MVDR 自适应波束形成技术在水声中的研究进展

许 光[1]，周胜增[2]
(1. 海军驻上海地区水声导航系统军代表室，上海 201108；
2. 上海船舶电子设备研究所，上海 201108)

摘要：高分辨波束形成器比常规波束形成具有更好的方位分辨力与干扰抑制能力。该波束形成器能够提高阵列输出信干噪比，从而提高声呐的探测性能。与多重信号分类、旋转不变子空间等方法相比，最小方差无畸变响应(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)波束形成器输出真实反映了观察方向的信号功率，同时可提供波束时间序列做后置处理，在水声阵列处理领域得到了快速发展和深入研究。对高分辨 MVDR 技术在水声阵列处理中的研究进展进行了回顾，重点介绍了其宽带处理、稳健性、运动补偿、解相干等国内外的研究热点和最新成果，同时给出其在各种水声阵列处理领域的应用前景。

关键词：最小方差无畸变响应；稳健性处理；宽带处理；运动补偿；解相干；高分辨力波束形成
中图分类号：TB556　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-3630(2014)-06-0554-05
DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2014.06.015

Development and application of MVDR adaptive beamforming technique in underwater acoustic

XU Guang[1], ZHOU Sheng-zeng[2]
(1. *Shanghai District Underwater Acoustic Navigation System Representative Office of Navy*, *Shanghai*, 201108, *China*;
2. *Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai*, 201108, *China*)

Abstract: The azimuth resolution and anti-interference capability of high-resolution beamformer are better than conventional beamformer. It can improve the output SINR (signal to interference plus noise ratio) of receive array, and so the sonar detection performance can be enhanced. Compared with MUSIC and ESPRIT, the true signal power can be given by MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) beamformer, and meanwhile the time waveform series of beam can be given for post processing. So MVDR is developed quickly and researched deeply in acoustic array processing. In this paper, the development of high-resolution MVDR beamforming technique for underwater acoustic array is reviewed. The research hotspots and new achievements of MVDR are discussed, including wideband processing, robustness, target motion compensation and decorrelation. Furthermore, various application prospects of MVDR in acoustic array processing are given.

Key words: Minimum Variance Distortionless Response(MVDR); robust processing; wideband processing; motion compensation; decorrelation; high-resolution beamformer

0 引 言

声呐设备利用水声传感器阵列和信号处理手段实现对水下目标的检测、跟踪、定位和识别。波束形成是声呐信号处理的核心部件，也是声呐信号处理运算量的重要部分。图 1 给出了声呐信号处理基本流程与模块。常规波束形成(Conventional Beamforming, CBF)的角度分辨力受到“瑞利限”限制，不能分辨波束宽度内的多个目标，且旁瓣级固定，无法抑制强干扰，在复杂水声环境条件下影响声呐设备的使用性能。

自适应波束形成(Adaptive Beamforming, ABF)具有高分辨力和抗干扰能力，在提高声呐性能方面潜力巨大。典型的 ABF 算法有最小方差无畸变响应 (Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)、多重信号分类(Multiple Signal Classification, MUSIC)、旋转不变子空间(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques, ESPRIT)等。其中 MVDR 自适应波束形成的输出真实反映了观察方向的信号功率，同时可提供波束时间序列做后置处理，在水声阵列处理领域得到了快速发展和深入研究。本文对 MVDR 在水声中的应用特点和研究热点进行梳理总结，并给出各种应用

收稿日期：2014-04-16；**修回日期：**2014-07-17
作者简介：许光(1973－)，男，江苏无锡人，工程师，研究方向为信号与信息处理。
通讯作者：周胜增，E-mail: view222@sina.com

