

淡水中的声饱和及参量阵的实验研究

李洪瑛 孙璇笙

(中国科学院东海研究站)

本文介绍了淡水中的声饱和实验及参量阵的测量。给出了实验方框图和结果，并将实验结果与理论计算进行了比较。此外，还对实验精度作了分析和讨论

一、引言

从参量阵的研究中知道，如果近场原波吸收损失足够大 ($\alpha_T R_r \gg 1$ 奈培，其中 $R_r = \frac{S_0}{\lambda}$ 为瑞利距离， S_0 为发射换能器的辐射面积， λ 为平均原频波的波长， $\alpha_T = \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_s$ ， α_1 、 α_2 、 α_s 分别为两原频波和差频波的吸收系数)使得两原波在 R_r 以内被充分吸收，在距离大于 R_r 时，非线性相互作用不再进一步发生，这种参量阵叫做受吸收限制的阵，可以用 Westervelt^[1] 公式来决定差频信号。如果 $\alpha_T R$ 非常小，在距离大于 R_r 时，非线性相互作用起主要作用，这种阵就受扩展限制，不再服从 Westervelt 的理论。根据 Berkay 和 Leahy^[2] 关于受扩展损失限制的讨论，其差频声压为：

$$p_s(R, \theta) = \frac{\omega^2 P_1 P_2 \beta S}{4\pi \rho_0 C_0^4 R} \frac{\exp[-(\alpha_s + jk_s)R]}{\alpha_T + jk_s(1 - \cos\theta)} \quad (1)$$

差频均方根声压级为：

$$SL_{-} = 37 + 20\log f_s - 40\log \theta_a^\circ + 10\log W_1 + 10\log W_2 + 20\log |V| \quad (2)$$

分贝 (1 微巴为参考值)

其中： $\theta_a^\circ = \left(\frac{\alpha_T}{2k_s}\right)^{1/2}$ 当 $\alpha_T/k_s \ll 1$

式中 f_s 为差频频率 (千赫)， θ_a° 以度表示， W_1

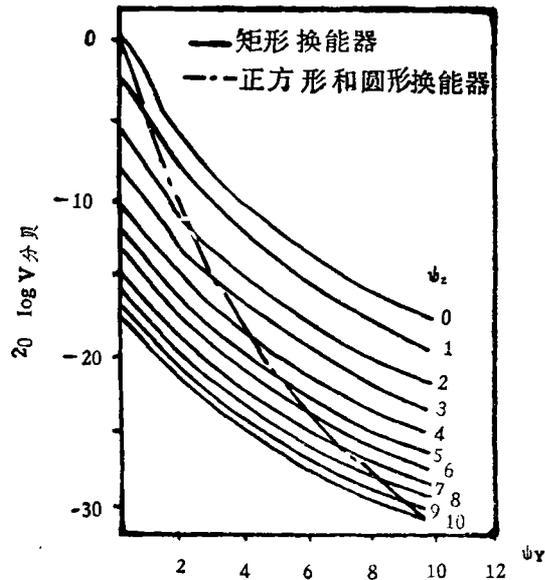


图 1 矩形正方形和圆形换能器在 $\theta' = \eta' = 0^\circ$ 时的压力缩减因子

和 W_2 为两原波发射声功率 (瓦)， $20\log |V|$ 取自图 1。对半径为 a 的圆形发射器， $\psi_a = 92.5 / (k_0 a \theta_a^\circ)$ ，对边长为 l 和 m 的矩形活塞 $\psi_x = 163 / k_0 l \theta_a^\circ$ ， $\psi_z = 163 / k_0 m \theta_a^\circ$ 。在我们的实验中，阵受扩展损失限制。

此外，在高强度的声的应用中，一旦声强的强度大到足以产生冲击波，能量就从基波转移至冲击波而急剧溃散，形成了声饱和^[3]。这在参量阵的设计和使用中是必须考虑的问题。故在参量阵的测量之前，我们首先作了换能器声饱和的有关测量。

二、仪器和实验方框

实验是于1980年10月在新安江试验场的淡水中进行的，实验点的水深为20米。所用的换能器是直径为17.6厘米的圆形活塞式换能器，它是由19片直径为31毫米的PZT-4振子拼成的，谐振频率为156千赫，带宽为20千赫。所用的激励源是专门研制的多频脉冲发射机，其满激励输出的脉冲电功率是10千瓦，其四个振荡器的信号经线性

