

广义互相关时延估计声定位算法研究

景思源¹, 冯西安¹, 张亚辉²

(1. 西北工业大学航海学院, 陕西西安 710072, 2. 中国华阴兵器试验中心, 陕西华阴 714200)

摘要: 针对地面目标声定位因信噪比较低而定位精度差的现象, 提出了基于广义互相关法的声定位系统, 根据平面四元法目标定位计算式, 研究了广义互相关算法在实际中的应用。环境噪声、军事目标声和民用目标声频谱范围大多集中, 即出现目标声会与背景噪声高度重合的情况, 发现一般加窗滤波法在降低噪声的同时亦会将目标声强度大大削弱, 而广义互相关时延估计法是通过计算两路信号互相关函数的最大值而求得时延差, 其精度高、稳定性好。通过计算机仿真得到在信噪比较低的情况下, 加窗滤波法因大大削弱目标声强度而造成定位精度较低, 而利用广义互相关方法可得到较为精确的声定位坐标。

关键词: 时延估计; 平面四元阵; 广义互相关

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-05-0464-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.05.015

Study of a generalized cross-correlation time delay estimation based acoustic positioning algorithm

JING Si-yuan¹, FENG Xi-an¹, ZHANG Ya-hui²

(1. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

2. Huayin Weapon Test Center, Xi'an 714200, Shaanxi, China)

Abstract: To solve the low precision problem of acoustic positioning for ground targets in low signal noise ratio (SNR), this paper puts forward an acoustic positioning system based on the generalized cross-correlation method. The practical application of the generalized cross-correlation algorithm is studied according to the calculation formulas of the planar four-element array positioning method. Owing to the fact that the spectrums of environmental noise, military target drone and civilian target drone are possibly similar, using the general window filtering method to reduce noise could weaken the target acoustic intensity greatly. However, the high accuracy and good stability could be achieved by using the generalized cross-correlation time delay estimation method, in which the difference of time delay is obtained by calculating the peak of the cross-correlation function between the signals from two channels. In the low SNR condition, the computer simulations show that the adding filtering window method makes lower localization accuracy, but the use of the generalized cross-correlation method can get more precise positioning coordinates.

Key words: time delay estimation; four-element plane array; generalized cross-correlation

0 引言

上世纪 80 年代开始, 美国人率先起步, 运用人工智能和微电子技术研制出具有战场侦测、目标定位跟踪和敌我识别等综合作战能力的声探测系统, 随后各式反坦克雷、反直升机的雷等多种自动预警雷应运而生, 这些雷都可通过声音信号捕获目标, 测定速度和方位。目前, 其他欧美国家单兵作战系统中也大多包含了声定位技术装备^[1,2], 如加拿

大的 GUARDIAN 系统可定位狙击手开火方向及俯仰角, 英国的 HALO 系统可实现火炮的声定位等等, 主要是利用被动声测定技术来探测炮兵阵地、狙击手位置、弹着点位置和炸点位置等。

在探测靠近地面目标时雷达和红外成像技术都会严重受到地面杂波和环境的影响, 而声波探测技术是根据目标发射、飞行及落地过程中所发出的声信号对其定位, 这种技术的优点是不易受背景干扰和天气影响, 监测范围大, 精度较高, 成本低廉、安全性好、方便快捷等。

我国在低空声探测技术方面的研究现在仍处于初级阶段, 技术相对不够成熟, 但民用声探测和军用军事目标定位都有一定的需求。因此, 研究声探测定位技术及声探测系统在靶场测试、空中目标定位和跟踪、地面目标监测中的应用等都具有非常

收稿日期: 2013-07-15; 修回日期: 2013-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271414)。

作者简介: 景思源(1989—), 男, 陕西西安人, 硕士, 研究方向为武器系统与运用工程。

通讯作者: 景思源, E-mail: jingsiyuan12321@163.com

重要的意义。

目前有很多用于低空目标定位阵列，例如圆锥阵^[3]，五点阵等等，本文针对地面目标噪声大、干扰强的特点，利用高精度时延估计^[4]算法，采取平面四点阵这一隐蔽性较强的探测技术进行目标声定位，在模拟高背景噪声的情况下进行滤波降噪处理，最终用广义互相关法^[5,6]进行时延估计并定位，并与只是降噪处理来定位的方法进行比较。最终得到结论，广义互相关法在高背景噪声且目标声强度低、持续时间短的情况下能得到更高精度的时延差，目标定位精度也有显著提高。

