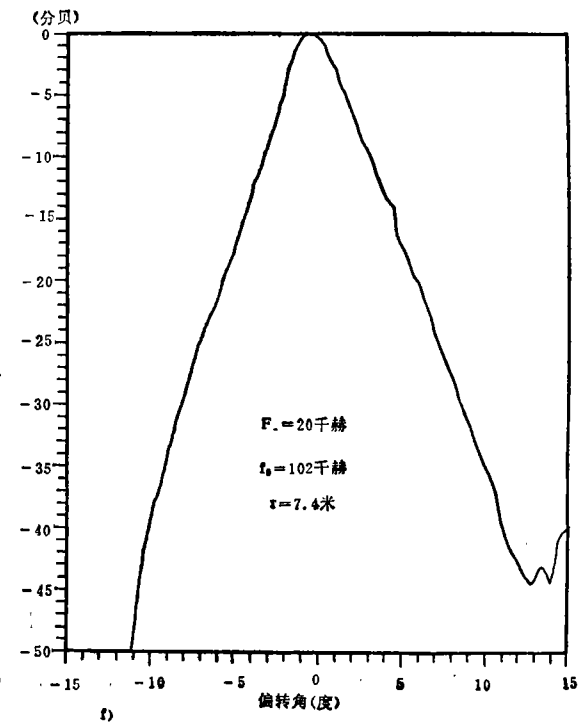
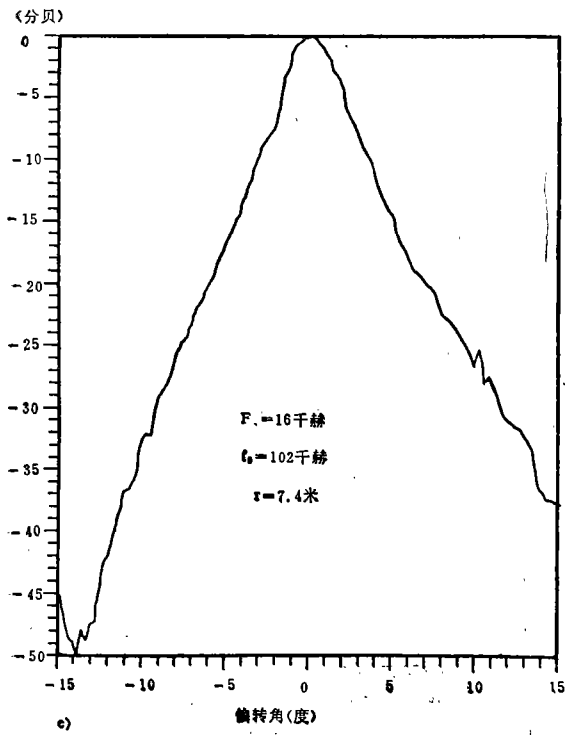
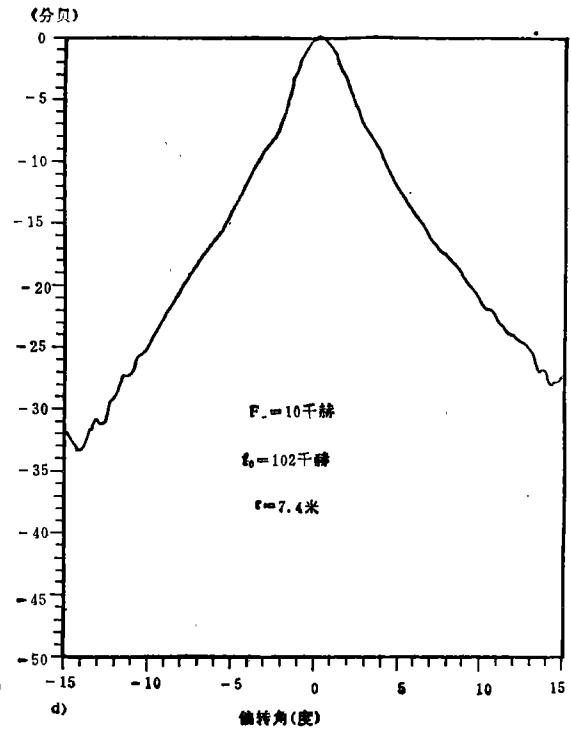
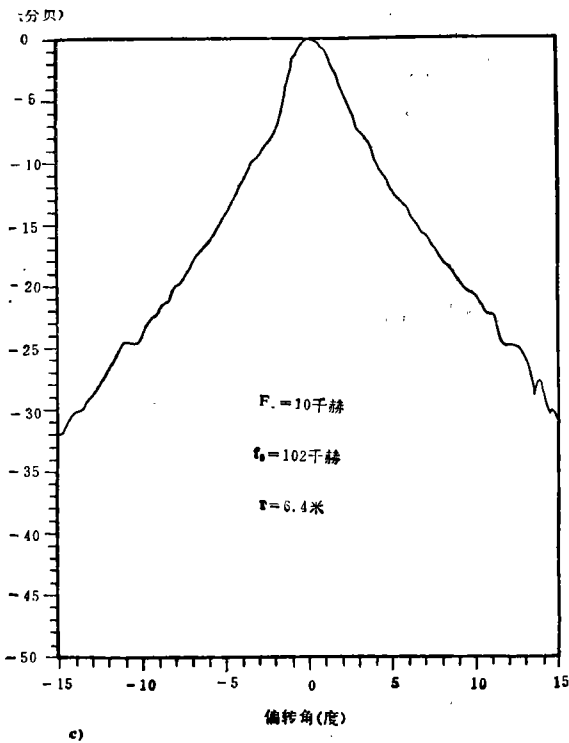


