提高被动声纳宽带检测性能的一种新方法

蒋小勇[1]，于李洋[2]，杜选民[1]
(1. 上海船舶电子设备研究所，上海 201108；2. 海军驻大连 426 厂军事代表室，辽宁大连 116005)

摘要：宽带能量检测是被动声纳实现目标探测功能的常用方法，常规能量检测(Conventional Energy Detection, CED)方法在复杂环境下的检测性能迅速降低。子带峰值能量检测(Subband Peak Energy Detection, SPED)可以有效改善常规能量检测方法的性能，提高时间方位历程显示(BTR)的方位分辨力，但是波束宽度和旁瓣将影响 SPED 算法的性能。提出了一种将导向最小方差(Steered Minimum Variance, STMV)的宽带自适应波束形成与 SPED 结合的宽带检测新方法，通过海试数据的处理，表明这种基于 STMV 的 SPED 方法的性能优于基于常规波束形成(CBF)的 SPED 方法。

关键词：被动声纳；常规能量检测；子带峰值能量检测；STMV 波束形成
中图法分类号：TN911.5 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2011)-06-0484-05
DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2011.06.004

A novel efficient technique to improve performance of passive sonar broadband detection

JIANG Xiao-yong[1], YU Li-yang[2], DU Xuan-min[1]
(1. *Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute*, *Shanghai* 201108, *China*;
2. *Representative Office of Navy at Dalian 426 Factory*, *Dalian* 116005, *Liaoning*, *China*)

Abstract: Broadband energy detection is a traditional method to detect acoustic signals in passive sonar. The performance of conventional energy detection (CED) is becoming worse rapidly in real practical underwater acoustic environment with multiple source signals. Subband peak energy detection (SPED) method can improve performance of CED and spatial resolution of bearing time recording (BTR) display. However, the performance advantage of SPED is affected by beamwidth and sidelobe level of beams. A novel broadband detection technique, which combines steered minimum variance (STMV) adaptive beamforming with SPED, is put forward. Through signal processing of acoustic data from real sea trial, the overall conclusion is that SPED based on STMV provides more increased performance than SPED based on conventional beamforming (CBF).

Key words: passive sonar; conventional energy detection; subband peak energy detection; steered minimum variance adaptive beamforming

0 引 言

被动声纳信号处理主要利用宽带信号检测，能量检测是宽带信号检测常采用的方法[1]。能量检测在非相关噪声场中是单一目标的最优检测器，理论上能达到最佳的最小检测级(Minimum Detectable Level, MDL)。但是在复杂环境下，这种检测器的性能迅速降低。针对能量检测所显示的目标轨迹模糊而且分辨力低的问题，M. Bono 提出了子带峰值能量检测(Subband Peak Energy Detection, SPED)算法。该算法根据频率方位图信息，利用信号峰值的“空间一致性”，对每个子带各个方位上的峰值能量进行求和作为波束输出，以改善声纳显示效果[2]。根据子带峰值能量检测思想，杨晨辉提出了一种波束域峰值能量检测方法。该方法提高了 BTR 显示清晰度，其性能优于 SPED[3]。R. E. Zarnich 等人分析了宽带信号检测方法，指出平滑相干变换(Smoothed Coherent Transform, SCOT)和子带峰值能量检测的检测性能都优于能量检测[4]。T. Suojoki 和 P. Mertsalmi 在常规能量检测基础上提出了一种修改联合滤波(Modified Combination Filtering, MCF)的非线性方法。该方法不仅能够提高方位分辨力，而且有利于远程运动目标的检测[5]。

本文提出了一种将导向最小方差(Steered Minimum Variance，STMV)宽带自适应形成与 SPED 相结合的宽带信号处理方法，可以有效地提高方位分辨力，改善 BTR 显示效果，从而提高被动声纳的宽带检测性能。

收稿日期：2010-12-22；**修回日期**：2011-03-17
作者简介：蒋小勇(1981－)，男，四川广安人，硕士，研究方向为水声信号处理。
通讯作者：蒋小勇，E-mail: jxy2007@live.cn

1　宽带信号检测

通常被动宽带检测是将整个频带划分为若干个子带以供选择，并且在水平面内形成宽带预成多波束，覆盖全部或局部观察扇面。被动宽带信号检测的显示方式包括方位-幅度显示(A 式)和时间-方位显示(B 式)。