加法器叠加后至功率放大器，四个通道可以任意组合。作声饱和实验与参量阵测量时，分别发射一个和两个高频脉冲。所用的脉冲宽度为1毫秒。高频水听器 and 低频水听器分别用来接收高频原波和差频波。接收信号(除观察波形畸变需宽带放大外)皆经滤波、放大、由示波器显示、记录器记录。为抑制高频信号在接收系统中调制产生差频信号，在低频水听器后依次接有陷波器、前置放大器和低通滤波器，高频抑制达70分贝。声饱和实验和参量阵测量的仪器方框图如图2、图3所示。

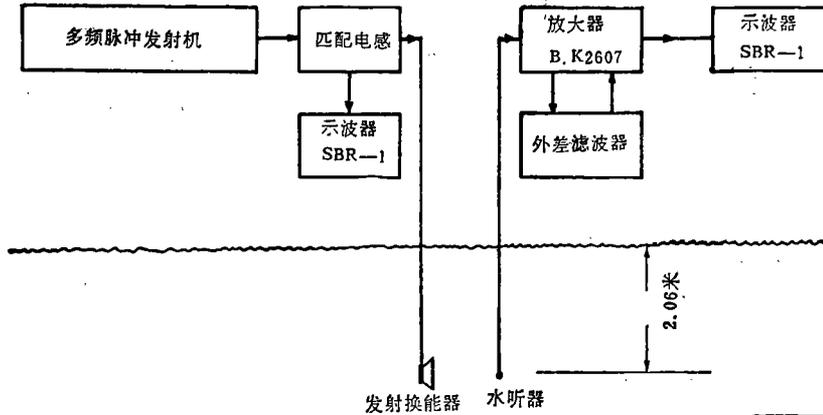


图2 声饱和实验方框图

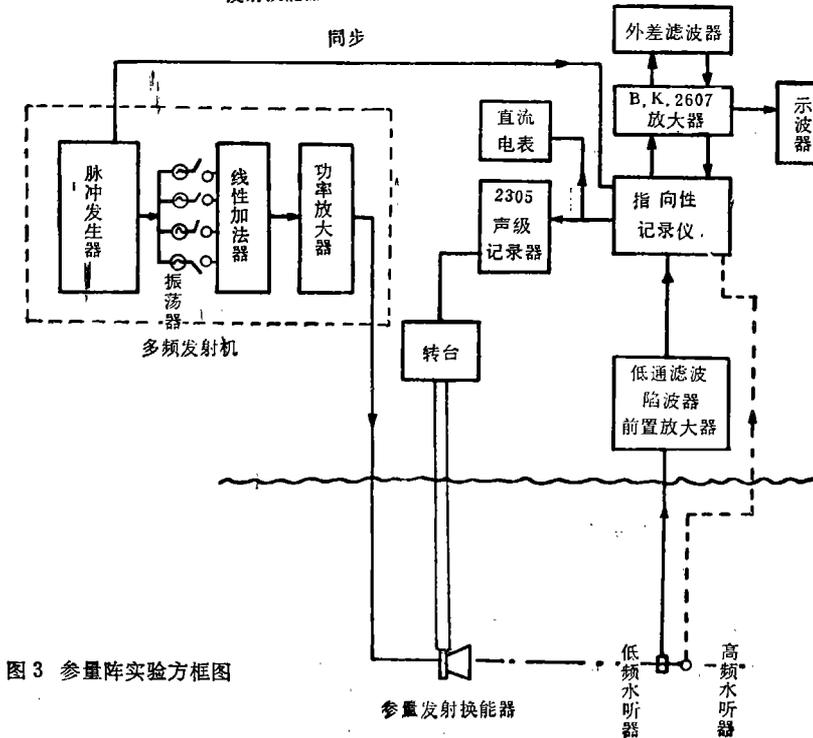


图3 参量阵实验方框图

三、测量结果和讨论

(一) 淡水中声饱和测量

1. 波形畸变

图4、图5是波形演变的照片。图4是发射129.6分贝的峰值源级时波形随距离的变化。图5是分别在3.8米、15.2米和29米三个固定距离上波形随发射功率的变化。理论上，当峰值源级为129.6分贝时，对球面波而言，冲击波形成的距离为17.8米(按有效半径为 $r = \frac{1}{2}R_r$ 计算)。照片中最远的距离是15.2米，接近冲击波的距离。图中随着发射功率和距离的增大，波形越来越弯曲。这是由于随着波形的畸变，谐波增大的缘故。由这些照片的趋势可见：冲击波形成的距离是随峰值源级的增加而缩短的。这是符合理论预计的。