图2 水听器差频输出

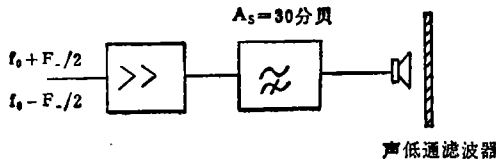
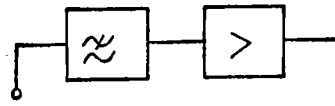


图3 直接辐射测量方块图

研究，实验示意图表示于图3。

在高线性的功率放大器的输出处插入高通滤波器，可使功率放大器可能输出的差频信号衰减30分贝以上。在发射换能器前方放置一由吸声橡皮构成的声低通滤波器，则可避免在水中形成参量阵。对于中心频率为102千赫，辐射面尺寸为30厘米×30厘米的钛酸钡平面阵，图4的测量结果表明，在换能器的瑞利距离以外，存在着按 $1/r$ 规律衰减的差频声波，其声截面图表示于图6。改变声滤波器和发射换能器之间的距离（由2厘米变到20厘米），或者取去功放输出处的高通滤波器，对测量结果的影响都将小于2分贝。这一点说明所接收到的差频波既不是来自功放等电子设备的非线性，也不是来自水中残留的参量阵，这是由发射换能器内部所



产生、并直接辐射到介质中去而形成的。在差频频率分别为6.3千赫、10千赫和20千赫时，在各距离上参量阵的输出声压以及在0.6米处测得的直接辐射声压，表示于图5。可以看出，这种钛酸钡阵的直接辐射，只在很近的距离内对参量阵的测量产生影响。图6表示在1米处测得的直接辐射声截面。对中心频率为75千赫，辐射面尺寸为43厘米的锆钛酸铅平面阵的实验研究表明，该阵的直接辐射声级极低。这旁证了在材料研究中已经得到的结论^[8]——钛酸钡的非线性比锆钛酸铅高。发射换能器的非线性对参量阵测量的影响，表现为轴向声压分布的畸变和指向性图或声截面图裙边的抬高，一般，这些影响都只发生在很近距离处。