宽带检测需要选取合适的预白化滤波器来提高处理增益。常规宽带检测中采用的是矩形滤波器，对各频率成分没有分别加权，从而使噪声的等效带宽小，处理增益较低。为了克服这一点，一般采用 Eckart 滤波器[6,7]，通过对不同频率成分的加权，使背景噪声功率的变化缓慢，从而使噪声的等效带宽增大，处理增益提高。

1.1　常规能量检测

被动声纳所要检测的信号通常是淹没于海洋噪声背景中的水下目标辐射噪声信号。假定 H_0 为仅有背景噪声，H_1 为信号和背景噪声同时存在，则二元假设检验问题可表示为：

$$\begin{aligned} &H_0: x(t)=n(t)\\ &H_1: x(t)=s(t)+n(t) \end{aligned} \tag{1}$$

式中：$x(t)$ 是观测数据；$n(t)$ 为海洋环境噪声，其方差为 σ_n^2；$s(t)$ 为水下运动目标辐射噪声，其方差为 σ_s^2。假设海洋环境噪声和目标辐射噪声均服从高斯分布的平稳随机信号，则水下运动目标辐射噪声的检测就是高斯噪声背景下高斯信号的最佳检测的问题。

设观测的 N 个样本是 $x_1, x_2, \cdots, x_N$，则观测矢量可记为 $\boldsymbol{x}=(x_1, x_2, \cdots, x_N)$，其联合概率密度用 $\Pr(x_1, x_2, \cdots, x_N)$ 来表示。若样本之间是相互独立的，则 $\Pr(\boldsymbol{x})=\Pr(x_1)\cdots\Pr(x_N)$。当仅有噪声存在时，概率密度为：

$$\Pr(\boldsymbol{x}|H_0)=\frac{1}{(2\pi\sigma_n^2)^{N/2}}\exp\left(-\frac{x_1^2+\cdots+x_N^2}{2\sigma_n^2}\right) \tag{2}$$

当信号和噪声同时存在时，概率密度为：

$$\Pr(\boldsymbol{x}|H_1)=\frac{1}{[2\pi(\sigma_s^2+\sigma_n^2]^{N/2}}\exp\left(-\frac{x_1^2+\cdots+x_N^2}{2(\sigma_s^2+\sigma_n^2)}\right) \tag{3}$$

根据最大似然比准则，可得到似然比为：

$$\begin{aligned} \Lambda(\boldsymbol{x})=\frac{\Pr(\boldsymbol{x}|H_1)}{\Pr(\boldsymbol{x}|H_0)}=&\left(\frac{\sigma_n}{\sqrt{\sigma_s^2+\sigma_n^2}}\right)^N\cdot\\ &\exp\left(\frac{\sigma_s^2}{2(\sigma_s^2+\sigma_n^2)\sigma_n^2}(x_1^2+\cdots+x_N^2)\right) \end{aligned} \tag{4}$$

通过对式(4)两边取对数和化简，最佳检测器的检测统计量可表示为：

$$\lambda_N=\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}x_n^2 \tag{5}$$

这种检测器就是能量检测器。它把输入的 N 个样本值平方之后再求平均，然后与某一阈值比较。在 H_0 下，λ_N 服从 N 个自由度的 χ^2 分布；在 H_1 下，λ_N 服从 N 个自由度的非中心 χ^2 分布，其非中心参数为 σ_s^2/σ_n^2。图 1 给出了被动声纳信号的常规能量检测的原理框图。

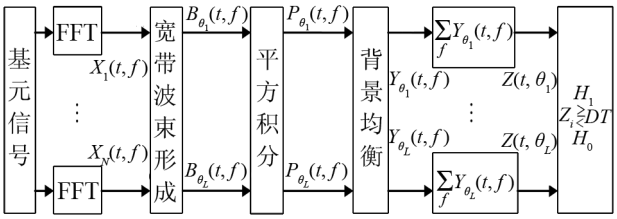

图 1　常规能量检测原理框图

Fig.1　Block diagram of CED

CED(Conventional Energy Detection, CED)输出一般采用 BTR 显示，由于常规波束形成作为宽带能量检测前置处理，其“瑞利限”导致目标方位轨迹模糊，方位分辨力降低，特别是实际海洋环境并不满足非相关噪声场，CED 的检测性能严重下降。因此，对于实际声纳应用，有必要改进 CED，提高方位分辨能力，从而进一步提高宽带信号检测性能。