2. 换能器的“输入-输出”曲线

图6是换能器的“输入-输出”曲线图。其中“×”是测量值。直线是由前10个测量值求得的最佳直线近似。由图可见，当发射机馈入换能器的功率增加时，换能器输出声压级亦随之增大，两者成线性关系。当电功率增至2千瓦以上(相应的峰值声压级达127分贝以上)，声压级随电功率的增加就渐趋缓慢，而偏离了线性关系。当峰值声压级达到129.6分贝时，测量值较线性值约低1分贝。根据有限振幅波在无损耗介质中传播的理论，在冲击波形成点($\sigma=1$)，基波大约比源级低1.1分贝^[4]。也就是说，在我们这个实验的情况已接近形成冲击波。按球面扩展公式 $\bar{r} = r_0 \exp(\beta k \epsilon r_0)^{-1}$ ，取 $r_0 = \frac{1}{2}R_r$ (在我们实验的情况下 $R_r = 2.53$ 米)，算得15.2米处开始形成冲击波的峰值声压级是129.9分贝。

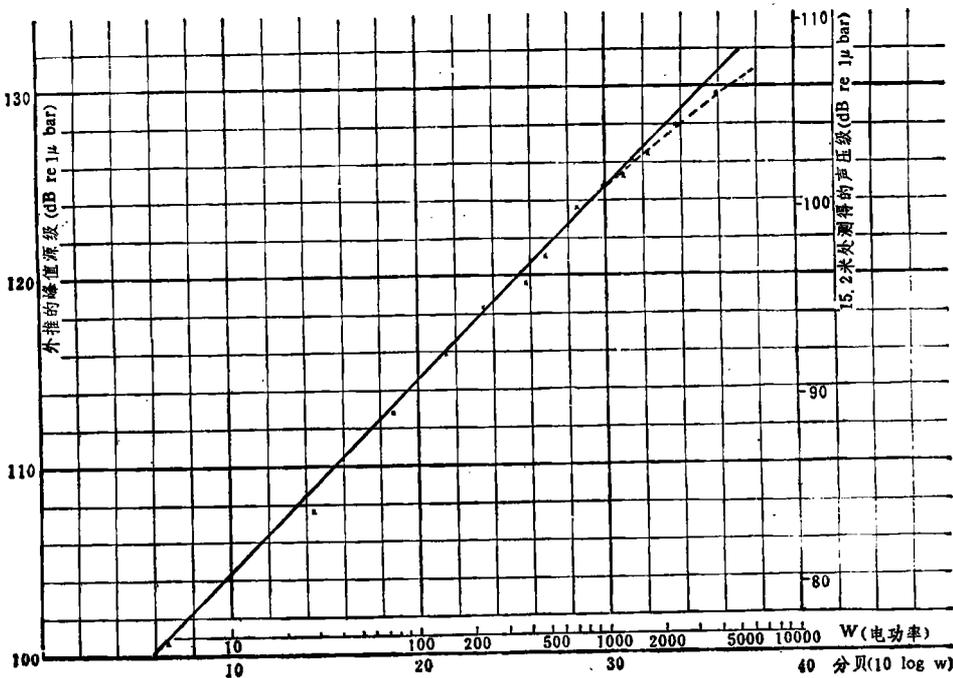


图6 “输入-输出”曲线

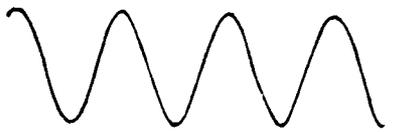


图4(a) $R = 1.25$ $SPL = 129.6$ 分贝



图4(d) $R = 10$ 米 $SPL = 129.6$ 分贝



图4(b) $R = 3.47$ 米 $SPL = 129.6$ 分贝



图4(e) $R = 12.8$ 米 $SPL = 129.6$ 分贝

图4 波形随距离的变化



图4(c) $R = 6.6$ 米 $SPL = 129.6$ 分贝



图4(f) $R = 15.2$ 米 $SPL = 129.6$ 分贝



图5(a) $R = 3.8$ 米 $SPL = 120$ 分贝



图5(d) $R = 15.2$ 米 $SPL = 120$ 分贝



图5(b) $R = 3.8$ 米 $SPL = 126.4$ 分贝



图5(e) $R = 15.2$ 米 $SPL = 126.4$ 分贝

图5 波形随发射功率的变化



图5(c) $R = 3.8$ 米 $SPL = 131$ 分贝



图5(f) $R = 29$ 米 $SPL = 120$ 分贝



图5(g) $R = 29$ 米 $SPL = 126.4$ 分贝

(二)参量阵的测量

1. 差频声压级及其与轴向距离的关系

发射的原频频率为 166 千赫和 146 千赫，其声压级分别为 118 分贝和 113 分贝，测得差频声压级为 82 分贝。而按式(2) 算得差频声压级为 81.5 分贝，测量值略大于理论值。实验中为保证测量数据尽可能地准确，对可能影响测量结果的因素作了如下考虑：(1) 对接收系统的处理已如第二节所述；(2) 为减少由于发射机的非线性而造成的低频输出，在输出端采用 LC 谐振输出，对低频抑制 32 分贝，加上换能器本身的辐射响应，最终直接辐射的低频量级比高频低 50 分贝左右。因此在电信号的系统中产生差频而引起的误差是极小的；(3) 高频水听器的非线性而形成的差频，使得近距离上的测量可能引入误差；(4) 高低频水听器都作了相对校准，因条件限制未作绝对校准，这也是引入误差的一个可能。图 7 是差频声压级与距离的关系。远距离上，差频声呈球面扩展，其声压级比平均原频波约低 34 分贝。

2. 差频波束图及束宽与轴向距离的关系

系

在不同的距离上测量了差频为 20 千赫的波束图，得到了差频为 20 千赫的 3 分贝、6 分贝和 10 分贝的波束宽度与轴向距离的关系。测量结果示于图 8 和 9。从图 8 中可见 6.7 米处的差频波束图中有旁瓣出现，且较主瓣低 29 分贝；而两原频波束图中旁瓣较主瓣低 15 分贝，旁瓣的位置和量级均说明：差频旁瓣是由原频旁瓣相互作用而产生的。

图 9 是差频波束宽度与距离的关系。在近距离差频束宽随距离的增加呈指数型衰减，而远距离束宽基本上恒定，20 千赫差频 3 分贝束宽为 4.5° ，而平均原频的 3 分贝束宽为 4° 。差频要略大于原频的束宽。按球面扩展理论算得的差频 20 千赫的束宽为 3° ^[5]，测量值大于理论值。这可能因为所使用的两个原频不是 100% 调制，相当于虚源阵缩短，因而波束拓宽了。