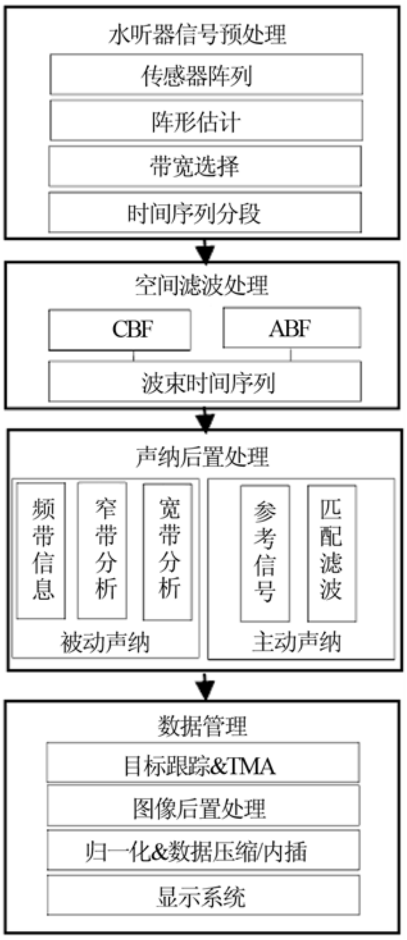

图 1　声呐系统信号处理基本流程图
Fig.1　The basic flowchart of sonar signal processing

前景。

1　MVDR 在水声应用中的限制

MVDR 波束形成器在雷达、声呐、无线通信、医学成像、地质勘探、射电天文学、语音等多种领域具有广泛的应用。该技术在水声中的应用存在以下特点：

(1) MVDR 是一种窄带波束形成器。在水声应用中宽带信号源大量存在，水面舰船、潜艇、鱼雷等目标的辐射噪声一般覆盖多个倍频程，主动声呐的发射信号也是宽带脉冲调制信号。

(2) 模型失配问题。MVDR 的优异性能是建立在阵列信号模型精确已知的基础上。由于存在阵列标定误差、DOA 误差、空间矩阵估计误差等实际因素，自适应处理会将期望信号误认为是干扰信号进行抑制，导致最终输出信干噪比下降，严重时甚至比 CBF 效果还要差。

(3) 目标运动效应。目前为止 MVDR 技术和分析忽略了声源运动的任何效应。实际水下目标运动将产生多普勒偏移、有效数据采样时间短等问题，导致信号和干扰对应的特征空间不能有效分离，MVDR 固有的抗干扰能力下降。

(4) 相干源抵消效应。在实际应用中，因为多途传播、人为干扰等因素，出现相干源条件，此时常规 MVDR 算法性能严重恶化，出现“信号对消”现象。

2　MVDR 在水声中的研究热点

Capon[1]于 1969 年提出了使阵增益最高的 MVDR 波束形成器，具有里程碑意义。

上述 MVDR 在水声应用中的限制影响了它的实际应用。国内外的研究热点是克服其在水声应用中的各种不利因素，以保证其高分辨和抗干扰能力，从而提高声呐性能。

2.1　宽带 MVDR 技术

目前对宽带信号 MVDR 处理主要分为两类：非相干方法和相干方法。

(1) 非相干宽带处理

非相干处理认为宽带信号源的不同频率成分间是不相关的。将宽带数据划分成多个窄带后进行 MVDR 波束形成，最后将所有频率波束能量相加得到宽带结果[2]。这种非相干处理存在运算量大、目标信息损失等缺点。蒋飚[3]等研究了一种低计算量时域 MVDR 算法，通过频带选择、频谱搬移、Hilbert 变换和子带分解等措施得到各子带信号的基带信号，最后将各子带 MVDR 结果非相干累加，运算量较小。

(2) 相干宽带处理

Wang[4]等利用聚焦矩阵将宽带内的不同频率聚焦到参考频率，再利用窄带 MVDR 算法进行方位谱估计。Sivanand[5]等给出了聚焦滤波矩阵的设计方法。宽带聚焦 MVDR 算法利用带宽信息缩减了算法收敛时间，但是需要目标方位的先验信息，且波束输出结果不再包含目标的频谱分布特征，无法进行参数估计和分类识别等波束形成后置处理。Kam[6]给出了宽带主动声呐中相干 MVDR 处理方法，通过空间重采样技术获得不同频率的重采样位置，采样结果最终与具体频率无关。Jeffrey Krolik[7]等提出了驾驶最小方差(Steered Minimum Variance, STMV)算法，通过不同频率和方位对应驾驶向量获得相干积累的驾驶协方差矩阵(Steered Covariance Matrix, STCM)，可有效减小收敛时间。但对于大孔径接收阵，这种基元域全阵处理往往失调严重，而