若在某一方位上存在宽带信号，则在相应的波束内有若干子带表现为局部峰值；若在某一方位上只有噪声，虽然可能也在相应波束的某一子带表现为局部峰值，但是这种局部峰值是随机出现的，不可能在同一方位的大多数子带内均出现局部峰值。目标信号在方位谱上表现出的这种性质常常被称为“空间一致性”。

2.2 子带峰值能量检测

子带能量检测(Subband Energy Detection, SED)算法根据频率方位图信息，利用信号的“空间一致性”，对每个子带在各个方位上的峰值和谷值能量进行累加作为波束输出。SED 算法提高了 BTR 显示的方位分辨力，改善了声纳显示效果，从而增强了宽带检测能力。

子带能量检测同常规能量检测一样都是利用频率方位图信息，不同的是 SED 利用信号峰值和谷值的“空间一致性”，对每个子带在各个方位上的峰值和谷值的能量进行求和，而 CED 是对整个频带各个方位的能量求和。SED 包括子带峰值能量检测(SPED)和子带极值能量检测(Subband Extreme Energy Detection, SEED)。其中，SPED 算法将波束形成的空间方位谱的局部峰值对应的方位看作信号

的波达方向，对每个子带的各个方位选取局部峰值，然后对同一个波束不同子带上的局部峰值进行累加。SPED 算法仅利用峰值信息，而 SEED 算法不仅利用峰值信息而且还利用了谷值信息，它先对每个子带在各个方位上的峰值能量求和，然后减去该子带在各个方位上的谷值能量。本文只对子带峰值能量检测算法进行研究。图 2 给出了子带峰值能量检测的原理框图。

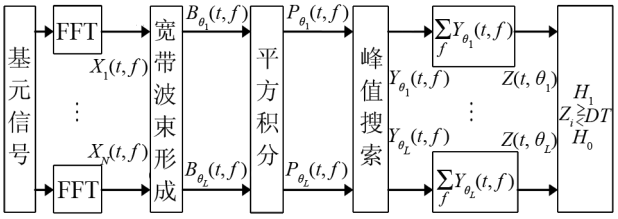

图 2 子带峰值能量检测原理框图
Fig.2 Block diagram of SPED

通过以上分析可知，SPED 剔除了局部峰值以外的子带能量，减少了噪声的影响，从而可以提高方位分辨力和信号检测能力。由于波束宽度和旁瓣影响 SPED 的性能，因此 SPED 的检测效果与波束形成对信号的加强和对干扰抑制所能达到的程度有关。在这种情况下，可以采用高分辨力波束形成替代常规波束形成，首先提高方位分辨力，再进一步应用 SPED 算法提高检测性能。

2 STMV 波束形成[8,9]

常规波束形成方法具有运算量小、稳健性好和实时性强等优点，在阵列信号处理得到广泛应用。但是常规波束形成受“瑞利限”的限制，对同一波束宽度内的多个目标不能分辨，抗干扰能力较差。STMV 是一种宽带自适应波束形成方法，具有良好的空间分辨力和旁瓣抑制能力。

考虑由 N 个阵元组成等间隔均匀线阵，阵元间距为 d，空间存在 M 个信号源，则线阵的第 n 个阵元信号输出 $x_n(t)$ 可表示为：

$$x_n(t)=\sum_{m=1}^{M}s_m(t-\tau_n(\theta))+v_n(t) \tag{6}$$

式(6)中：$s_m(t)$ 为入射宽带信号；$v_n(t)$ 为背景噪声；$\tau_n(\theta)=(n-1)d\cos(\theta)/c$，$n=1,2,\cdots,N$。对各阵元输出信号作 FFT，得到各阵元在频率 f_k 的频域数据向量 $\boldsymbol{X}(f_k)$，则预处理后的频域数据向量 $\boldsymbol{Y}(f_k,\theta)$ 可表示为：

$$\boldsymbol{Y}(f_k,\theta)=\boldsymbol{T}(f_k,\theta)\boldsymbol{X}(f_k) \tag{7}$$

式中，$\boldsymbol{T}(f_k,\theta)$ 为对角导向矩阵，即对角元素与常规波束形成的阵列流形向量一致，可表示为：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{T}(f_k,\theta)=&\mathrm{diag}[\exp(\mathrm{j}2\pi f_k\tau_1(\theta),\\&\exp(\mathrm{j}2\pi f_k\tau_2(\theta),\cdots,\exp(\mathrm{j}2\pi f_k\tau_N(\theta))]\end{aligned} \tag{8}$$