1 平面四点阵声定位原理

地面布阵的显著优点是容易组成大靶面，部件的组装、拆卸容易，便于携带和运输，四点阵布阵方便，利于数据采集，因此选择在地面上按正方形四个顶点位置对称地安置四个传声器，就构成了四点声定位阵，四个阵元相邻间隔由实际测试要求而定，大致为 600~1200 m。

如图 1 所示，位于正方形四个顶点布置四个声接收器，根据点阵接收物体所发声音的时延差来确定落地弹丸坐标。

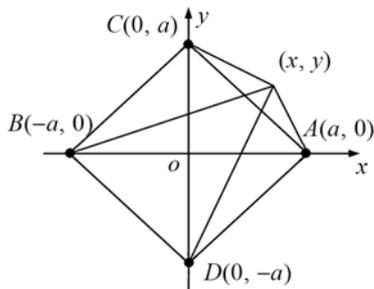


图 1 平面四点阵示意图
Fig.1 Planar four dot matrix diagram

设物体坐标为 (x, y) ，坐标系原点为 O ，又设声传感器 $A、B$ 间， $C、D$ 间距离为 L 。则有

$$r_A = \sqrt{\left(x - \frac{L}{2}\right)^2 + y^2} \tag{1}$$

$$r_B = \sqrt{\left(x + \frac{L}{2}\right)^2 + y^2} \tag{2}$$

声速在空气中传播速度为 v ，弹丸落地声到达 $A、B$ 两传感器的时延差为 t_1 ，则

$$\sqrt{\left(x + \frac{L}{2}\right)^2 + y^2} - \sqrt{\left(x - \frac{L}{2}\right)^2 + y^2} = vt_1 \tag{3}$$

整理后可得双曲线方程：

$$\frac{x^2}{v^2 t_1^2} - \frac{y^2}{L^2 - v^2 t_1^2} = 1 \tag{4}$$

对于 y 轴上的声传感器 $C、D$ ，旋转 $-\pi/2$ 就变成 x 轴上的 $A、B$ ，根据坐标旋转变换关系：

$$x = X \cos\left(\frac{-\pi}{2}\right) - Y \sin\left(\frac{-\pi}{2}\right) = Y \tag{5}$$

$$y = X \sin\left(\frac{-\pi}{2}\right) + Y \cos\left(\frac{-\pi}{2}\right) = -X \tag{6}$$

得到 $C、D$ 的另一条双曲线方程如式(7)所示，式(7)中 t_2 为声波到达 $C、D$ 的时延差。

$$\frac{y^2}{v^2 t_2^2} - \frac{x^2}{L^2 - v^2 t_2^2} = 1 \tag{7}$$

两条双曲线相交即为弹丸落地点坐标 (x, y) ，解得 x, y 分别为

$$x = \frac{vt_2}{2L} \sqrt{\frac{(L^2 - v^2 t_1^2)(L^2 + v^2 t_1^2 - v^2 t_2^2)}{L^2 - v^2(t_1^2 + t_2^2)}} \tag{8}$$

$$y = \frac{vt_1}{2L} \sqrt{\frac{(L^2 - v^2 t_2^2)(L^2 - v^2 t_1^2 + v^2 t_2^2)}{L^2 - v^2(t_1^2 + t_2^2)}}$$

注意式(8)中 t_1 和 t_2 可能为负数， t_1 和 t_2 正、负的不同组合，决定了落点坐标 (x, y) 在声传感器所布置的 xoy 坐标系中的象限。

2 广义互相关时延估计法

当采集到的声信号中物体所发声源级较强时，容易比较准确地求出声波极大点的位置，进而定位。然而在实际应用中，由于噪声及声传播损失的影响，有效声往往会被淹没在噪声之中，使时延估计法失去其作用，这时必须另辟他径，用其它方法得到两路信号时延差，而广义互相关时延估计法正好用来计算同声源两路信号间时延差，从而解决这一问题。

四路阵元处于同一个噪声环境里，接收到的声音信号也来自同一个声源，因此，各路信号之间具有较强的相关性而与噪声无关。按照图 2 的算法，需要分别得到对角两路信号的时延差，而广义互相关方法恰好可得到对角两路信号的相关函数，从而可计算得出这两路信号之间的时延差。其基本思想是先对两路信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 进行预滤波，然后再求互相关函数，广义互相关时延估计法的原理框图如图 2 所示。