且计算量巨大。Swingler[8]提出一种低复杂度 STMV 算法，通过子阵划分将 STMV 扩展到各子阵波束域进行，有效降低矩阵维数，同时各子阵波束形成采用 CBF 方法，稳健性也高于 STMV。周胜增等[9]提出了一种子带子阵宽带相干 MVDR 波束形成方法，有效减小了空间相关矩阵欠估计时产生的失调效应。

2.2 稳健 MVDR 技术

在水声阵列 MVDR 研究过程中，如何提高其对阵列误差的稳健性是 MVDR 进入工程应用前必须解决的难题。造成阵列模型失配的误差源主要包括[10]：

(1) DOA 误差：目标真实方位角与扫描波束方位角偏差；

(2) 阵列标定误差：水听器幅相校准误差及阵元位置偏差；

(3) 空间协方差矩阵估计误差：由于小快拍样本数造成的估计误差；

(4) 声传播模型：目标到接收阵传播模型偏差，如近场效应等。

在过去 30 多年中，出现了许多提高 MVDR 稳健性的方法。Cox[11]详细讨论了导向向量失配对 MVDR 性能的影响，并最早提出了对角加载稳健 MVDR 方法。Carlson[12]利用对角加载方法减小阵列协方差矩阵的估计误差问题。R.Wu[13]等利用对角加载方法更好地控制波束旁瓣级。对角加载类方法的最大问题是难以确定对角加载量的大小。C.-C.Lee[14]等提出的基于子空间类稳健 ABF 需要精确知道噪声协方差矩阵，不能同时克服导向向量失配和噪声协方差矩阵估计误差的影响。Vorobyov[15]等人提出了最差性能最佳化方法，该方法假设了导向向量误差范数上界已知，实际应用时需用估计值代替。

最近几年来涌现出许多基于导向矢量不确定集约束的稳健 Capon 算法(Robust Capon Beamforming, RCB)[16~17]，理论意义更明晰，能够真正利用导向向量误差信息估计 MVDR 权向量。该类算法将期望信号导向向量约束于各种不确定集中，从而确保了导向向量误差在一定范围内变动时，仍能保持较理想的性能。该算法本质上也属于对角加载类算法，其不同是加载量大小可根据导向向量误差进行确定。戴凌燕[18]等在 RCB 基础上推导出期望信号导向向量属于球形不确定集时的权向量近似闭式解，便于进行算法性能评估，分析算法输出性能。上述 RCB 是在窄带 MVDR 基础上进行改进得到的。对于宽带被动声呐，D. Somasundaram[19]将 RCB 与宽带相干 STMV 技术结合，给出了宽带稳健 Capon 波束形成方法，可有效克服失配条件下期望信号抵消现象。为了进一步降低计算复杂度和提高算法收敛速度，D. Somasundaram 给出宽带子阵 RCB[20]方法，适应于被动声呐大孔径接收阵，并将其扩展到任意阵形结构进行仿真和数据处理分析。Thorsten Bogner[21]等人将RCB推广到中高频圆柱阵声呐中，通过对阿特拉斯公司研制的圆柱阵声呐采集数据进行分析，证明了 RCB 可以提高被动潜艇声呐的探测性能。G. GAONACH[22]对降维子阵自适应波形成处理方法进行详细讨论，重点比较 CA(Conventional then Adaptive)、AC(Adaptive then Conventional)和 AA(Adaptive then Adaptive)不同过程的角度分辨力、抗干扰能力和指向性指数。

国内鄢社锋等人将二阶锥规划技术引入到传感器阵列的波束优化设计中，形成了波束优化设计的较完备的理论框架[10]。作者主要贡献是将范数约束 Capon 波束形成器转化为二阶锥规划问题，然后采用已有的内点算法求解。