导向协方差矩阵(Steered Covariance Matrix, STCM)可表示为：

$$\boldsymbol{R}_{STCM}(\Delta f,\theta)=\sum_{k=l}^{K}\boldsymbol{T}(f_k,\theta)\boldsymbol{R}(f_k)\boldsymbol{T}^{\mathrm{H}}(f_k,\theta) \tag{9}$$

式(9)中，$\boldsymbol{R}(f_k)$ 为频率 f_k 的互谱密度矩阵，Δf 为处理的频带范围，$k=l,l+1,\cdots,K$ 为相应的频率下标。STMV 自适应波束形成的最佳权向量为：

$$\boldsymbol{W}(\theta)=\frac{\boldsymbol{R}_{\mathrm{STCM}}^{-1}(\Delta f,\theta)\boldsymbol{1}_N}{\boldsymbol{1}_N^{\mathrm{H}}\boldsymbol{R}_{\mathrm{STCM}}^{-1}(\Delta f,\theta)\boldsymbol{1}_N} \tag{10}$$

式(10)中，$\boldsymbol{1}_N$ 为 N 维单位向量。STMV 波束输出为：

$$\boldsymbol{B}(f_k,\theta)=\boldsymbol{W}^{H}(\theta)\boldsymbol{Y}(f_k,\theta) \tag{11}$$

因此，STMV 的输出功率为：

$$\boldsymbol{P}_{STMV}(\theta)=\frac{1}{\boldsymbol{1}_N^{\mathrm{H}}\boldsymbol{R}_{\mathrm{STCM}}^{-1}(\Delta f,\theta)\boldsymbol{1}_N} \tag{12}$$

由于 STMV 的波束主瓣宽度窄，旁瓣抑制能力强，当沿着每个子带的各个方位挑选局部峰值时，局部峰值所在的方位更加准确，同时减少了旁瓣对邻近方位的影响。因此，采用 STMV 与 SPED 相结合的处理方法，可以进一步提高被动声纳的宽带检测性能。

3 计算机仿真及海试数据处理

3.1 仿真计算

假设均匀线列阵由 48 个水听器组成，按半波长布阵，阵元间距为 0.3 m，采样频率为 10 kHz。设定两个宽带目标信号，带宽均为 1000 Hz，其入射方位分别为 95°和 100°，背景噪声为海洋环境噪声，信噪比分别为−15 dB，−10 dB。

图 3 给出了 CBF 的 CED 和 SPED 的仿真结果。由于两个邻近信号处在同一波束宽度内，CED 不能分辨出从 95°和 100°入射的两个信号，而 SPED 利用目标信号峰值的“空间一致性”的特点，对每个波束选取的各个子带的局部峰值进行能量求和，使得目标信号所产生的局部峰值得到加强，提高目标信号的检测能力，使得两个邻近信号得以区分。图 4 给出了 STMV 的 CED 和 SPED 仿真结果，表明 SPED 适用于 STMV 处理。

3.2 试验数据处理

试验采用 48 阵元均匀线列阵，按半波长布阵，阵元间距为 0.3m，采样频率为 10kHz。试验数据长度为 8 min，数据重叠 50%，每个快拍处理数据段

长度为 8192 个采样点。

图 5、图 6、图 7 和图 8 给出了常规能量检测和子带峰值能量检测的海试数据处理结果。在 300s 至 350s 的观测时间内，且在 75°方位附近，从时间方位历程图上可观察到两个目标靠得很近，而且其轨迹相互重叠，CED 很难区分，而 SPED 能够有效区分，75°附近目标的发现时间至少提前了 30s。

由于 CBF 对旁瓣的抑制能力差，从图 5 和图 6 可以看出，无论是 CED 还是 SPED，在整个历程上可观测到目标的能量泄露到旁瓣，导致强干扰目标的旁瓣将弱信号目标淹没。而 STMV 具有窄的主瓣波束宽度和较好的旁瓣抑制能力，从图 7 和图 8