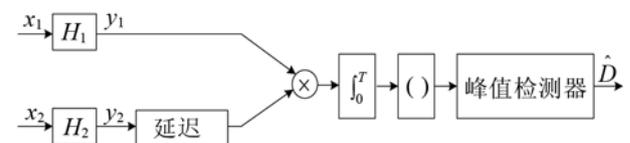


图 2 广义互相关时延估计法原理框图
Fig.2 Principle diagram of the generalized cross-correlation based time delay estimation

假设阵元 1 与阵元 2 接收到的声音信号 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 分别为:

$$x_1(n) = \alpha_1 s(n - \tau_1) + n_1(n) \quad (9)$$

$$x_2(n) = \alpha_2 s(n - \tau_2) + n_2(n) \quad (10)$$

式中: $s(n)$ 为声源的原始信号; α_1 和 α_2 分别为声音从声源传播到阵列的衰减; τ_1 和 τ_2 分别为声音从声源传播到两个阵元的时间; $n_1(n)$ 和 $n_2(n)$ 分别为两路声音信号中的加性噪声。

由于声音信号与噪声互不相关, 所以 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 互相关函数可表示为

$$R_{12}(\tau) = \alpha_1 \alpha_2 E[x_1(n - \tau_1) x_2(n - \tau_2 - \tau)] + R_{n1n2}(\tau) \quad (11)$$

为了简化计算, 在噪声强度远小于声源强度的情况下, 一般可以认为两路声音信号中的加性噪声 $n_1(n)$ 和 $n_2(n)$ 之间也互不相关, 即 $R_{n1n2}(\tau) = 0$, 那么, 式(11)可进一步简化为

$$R_{12}(\tau) = \alpha_1 \alpha_2 E[x_1(n - \tau_1) x_2(n - \tau_2 - \tau)] \quad (12)$$

当 $\tau = \tau_1 - \tau_2$ 时, $R_{12}(\tau)$ 取最大值, 因此通过搜索互相关函数的最大值, 就能找到两路信号之间的时延差 τ 。

当互相关函数的主极大峰很尖锐时, 容易比较准确地求出极大点的位置。然而在实际应用中, 由于噪声的影响, 相关函数的峰值被扩展, 主极大峰常常比较平坦, 这样就很难判断出极大点的准确位置, 从而使时延估计产生较大的误差。为了获得更好的时延估计精度, 在信号模型允许的条件下, 观测时间应尽量取较大值。但此方法只适用于开阔的平原地带。其他因反射物会带来严重的干扰而导致互相关函数凸峰不明显, 使方法失效。

3 数值计算和仿真

要进行计算机仿真, 就首先要搞清楚仿真实验针对的背景噪声和目标噪声特性, 这样才能尽可能地使仿真实验贴近实际。

3.1 环境噪声分析

对于声信号分析, 首要问题就是对环境噪声进行分析。

一般情况下, 在开阔地带环境噪声都假设为平稳高斯随机过程。但是在野外环境中, 环境噪声受地形、天气等影响显著, 尤其是风的影响。实验表明, 环境噪声在无风或微风条件下可近似认为是平稳高斯随机过程, 而当风速较大时, 环境噪声则是非平稳、非高斯的, 一般来说, 防风罩就能够有效地消除风的影响, 因此, 可以近似地认为环境噪声是平稳高斯的随机过程。环境噪声的功率谱分析

表明, 在一般情况下, 环境噪声功率随其频率的增加而迅速衰减, 其能量主要集中在 30 Hz 以下。

3.2 目标物发声分析

军事目标中, 大多数火炮的发射波和爆炸波的频谱主峰频率随距离变化不明显, 发射波的主频为 42~87 Hz, 爆炸波的主频为 6~32 Hz, TNT 化学爆炸波的主频为 8~18 Hz。而直升机、战斗机和坦克的辐射噪声是一个宽频信号, 其中又有较明显的线谱成分, 其能量主要集中在 500 Hz 以下的频段^[7]。因此设计声定位系统时, 应关心 500 Hz 以下的低频段噪声。

民用地面目标中, 桥梁监控、仓库监视、人员及车辆的运动产生振动, 能量较强, 其主要频率成分集中在 0~150 Hz 范围内。因此在进行声定位仿真时, 主要考虑对 150 Hz 以内的信号进行处理^[8]。