3. 差频波束宽度与差频频率的关系

在距参量发射阵 6.7 米处，测量了差频频率分别为 20 千赫、10 千赫和 5 千赫的波束宽度。结果示于图 10；差频波束宽度随差频

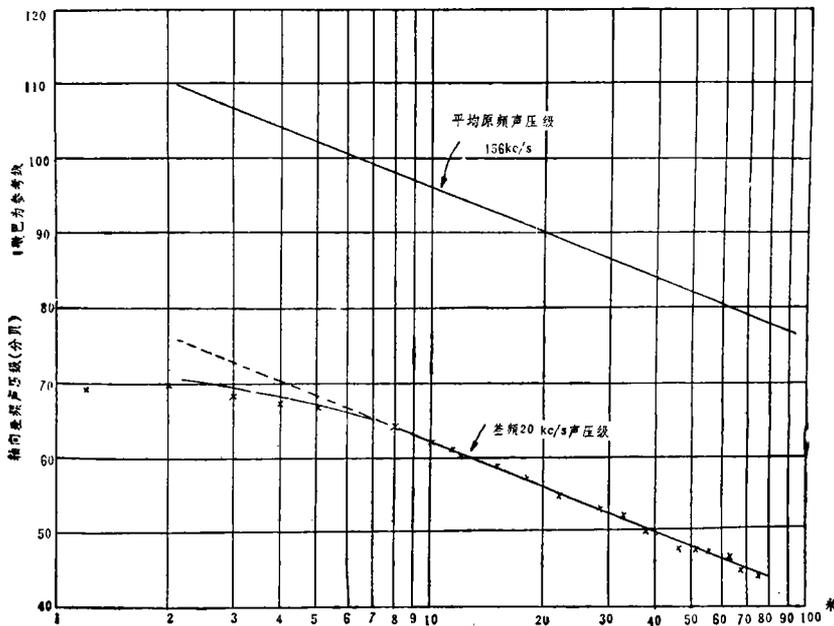


图 7 差频声压级与距离的关系

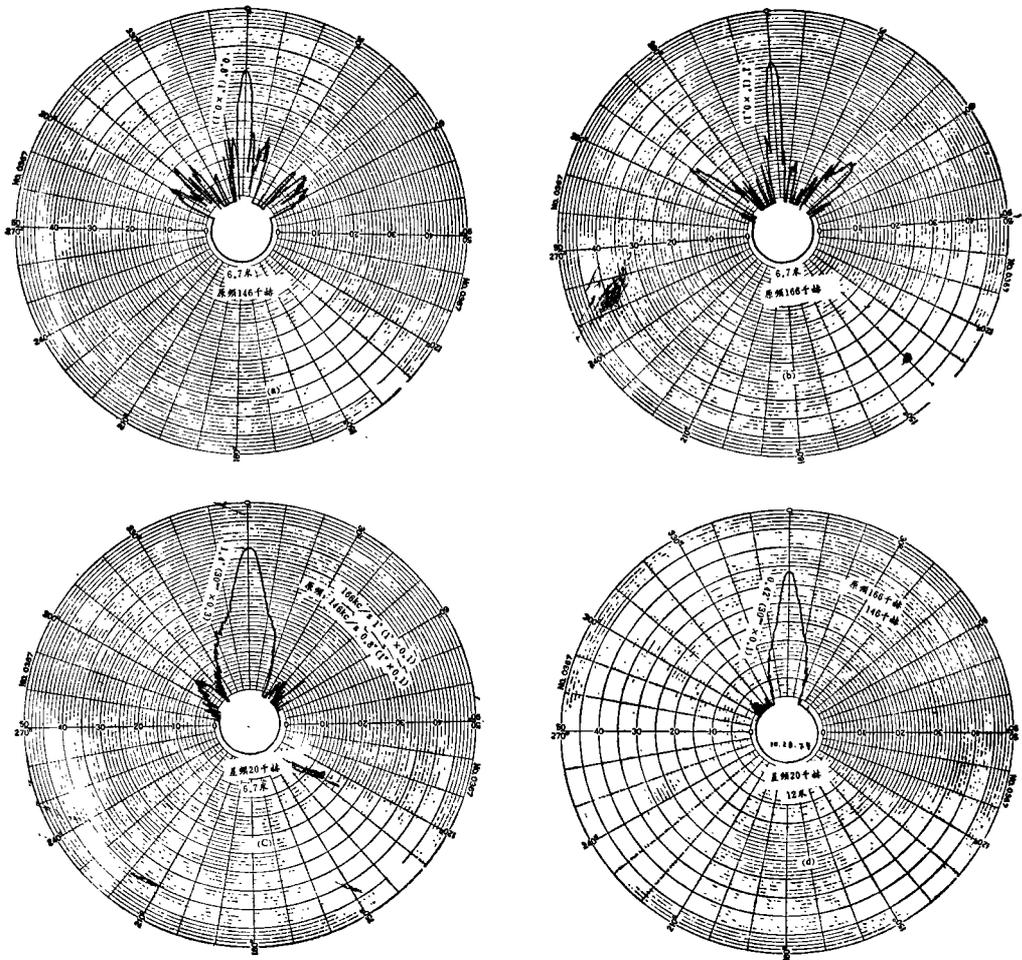


图8 波束图