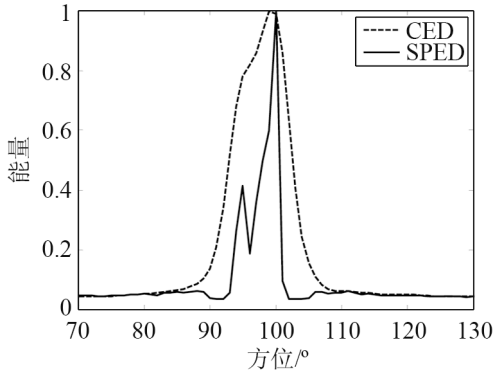

图 3　常规波束形成的常规能量检测和子带峰值能量检测
Fig.3　CED and SPED of common beamforming

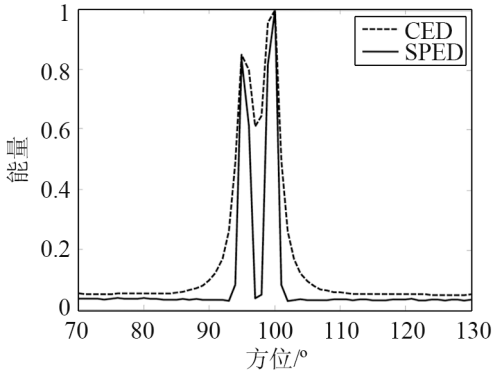

图 4　STMV 波束形成的常规能量检测和子带峰值能量检测
Fig.4　CED and SPED of STMV beamforming

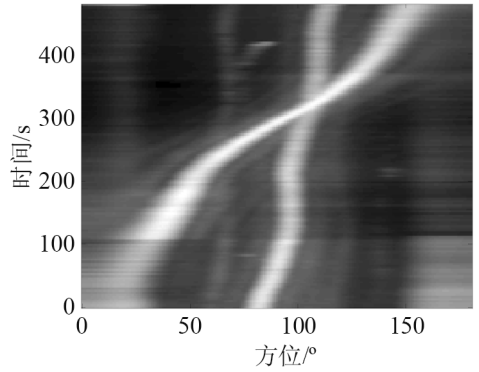

图 5　常规波束形成的常规能量检测
Fig.5　CED of common beamforming

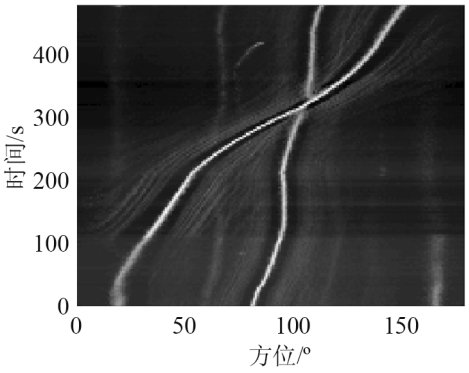

图 6　常规波束形成的子带峰值能量检测
Fig.6　SPED of common beamforming

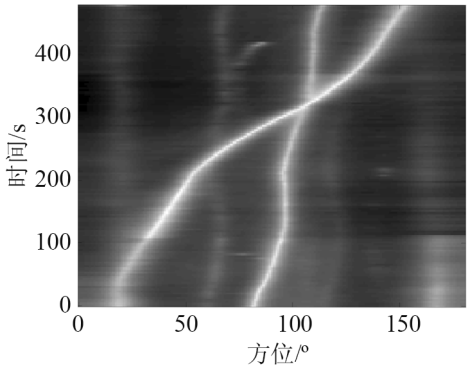

图 7　STMV 波束形成的常规能量检测
Fig.7　CED of STMV beamforming

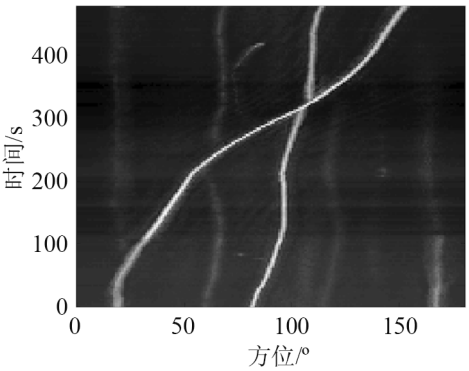

图 8　STMV 波束形成的子带峰值能量检测
Fig.8　SPED of STMV beamforming

可以看出，BTR 显示目标轨迹更加清晰，强干扰目标的旁瓣被抑制，从而减少其旁瓣对其它目标的影响。因此，SPED 的性能优于 CED，STMV 优于 CBF，STMV 的 SPED 的检测性能优于 CBF 的 SPED。

4　结 论

本文对 CBF 的 CED 处理和 SPED 处理进行了比较，并提出了一种将 STMV 与 SPED 相结合的宽带检测新方法。通过计算机仿真和海试数据的处理，表明所提出的新方法可以提高目标方位分辨

力，改善时间方位历程的显示效果，显著提高被动声纳的宽带检测性能。本文所提出的宽带检测方法性能稳定、计算量小，适合在被动声纳信号处理中进行工程应用。

参 考 文 献

[1] Burdic W S. Underwater acoustic system analysis (Second Edition)[M]. USA: Prentice Hall, 1991.