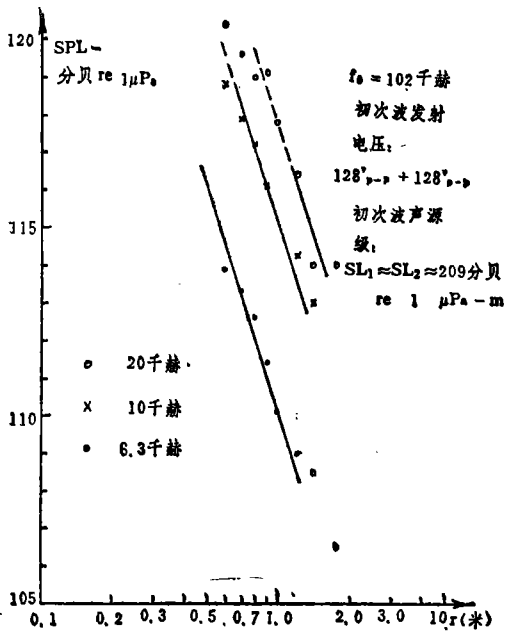


图4 直接辐射的差频轴向声压

三、接收换能器非线性的影响和换能器的优劣系数

和发射换能器相比，接收换能器的非线性问题更为人们所忽视。事实上，水听器的非线性对参量阵的近场测量有着很严重的影响。图7表示在距离为0.63米处用B&K8103水听器测得的差频信号截面图。实验中所用的发射换能器为直径5厘米的锆钛酸铅圆片，原始频率平均值为920千赫。图7中，差频 F_- 为100千赫时测得的声截面是正常的，但当 F_- 下降到40千赫以至10千赫时，声轴附近就出现虚假的高指向性。当差频频率降到5千赫时，声轴附近的声截面图和原频声截面的平方曲线形状相符。图8表示用两种不同来源的水听器测量同一参量阵“声

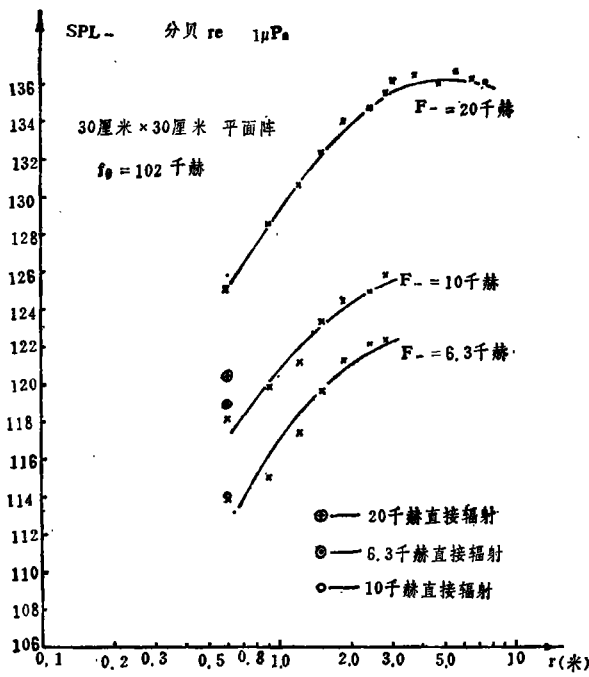


图5 直接辐射声级和参量阵输出的比较

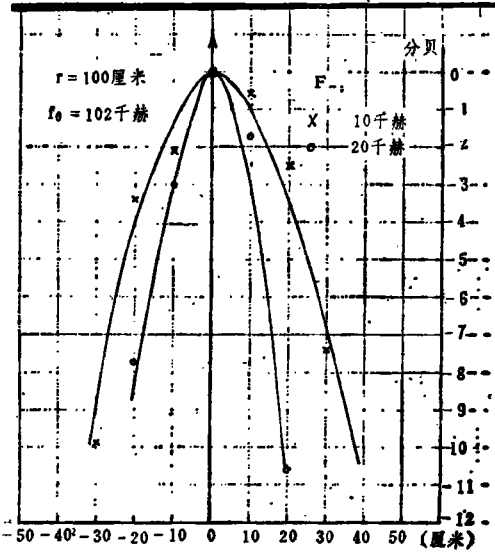


图6 直接辐射信号的声截面

截面”时所得到的不同结果。图9表示在不同距离上测得的“声截面”。图10表示在水听器前方放置声滤波器对“声截面”测量结果的影响。声滤波器是低通型的，对参量阵的输出(20千赫)衰减不大，而对原始频率(455千赫)信号衰减达20分贝以上。测量中所使用的电接收系统的非线性干扰，可忽略不计。因此，水听器的非线性的贡献可以由比较图10中的两根曲线而获得。