3.3 计算机仿真

可将此方法模拟应用于炮弹靶场测试中, 因为靶场相对开阔, 几乎不存在反射物干扰, 且采集数据长度可达数分钟左右, 一定程度上避免了多路信号间噪声相关干扰的情况, 因此正好可以应用广义互相关法进行仿真测试, 取四点阵对角两阵元距离 $L = 1200$ m, 四个点阵坐标分别为 (0, 600), (-600, 0), (0, -600) 和 (600, 0), 声速 $c = 340$ m/s, $f_s = 40$ kHz, 仿真给出一个中心频率为 100 Hz、宽度为 2 ms 的脉冲信号作为炮弹落地声信号, 加入高斯白噪声来模拟环境噪声后选取一路回波信号如图 3 所示。

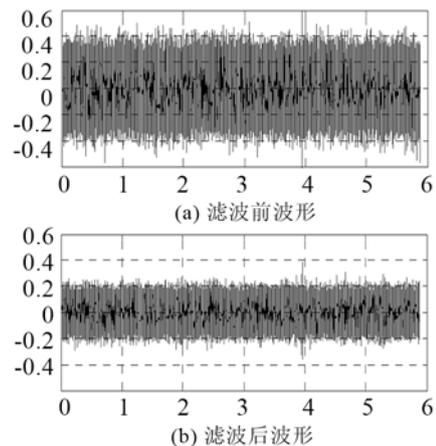


图 3 滤波前后声目标波形图

Fig.3 Acoustic target waveforms before and after filtering

图 3 中 3(a) 为滤波前波形, 3(b) 为滤波后波形, 可见滤波后噪声明显削弱了不少, 但是由于噪声为宽频信号, 削弱噪声的同时亦把脉冲信号也削弱了, 这样并不能达到精确时延差的目的。

但是广义互相关法是通过两路信号间最大互

相关函数来求时延差的，如图 4 所示，在信噪比低于 10 的情况下，两路时延差可清晰显示为图中最大互相关函数的横坐标所示时间。

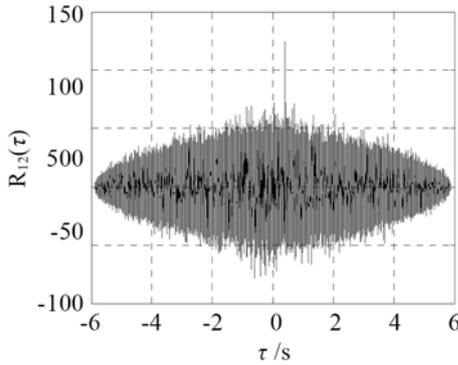


图 4 广义互相关函数图

Fig.4 Generalized cross-correlation function diagram

经过多次仿真实验，得到不同信噪比对两种算法的影响及误差如表 1 所示。

表 1 不同信噪比对两种算法的误差及影响

Table 1 The effects of signal to noise ratio on the estimate errors of the two algorithms

信噪比/dB	14	12	10	8	6
互相关法误差/m	0.03	0.09	0.24	1.32	失效
降噪法误差/m	0.16	0.52	3.06	失效	失效

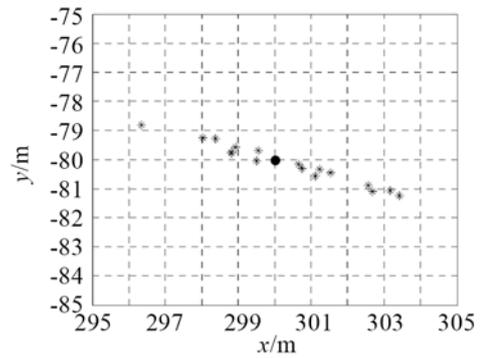
结果表明，用互相关算法得到的目标坐标在信噪比低于 6 dB 时才会失准，而降噪处理得到的坐标在信噪比等于 10 dB 时就会出现误差较大的情况，且低于 8 dB 后就会使算法失效。

信噪比等于 10 dB 的情况下，利用广义互相关法得出的两路信号间时延差比降噪滤波后直接判断最大值得到时延差这种方法精度提高很多。图 5 是根据两种方法重复仿真运算 20 次求出的目标坐标值显示图，由图 5 可见，加窗滤波法计算得到的坐标值明显发散，不收敛，仿真精度也不高，而且有三次由于时延差判断错误而导致结果无效，因此达不到实验要求；而广义互相关法得到的目标坐标值收敛、稳定，基本可满足仿真需求。