2.3 目标运动补偿 MVDR 技术

声源运动导致多普勒偏移和频谱展宽，这种不利影响可以通过使用依赖目标速度的改进导向向量进行处理。S. U. Pillai[23]将这种二维联合 MVDR 处理引入到被动声呐中，提出了宽带空时自适应处理方法，可以对目标方位和速度进行联合估计，并给出仿真结果。声源运动带来的另一困难是数据统计特性将不再平稳，与数据采样的长时间平稳产生冲突。对于快速运动声源，波束驻留时间短，空间矩阵的特征值离散度增加，信号和干扰对应的特征空间不能有效分离，抗干扰能力下降，系统增益降低。T. C. Yang[24]提出一种运动补偿 MVDR 算法，实时改变计算波束域协方差矩阵的波束方位来跟踪目标方位变化，运动效应得到有效补偿，从而提高 MVDR 对运动目标的检测能力。

2.4 解相干 MVDR 技术

MVDR 的一个重要问题是解相干，即要对数据做预处理，消除或减弱信源之间的相关性。目前解相干的处理基本有两大类：一类是降维处理；另一类是非降维处理。Reddy[25]等提出了降维的空间平滑解相干处理，通过前/后向空间平滑处理破坏期望信号与干扰的相关性。Di A[26]提出了基于矩阵重构的降维解相干处理方法，需要利用奇异值分解估计信号子空间与噪声子空间。降维处理缺点在于阵列孔径存在损失。Yang and Caveh[27]频域平滑技术

克服了相干源带来的秩亏问题，这类算法适用于特定的宽带信号条件。近来 Seungil Kim[28]提出了相干源条件下最优 MVDR 处理方法，即相干结合信干噪比(CC-SINR)，将相干干扰作为期望信号的拷贝并与其相干结合，仿真结果证明 CC-SINR 的波束输出 SINR 要优于传统的解相干方法。

3 MVDR 在水声阵列中应用研究

MVDR 算法适用均匀线列阵、圆阵、体积阵、矢量阵、三元组线列阵等各种阵列形式，因此具有广泛的应用前景。

C. Bao[29]等利用圆阵声呐数据对 MVDR 和 CBF 处理性能进行了对比分析，证明 MVDR 在平台自噪声抑制、旁瓣抑制和方位分辨力方面优于 CBF。

在航空吊放声呐和浮标声呐中出现了新的基阵形式即体积阵，由于受到基阵结构杂乱散射、反射的影响，阵列向量更容易产生误差。洪常委[30]等将稳健 MVDR 方法应用于体积阵处理，提出了宽容性体积阵优化波束形成方法，提高系统性能。

矢量阵 MVDR 处理已经得到了一定的研究，宽带、稳健等热点均已扩展到矢量阵处理中。刘凯、梁国龙[31]讨论了矢量阵随机阵元位置误差和姿态误差对矢量阵 MVDR 阵增益的影响，可为声矢量阵列系统的布放、相关算法的设计以及鲁棒性能的评估提供参考。陈阳、惠俊英[32]将宽带相干 STMV 处理推广到矢量阵中。涂英、蔡惠智[33]将 RCB 应用到矢量阵处理中，有效避免了因导向矢量失配导致的性能下降，并给出海试数据处理结果。梁国龙[34]等提出了基于洛仑兹规划的声矢量阵宽容 MVDR 方法，仿真证明其噪声抑制能力优于 CBF，宽容性优于 MVDR。

三元组线列阵可以形成心形指向性图，从而实现实时左右舷分辨[35]。三元组线列阵自适应波束形成是一种波束域 MVDR 波束形成方法，在保证左右舷分辨的同时，左右波束输出旁瓣更低，对噪声和干扰抑制能力增强[36]。

4 结 语

本文对水声中 MVDR 技术研究热点和应用进行介绍。众多国内外研究学者主要围绕稳健性、宽带信号处理、目标运动补偿、解相干等问题开展理论研究和改进设计，并且已在某些声呐中得到了工程应用，获得了明显的性能提高。同时 MVDR 适用于线阵，圆阵、体积阵、矢量阵、三元组线列阵等多种水声阵列形式，应用前景广泛。

参 考 文 献

[1] Capon J. High resolution frequency wavenumber spectrum analysis[J]. Proceeding of the IEEE, 1969, **57**(8): 1408-1418.

[2] Byung-Chul Kim, Itai Lu. High resolution broadband beamforming based on the MVDR method[C]// OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition, 2000, 3: 16730-1676.