压电换能器本质上是非线性的，在制造过程中要施加很高的极化电压使其线性化。严格的理论研究需要求解带有二阶项的物态方程。对大功率发射换能器的非线性问题已进行过不少研究^[4]，但是，对于在高声强驱动下的接收换能器的非线性则研究得还很少。从实用的角度出发，把接收换能器当作一个输入声压和输出电压的四端网络，则该网络的输入、输出关系可写作。

$$V(t) = \alpha(f)P(t) + \beta(f)P^2(t) \quad (1)$$

式中 $\alpha(f)$ ——一阶灵敏度，亦即通常所指的接收灵敏度；

$\beta(f)$ ——二阶灵敏度。

当输入声压为 $P(t) = P_1 \cos 2\pi f_1 t + P_2 \cos 2\pi f_2 t + P \cos 2\pi (f_2 - f_1) t$,

并且 $P_- \ll P_1, P_2$ 时，输出电压 $V(t)$ 中有 $f_1, f_2, 2f_1, 2f_2, f_1 + f_2$ 和 $|f_1 - f_2|$ 等频率分量。其中，由换能器本身非线性所产生的差频电压幅度为：

$$V_h = \beta(f_0)P_1P_2 \quad (2)$$

式中， f_0 —— f_1, f_2 的平均值。

由参量阵的输出 P_- 产生的差频电压幅度则为：

$$V_- = \alpha(F_-)P_- \quad (3)$$

由式(2)和式(3)，测量参量阵时的信号、干扰比 SIR 为：

$$\begin{aligned} SIR &= 20 \lg(V_-/V_h) \\ &= 20 \lg[\alpha(F_-)/\beta(f_0)] - \\ &\quad 20 \lg(P_1P_2/P_-) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $20 \lg(P_1P_2/P_-)$ ——取决于参量阵的结构以及测量点的位置，但是和发射声源级无关；