[2] Bono M, Shapo B. Subband energy detection in passive array processing[R]. ADA405484, 2000.

[3] 杨晨辉, 马远良, 杨益新. 峰值能量检测及其在被动声纳显示中的应用[J]. 应用声学, 2003, **22**(5): 31-35.
YANG Chenhui, MA Yuanliang, YANG Yixin. Peak energy detection with application to passive sonar display[J]. Applied Acoustics, 2003, **22**(5): 31-35.

[4] Zarnich B E. A fresh look at broadband passive sonar processing[J]. Adaptive Sensor Array Processing Workshop, 1999: 99-104.

[5] Suojoki T, Tabus I, Mertsalmi P. A novel target detection method for passive broadband system[C]// Proceedings of the Seventh European Conference on Underwater Acoustics, 2004: 999-1006.

[6] 郑兆宁, 向大威. 水声信号被动检测与参数估计理论[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
ZHENG Zhaoning, XIANG Dawei. Parametric estimation theory and passive detection of underwater acoustic signal[M]. Beijing: Science Press, 1983.

[7] Mehta S K, Fay J, Maciejewski P. A modified eckart post beamformer filter for improved detection using broadband features[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1996, 6: 3045-3048.

[8] Stergiopoulos Stergios. Advanced signal processing handbook[M]. CRC Press LLC, 2001.

[9] Kim J S, Lee J H. MVDR method using subband decomposition for high frequency resolution in passive sonar system[C]// UDT Korea, 2002.

• 简 讯 •

“第十二届全国噪声与振动控制工程学术会议”于 2011 年 11 月初在无锡召开

2011 年 11 月 2-4 日第十二届全国噪声与振动控制工程学术会议在无锡成功召开。本届会议除了原有的中国环保产业协会噪声与振动控制专业委员会牵头组织，联合国内相关其他七个学会、协会及香港声学会协同主办外，又新吸收了台湾音响学会和台湾噪声振动工程学会加盟，共十一个学会协会联办，表明中国的噪声与振动控制工程学术会议在不断地壮大和持续地发展。这个全国性学术会议从 1982 年在黄山召开第一届到 2011 年在无锡召开第十二届，已经经历了近 30 个年头，这也反映了我国噪声与振动控制技术及建筑声学领域在持续不断地发展、进步和提高，在环保产业领域中新成果、新技术、新产品在不断地开发和涌现，并向产业化发展，这显得十分可喜。

本届会议的主题是“促进噪声振动控制技术发展、改善我国城乡声环境质量”，会议内容十分丰富，包括大会专题报告、分组学术交流、企业发展及产品介绍、新产品新材料展示及企业家论坛等。学术交流的内容涉及到建筑声学、环境声学、交通噪声及振动控制、工程设计实践、材料设备与产品的研发、标准、规范及评价测试等各个领域，特别是在大会特邀报告中从美国远道而来的美国绿色环境科学研究院院长方丹群教授为会议作了“噪声振动工程学、环境声学、环境物理学学科体系与进展”的精彩报告。上海现代建筑设计集团章奎生声学设计研究所的章奎生教授为会议作了“专业音乐厅声学设计的实践与思考”的综述报告、中科院声学所程明昆研究员、北京劳保所所长张斌研究员、铁科院辜小安研究员和邵斌秘书长也分别为大会作了“新版环境影响评价技术导则声环境解读”、“我国环境噪声污染防治工作的机遇与挑战”、“城市轨道交通环境影响评价和噪声振动控制技术”和“城市轨道交通隔振技术的实践与思考”等重要而精彩的报告，引起与会代表们的极大兴趣和高度关注。

本届会议由无锡顺利达节能降噪材料有限公司具体承办，会议由全国噪声与振动控制委员会邵斌秘书长主持，由主任委员章奎生教授致开幕词，会议委请上海交通大学《噪声与振动控制》编辑部正式出版了集 86 篇文章共 366 页的论文集，并请章奎生主任作了前言。在大小会议上开展了充分的交流和热烈的讨论。会议开得圆满成功，各地代表都反映收获颇多、受益匪浅，希望两年一度的学术会议持续不断地办下去。

《声学技术》编辑部