[3] 蒋飚，朱埜. 一种宽带高分辨 MVDR 有效算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2005, **27**(7): 1186-1188.
JIANG Biao, ZHU Ye. Research on an efficient wideband high resolution MVDR algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, **27**(7): 1186-1188.

[4] Wang H, Kaveh M. Coherent signal-subspace processing for detection and estimation of angles of arrival for multiple wideband sources[J]. IEEE Transactions on Acoustic Speech and Signal Processing, 1985, ASSP-**33**(4): 823-831.

[5] Sivanand S, Yang J F, Kaveh M. Focusing filters for wideband direction finding[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1991, **39**(2): 437-445.

[6] Lo K W. Adaptive array processing for wide-Band active sonar[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, **29**(3): 837-846.

[7] Jeffrey Krolik, David Swingler. Multiple broadband source location using steered covariance matrix[J]. IEEE Transactions on Acoustic Speech and signal processing, 1989, **37**(10): 837-846.

[8] Swingler D N. A low-complexity MVDR beamformer for use with short observation times[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, **47**(4): 1154-1160.

[9] 周胜增，杜选民. 快速收敛最小方差无畸变响应算法研究与应用[J]. 声学学报, 2009, **34**(6): 515-520.
ZHOU Shengzeng, DU Xuanmin. Research and application of fast-convergent minimum variance distortionless response algorithm[J]. Acta Acustica. 2009, **34**(6): 515-520.

[10] 鄢社锋，马远良. 传感器阵列波束优化设计及应用[M]. 北京：科学出版社, 2008: 3-5.
YAN Shefeng, MA Yuanliang. Sensor array beampattern optimization: theory with applications[M]. Beijing: Science Press, 2008: 3-5.

[11] Cox H. Robust adaptive beamforming[J]. IEEE Transactions on Acoustic Speech and Signal Processing, 1987, ASSP-**35**(10): 1365-1375.

[12] Carlson B D. Covariance matrix estimation errors and diagonal loading in adaptive arrays[J]. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 1988, **24**(4): 397-401.

[13] Wu R, Bao Z, Ma Y. Control of peak sidelobe level in adaptive arrays[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1996, **44**(10): 1341-1347.

[14] Lee C C, Lee J H. Robust adaptive array beamforming understeering vector errors[J]. IEEE Trans. Antennas Propagate., 1997, **45**(1): 168-175.

[15] Vorobyov S A, Gershman A B, Luo Z Q. Robust adaptive beamforming using worst-case performance optimization: A solution to the signal mismatch problem[J]. IEEE Trans. Signal Process., 2003, **51**(2): 313-324.

[16] Li J, Stoica P, Wang Z S. On robust Capon beamforming and diagonal loading[J]. IEEE Trans. Signal Process, 2003, **51**(7): 1702-1715.

[17] Li J, Stoica P. Robust adaptive beamforming[M]. New York: Wiley, 2005.

[18] 戴凌燕，王永良. 基于不确定集的稳健 Capon 波束形成算法性能

分析[J]. 电子与信息学报, 2009, **31**(12): 2931-2936.
DAI Lingyan, WANG Yongliang. Performance analysis of robust Capon beamforming based on uncertainty set[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, **31**(12): 2931-2936.

[19] Samuel D Somasundaram. Broadband robust adaptive beamforming for passive sonar[C]// UDT2011.

[20] Samuel D Somasundaram. Wideband robust Capon beamforming for passive sonar[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2013, **38**(2): 308-322.

[21] Thorsten Bogner, Kevin Brinkmanny. Robust adaptive beamforming for the Cylindrical Array Sonar[J]. UDT2011.

[22] Gilles GAONACH. Adaptive Subarrays Beamforming[C]// Proceedings of MTS/IEEE Oceans 2013.

[23] Pillai S U. Wideband stap(WB-STAP) for passive sonar[C]// Confenence Oceans 2003: 2814-2818.

[24] Yang T C. Motion compensation for adaptive horizontal line array processing[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2003, **113**(1): 245-260.