$20 \lg(V_-/V_h)$ ——为换能器输出的信号、

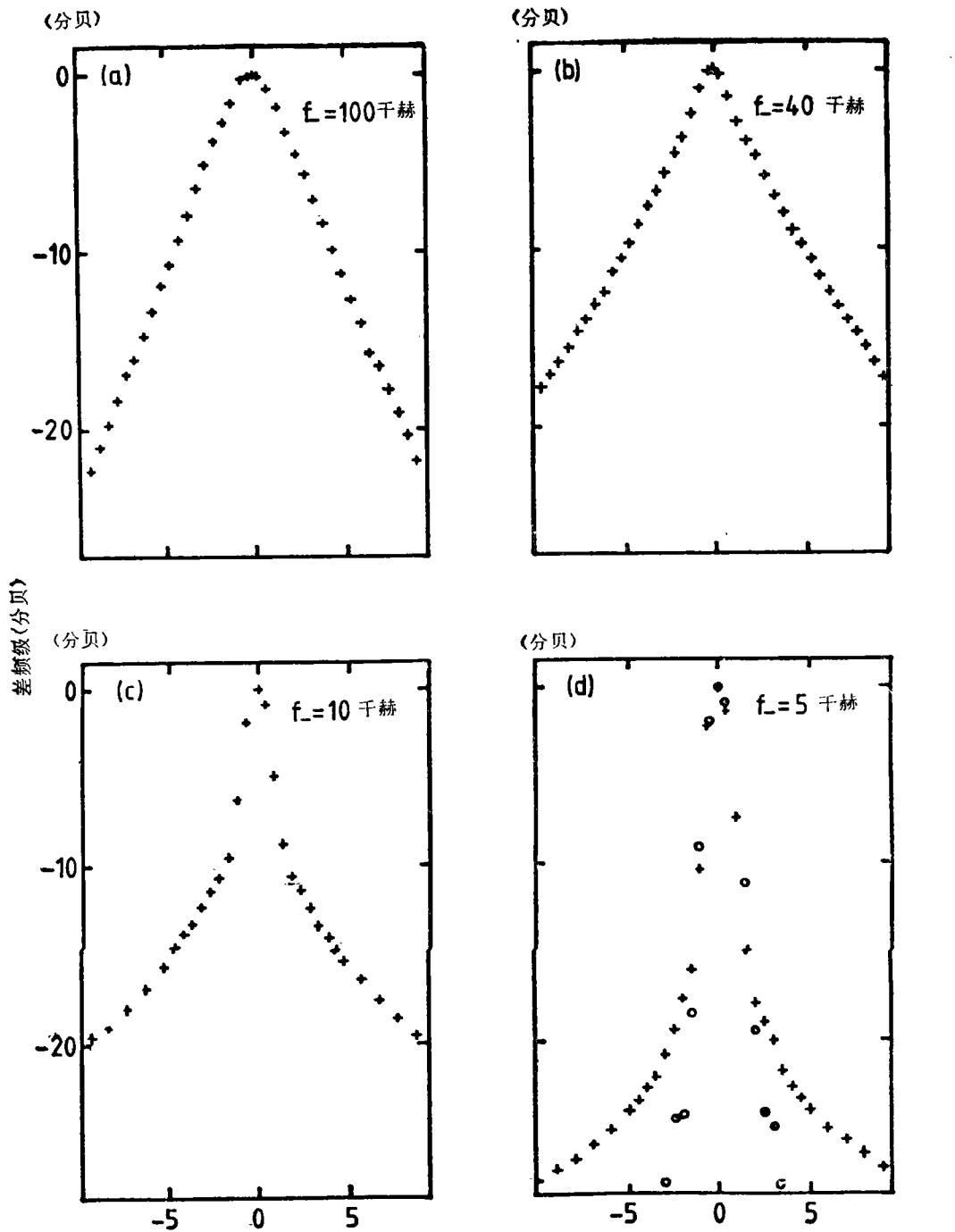


图7 偏轴距离 (厘米)