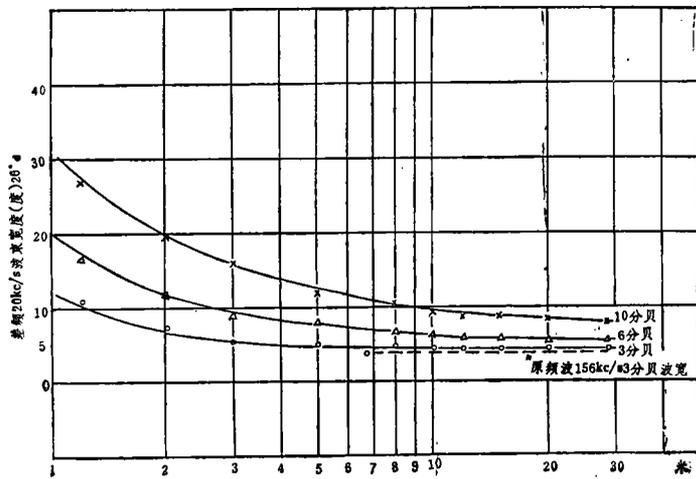


图9 差频波束宽度与轴向距离的关系

频率的增加略变窄。

4. 参量阵的工作状态

由本文第一节可知：本实验的原频波声场应看作是球面扩展的。此外，用无量纲饱和数和原频吸收损失 $\alpha_T R_r$ 来判断^[6]： $\chi = \beta P_0 k_0 R_r (\rho c_0^2)^{-1} = 0.45 < 1$ ， $2\alpha_0 R_r = 0.0035 <$