[25] Reddy V U, Paulraj A. Performance analysis of the optimum beamformer in the presence of correlated sources and its behavior under spatial smoothing[C]// IEEE Trans. Acoust, Speech, Signal Processing(ICASSP-96). ASSP-**35**, 1987, 927-936.

[26] Di A. Multiple source location-a matrix decomposition approach[J]. IEEE Trans. ASSP, 1985, **33**(4):1086-1091.

[27] Yang J F, Kaveh M. Coherent signal-subspace transformation beamformer[C]]// Radar and Signal Processing, IEEE Proceedings F, 1990: 267-275.

[28] Seungil Kim. Optimum beamformer in correlated source environments[J]. J. Acoust. Soc. Am., **120**(6): 3771-3781.

[29] Bao C, Bertilone D C. Application of MVDR beamforming to circular sonar array data[C]// Proceedings Undersea Defence Technology. Cheju Island, Korea, October 2002.

[30] 洪常委, 凌国民. 宽容性体积阵优化波束形成[J]. 船舶工程, 2007, **29**(5), 72-75.
HONG Changwei, LING Guomin. Robust volumetric array optimization of beam forming[J]. Ship Engineering, 2007, **29**(5): 72-75.

[31] 刘凯, 梁国龙. 随机阵列误差影响下的声矢量阵噪声特性和阵增益[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, **32**(5): 624-631.
LIU Kai, LIANG Guolong. Noise characteristics and array gain of an acoustic vector-sensor array influenced by random array errors[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, **32**(5): 624-631, .

[32] 陈阳, 惠俊英. 声矢量阵导向最小方差波束形成算法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, **29**(11): 1199-1204.
CHEN Yang, HUI Junying. Acoustic vector–sensor array steered minimum variance beamforming[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, **29**(11): 1199-1204.

[33] 涂英, 蔡惠智. 宽容自适应波束形成在矢量阵上的应用[J]. 声学技术, 2007, **26**(4): 696-700.
TU Ying, CAI Huizhi. Application of robust capon beamforming to vector sensor array[J]. Technical Acoustics, 2007, **26**(4): 696-700.

[34] 梁国龙, 刘凯. 基于洛仑兹规划的声矢量阵宽容自适应波束形成[J]. 声学技术, 2011, **30**(1): 98-101.
LIANG Guolong, LIU Kai. Robust adaptive beamforming of acoustic vector sensor array based on Lorentz Cone Programming[J]. Technical Acoustics, 2011, **30**(1): 98-101.

[35] Doisy Y. Port-starboard discriminate on performances on active towed array systems[C]// UDT 1995 Europe, 125-129.

[36] Groen J, Beerens S P, Been R, et al. Adaptive port-starboard beamforming of triplet sonar arrays[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, **30**(2): 348-359.

Meyer & YAMAHA 音响新技术研讨会在上海召开

为了促进电声新技术交流，推介专业音响数字化、网络化的最新技术成就，上海市声学学会电声专业委员会和上海广远电子技术有限公司，于 2014 年 11 月 6 日在上海大剧院八楼宴会厅，联合主办了“Meyer & YAMAHA 音响新技术研讨会”。会上由上海广远电子技术有限公司技术总监杨立森讲述著名的美国 Meyer Sound 公司的 LYON 和 MINA 系列线阵列音响、CAL 线阵列式音柱、Constellation 电子可变混响系统等新产品；由日本 YAMAHA 公司技术工程师钱杰分析 CL/QL 系列新型数字调音台和 Dante 数字音频网络传输技术等。

上海市声学学会电声专业委员会主任梁华教授、上海广远电子技术公司总经理曹益群在会上致开幕词，Meyer Sound 公司总裁亲临会场指导。会后全体与会者参观了最近改扩建后的上海大剧院音响系统。上海市声学学会理事、上海大剧院音响主管刘豪对大剧院音响系统设计和扬声器布置在现场作了讲解。

参加这次会议共计 150 多人，有上海市声学学会的理事和会员、专家和教授等，还有许多从事专业音响、剧场和文艺演出行业的设计人员和工程技术人员，以及从事智能建筑弱电系统设计和管理的工程技术人员、集成公司的经理等。这次会议内容新颖、反映热烈、效果良好，收到了与会者的好评。

同济大学声学研究所 梁华