水听器差频输出 $f_0 = 920$ 千赫, $r = 63$ 厘米

(b) $F_c = 40$ 千赫 (c) $F_c = 10$ 千赫 (d) $F_c = 5$ 千赫

○—归一化原频声压截面的平方值

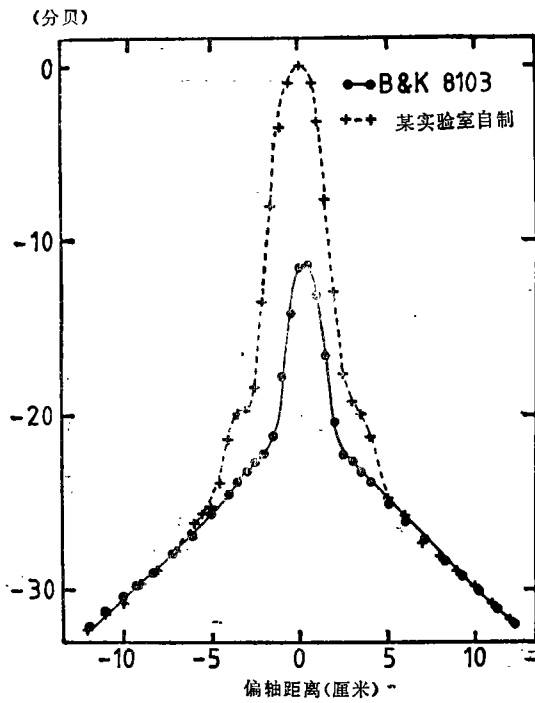


图8 两种水听器的差频输出比较
 $f_0=920\text{KHz}$, $F_- = 10\text{KHz}$, $r=63\text{cm}$

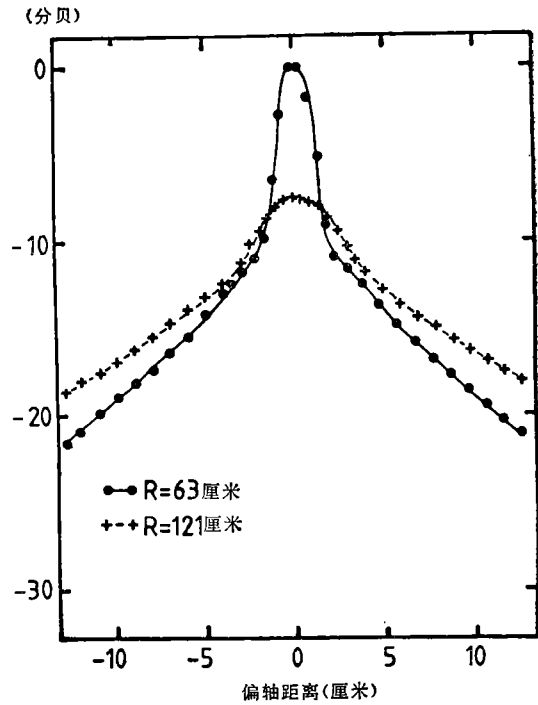


图9 在不同距离上的水听器差频输出
 $f_0=920\text{KHz}$, $F_- = 10\text{KHz}$

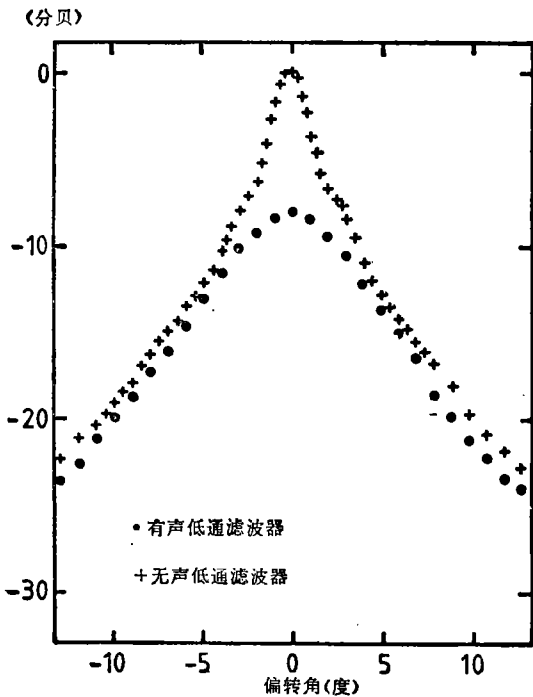


图10 水听器前声滤波器的影响
 $f_0=455\text{KHz}$, $F_- = 20\text{KHz}$

干扰比(以分贝计), 由于 V_h 、 V_- 都正比于原频波声压的平方, 因而它们的比值就和发射声源级无关;
 $20\lg[\alpha(F_-)/\beta(f_0)]$ ——是换能器的非线性程度的一个度量, 它可以作为接收换能器性能比较的一个依据。

定义换能器优劣系数MF:

$$MF = 20\lg[\alpha(F_-)/\beta(f_0)] \\ = 20\lg[\alpha(F_-)/(V_h/P_1P_2)] \quad (5)$$

换能器一阶灵敏度 $\alpha(F_-)$, 原频波声压值 P_1 、 P_2 , 都可以用通常的方法测得。因此, 测得换能器的非线性差频输出电压 V_h 后, 就可以计算出接收换能器的优劣系数 MF。 V_h 的测量方法有两种:

1. 在待测水听器前方放置低通型声滤波器, 以阻隔原始频率声波, 测得仅由水中参量阵引起的差频输出电压, 然后取去声滤波器, 测得带有换能器非线性干扰的总输出电压。根据两次测量结果即可计算出 V_h 。

2. 在很低的差频频率 F_- 下进行测量。由于参量阵的输出随 F_- 下降而很快减弱(近似于按平方规律下降), 因此, 作用到接收换能器上的将只剩下原频波 $P_1(t)$ 和 $P_2(t)$, 这样, 接收换能器输出的差频电压就是待测的 V_h 。