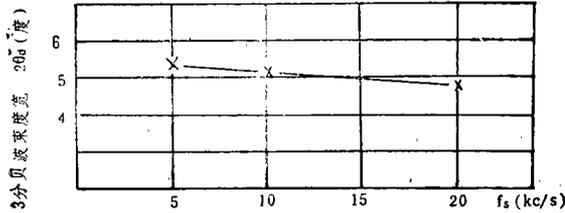


图 10 差频波束宽度与差频频率的关系

$\frac{1}{H_s}$ (此处 $H_s = \frac{f_0}{f_s} = 7.8$)，亦说明该参量阵是工作在原频波的球面扩展区。

参加本次实验的还有蒋廷华、周根祥、吴志灏、尤骏度等同志，冯绍松同志也参加了实验工作。在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Westervelt P. J. J.A.S.A. 35 No.4 p.535 1963.
- [2] Berktaay H. O. and Leahy D. J. J.A.S.A. 55- No.3 p.539 1974.
- [3] Shooter J. A.; Muir T. G. and Blackstock D, T. J.A.S.A. 55 No.1 1974.
- [4] Hargrove L. E. J.A.S.A. 32 p.511 1960.
- [5] Lockwood J. C AD-757036.
- [6] Moffett M. B. and Melen R. H. J.A.S.A.. 61. No.2 p.325 1977.



(上接第 6 页)

射声场。

5. 如果按焦平面前后声束宽度为 $(1 + 20\%) \frac{\lambda f}{X}$ 的区域定义为聚焦深度 Δ ，则有 $\Delta \propto f^{3/2}$ 。图 8 表示实际计算得 Δ 与 f 的关系和用 $\Delta = 0.04 f^{3/2}$ 逼近这一关系曲线所得的结果，两者在一定范围内符合良好。这一关系可以作为估计所计算线阵的分辨力和实现分段聚焦方案的依据。



(上接第 23 页)

到有噪声传出，现有弄内噪声均由机房单层玻璃窗传出，若能改为双层玻璃窗，则可使弄内噪声达到与背景噪声相似的水平，而完全可以排除冷冻机房的噪声干扰。

4. 居民室内降噪效果

受北楼冷冻机房噪声干扰最直接的居民住房，在经过降噪治理后，室内噪声也有显著降低(见图 4)。如在卧室开窗时，底层及二层的噪声分别由原来的 71 和 68dB(A) 降至 51 和 48dB(A)，而接近 ISO 噪声评价曲线 N—45 和 N—40，若与室内背景噪声相比，

参 考 文 献

- [1] Wade G. 编,《声成像》上海交通大学声全息研究室译,国防工业出版社(1981年)。
- [2] Goodman, J. W.《傅利叶光学导论》科学出版社(1976年)。
- [3] 虞秀月,《医用超声高灵敏度多头换能器研制》中国生物医学工程学会论文摘要,1980年,北京。
- [4] Brigham, E. O.《快速富里叶变换》上海科学技术出版社(1979年)
- [5] Szikler, E. A. and others, "Mode Calculations in unstable resonators with flowing saturable gain 2. Fast Fourier transform method" Applied Optics 14, p.1874 (1975).

则仅高出 2dB(A)，可见其降噪效果是满意的，达到并超过原设计所预期的要求。居民们也反映现在的噪声比过去大大降低，并对治理效果表示满意。

总之，锦江饭店北楼冷冻机房噪声污染环境已有多年，这次一举治理并获得满意效果，无论是机房内、值班室，或是机房外里弄环境及居民卧室的噪声都有较大幅度的降低。空间吸声板、进风消声柜、隔声值班室及声闸都起到良好的噪声控制作用，表明了设计是合理的，治理是成功的，其经验可供同类冷冻机房噪声治理时参考借鉴。