第二种测量方法的优点是没有繁杂的计算, 测量比较简捷, 省掉了声低通滤波器, 缺点是需要比较大的自由水域。

表 1 为四只 B&K8103 水听器的优劣系数。

表 1 B&K8103 水听器优劣系数的比较
 $f_0=455$ 千赫, $F_-=20$ 千赫

水听器号码	1	2	3	4
MF dB re $1\mu\text{Pa}^2/\mu\text{Pa}$	284	285	288	286

表中, B&K8103 水听器优劣系数的离散性并不大, 约为 4 分贝。在同样情况下, 另一种实验室自制的水听器的优劣系数平均值(测量了三只)要比 B&K8103 的平均值约低 14 分贝, 而且离散性要高达 10 分贝。这一点说明了测得的结果并非来自假声现象。粗略的计算表明, 由假声现象施加于 MF 值的限制为 300 分贝以上。

表 2 和表 3 分别表示 B&K8103 水听器的 MF 值和差频频率 F_- 以及原始频率平均值 f_0 之间的关系。

表 2 B&K8103 水听器优劣系数和差频频率的关系($f_0=455$ 千赫)

差频频率 F_- (千赫)	5	10	20	30	40
MF dB re $1\mu\text{Pa}^2/\mu\text{Pa}$	285	286	286	287	287

表 3 B&K8103 水听器优劣系数和原始频率的关系 $F_-=5$ 千赫

f_0 (千赫)	102	455	920
MF dB re $1\mu\text{Pa}^2/\mu\text{Pa}$	260	285	296

由上, MF 值和 F_- 近似无关, 而和 f_0 则有强烈的依从关系。 f_0 近似地每增加一倍, MF 约提高 12 分贝, 即水听器的二阶灵敏度

$\beta(f_0)$ 近似地和 f_0 平方成反比(由式(5), $MF = 20\lg[\alpha(F_-)/\beta(f_0)]$)。这一点可能对于研究接收换能器产生非线性的原因会有所帮助, 但是, 目前的实验数据太少, 还难以作出推断。MF 和 F_- 的关系主要取决于 $\alpha(F_-)$ 。B&K8103 的共振频率近似为 120 千赫, 因此在 40 千赫以下, $\alpha(F_-)$ 以及 MF 近似地和频率无关。

四、接收换能器优劣系数的应用

根据式(4), 测量参量阵时由接收换能器非线性引起的信号、干扰比为:

$$SIR = MF - 20\lg(P_1P_2/P_-)$$

式中 $20\lg(P_1P_2/P_-)$ 为取决于参量阵结构(发射换能器形状、面积、原始频率和差频频率等)的一个量。它和观察点距离有关, 和发射声源级无关。按 Rolfeigh^[5] 和 Bertay^[6] 的参量阵模型, 对原频波声压进行近场修正后, 可以计算出 $20\lg(P_1P_2/P_-)$ 和距离的关系。这样, 已知换能器优劣系数后, 就可在各个距离上计算出用该接收换能器测量参量阵时的信号、干扰比 SIR。反之, 给定要求的信号、干扰比 SIR 后也可计算出在各个距离上要求的换能器优劣系数值 MF'。图 11 和图 12 分别表示在典型的海上应用条件和实验室应用条件下, 为保证参量阵测量时的信号、干扰比不低于 20 分贝, 接收换能器所必须具备的最低优劣系数值 MF'。B&K 8103 的 MF 值也以虚线的形式标在图上。根据图 11 和图 12 可以得出结论, 如果用 B&K 8103 水听器(它的非线性是比较低的)测量海上应用条件下的典型的参量阵性能, 则测量距离必须大于 30—50 米时才能基本免除水听器非线性的影响; 而在测量典型的供实验室应用的参量阵时, 测量距离也必须大于 3 米才能保证在差频频率高于 10 千赫时($f_0=1$ 兆赫)的测量获得正确结果。把图 2d、7b 和图 11、图 12 进行对照, 可以看出, 对信号、干扰比的预估是正确的。

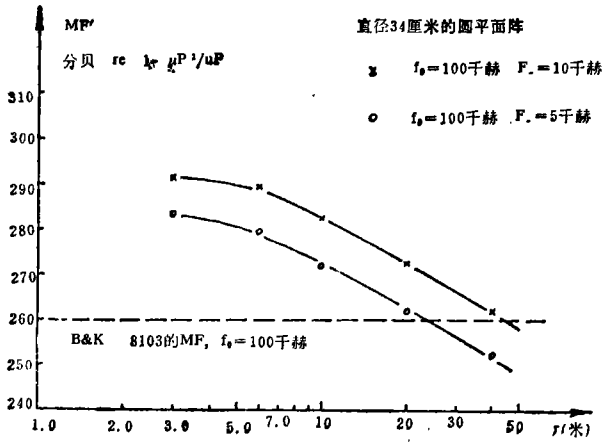


图 11 在典型的海上应用条件下为保证信号-干扰比SIR=20分贝所必须的换能器优劣系数MF'

在参量阵的工程应用中，接收换能器不一定是水听器。在测得接收换能器优劣系数后可以用同样的方法对信号、干扰比进行计算。

五、结束语

本文讨论了换能器非线性对参量阵测量，特别是近场测量的影响。和发射换能器相比，接收换能器的非线性是主要的干扰因素。文中定义了接收换能器优劣系数MF，介绍了两种测量MF的方法。由于所要测量的是由非线性产生的差频信号，因此能够测到比换能器一阶灵敏度低300分贝的二阶灵敏度。对海上和实验室两种典型应用条件下的参量阵进行了计算，给出了预估信号、干扰比的曲线。预估的结果和实验测量结果相符。鉴于接收换能器的非线性对参量阵测量的严重影响，MF值应该列为换能器(特别是供参量阵测量用的换能器)的重要指标之一。

本文的原始材料是作者在英国巴斯大学访问研究期间的部分研究工作，在此向Berk-tay教授和Humphrey博士致谢!

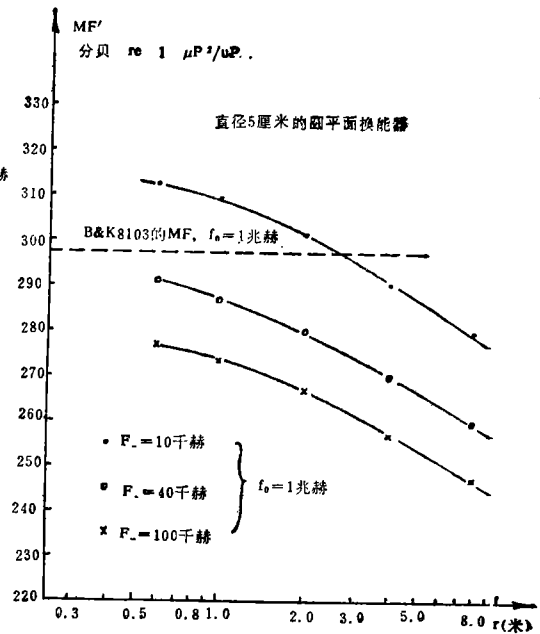


图 12 在典型的实验室应用条件下，为保证信号-干扰比SIR=20分贝所必须的换能器优劣系数MF'

参 考 文 献

- [1] Westervelt, P. J. "Scattering of Sound by Sound" *JASA*, 25, (1957) p.199.
- [2] Westervelt P. J., "Parametric Acoustic Array" *JASA* 35 (1963), p.535.
- [3] LeBlanc C. L. et al. "Dynamic Nonlinearities in Piezoelectric Sonar Ceramics" NUSC Technical Report, No. 5263, Dec. 1976.
- [4] Woollett R. S. and LeBlanc C. L., "Ferroelectric Nonlinearities in Transducer Ceramics" *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, Vol. SU-20 No.1 (1973) p.24.
- [5] Rolleigh R. L., "Difference Frequency Pressure within the Interaction Region of Parametric Array" *JASA* 58 (1975), p.964.
- [6] Berk-tay H.O. et al. "Sub-bottom Profilers using Parametric Sources" Proceedings of the Conference "Underwater Applications of Non-Linear Acoustics" IOS England, Sept. (1979).
- [7] Humphrey V. F. and Hsu, C. H. "Nonlinearity of Cylindrical Hydrophones used for the Measurement of Parametric Arrays" Proceedings of the conference "Transducers for Sonar Applications" IOS England, Dec. (1980).
- [8] Moffet M. B. and Blue J. E. "Hydrophone Nonlinearity Measurements" *JASA* 68 (1980), s35, V7 of the 100th Meeting (1980).