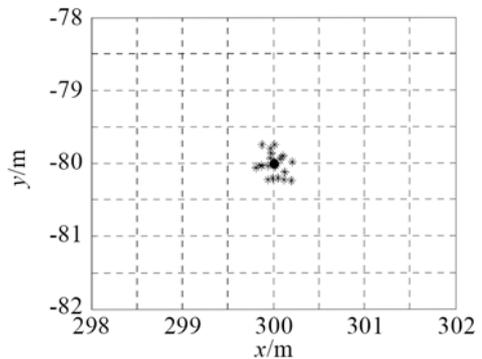
4 实际应用

因为声定位方法大多是在前方收集数据，而后将数据发回后方进行分析处理。因此，在传播过程中难免会出现失真、不同步等情况，这会严重影响计算精度。例如在靶场测试、火炮阵地定位中，测试人员不能靠近数据采集设备，只能利用无线发射、手机覆盖网或电缆进行远距离传输。

为了尽量减小这类不必要的误差，首先要根据



(a) 加窗滤波法坐标显示



(b) 广义互相关法坐标显示

图 5 两种不同方法得到的定位目标坐标比较图

Fig.5 Comparison of the target coordinates obtained from two different poisoning methods

实际定位的目标声特性选择不同的传输设备(例如炮弹爆炸声频率较低，便可用无线发射装置远距离传输声信号，而桥梁检测则需用电缆实时传输振动数据)；然后通过信号调理器调整好信号强度；最后用同步数据采集卡采集多路信号，这样就可保证广义互相关定位法能发挥其最大功效。

5 结论

针对传统滤波降噪的同时会降低目标信号的强度，造成时延估计的不收敛问题，提出了采用广义互相关方法计算两路时延差，因利用两路信号间互相关函数来取得时延差，提高了时延估计的精度。此方法在地面、低空目标声定位应用上有广泛的开发前景，具有一定的现实意义。通过改进广义互相关法，还有望进一步提升其估计精度。

参 考 文 献

[1] 李大林. 空中中低速目标被动声探测系统试验研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2006: 1-2.
LI Dalin. Passive Acoustic Detection System Experimentation Investigation of Aerial Medium and Low Speed Target[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2006: 1-2.

[2] 冯杰, 杨博, 李兆利, 空气声探测在军事中的应用[J]. 电声技术,

- 2012, 36(6): 32-33.
FENG Jie, YANG Bo, LI Zhaoli. Overview of Acoustic Detection and Its Application in Military[J]. Audio Engineering, 2012, 36(6): 32-33.
- [3] 庞学亮, 张效民, 杨向锋. 利用圆锥阵的低空声目标定向分析[J]. 武器装备自动化, 2005, 24(1): 1-2.
PANG Xueliang, ZHANG Xiao-min, YANG Xiangfeng. Directional object analyzing of low altitude acoustic object with taper array[J]. Armament Automation, 2005, 24(1): 1-2.
- [4] 雷鸣, 陈绍钦, 雷志勇. 近地炸点声定位算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(3): 734-735.
LEI Ming, CHEN Shaoqin, LEI Zhiyong. Study on acoustic positioning algorithm about low-altitude bombing point of projectile[J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(3): 734-735.
- [5] 王震. 基于互功率谱相位时延估计的声源定位系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2010: 11-12.
WANG Zhen. Research on sound source localization system Based on time delay estimation cross-power spectrum phase[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010: 11-12.
- [6] 陈华伟. 低空目标声测无源定向理论与算法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004: 33-35.
CHEN Huawei. On passive acoustic direction finding for low altitude targets[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004: 33-35.
- [7] 张冠武. 低空目标声定向方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004: 33-35.
ZHANG Guanwu. Study of low altitude target acoustic orientation method[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006: 3-10.
- [8] 王斌. 地面运动目标振动信号的特性分析与目标识别[J]. 电子科技, 2012, 25(9): 105-106.
WANG Bin. Characteristic analysis and object recognition for seismic signals of moving terrestrial targets[J]. Electronic Sci. & Tech., 2012, 25(9): 105-106.

向宁教授荣获美国赛宾奖章

2014年10月美国声学学会168届年会颁奖典礼上,授于美国瑞森勒理工学院(RPI)建筑声学专业主任向宁教授赛宾奖章(Wallace Clement Sabine Medal)。这是美国声学学会为表彰国际上建筑声学有杰出贡献的学者而设立的荣誉奖章。向宁教授是自1957年设立该奖以来第16位得主,也是首位获得该奖章的华人科学家。此前获该奖章的声学名家如V. Knudsen(美)、L. Beranek(美)、E. Meyer(德)、L. Cremer(德)、Marshall(新西兰)、J. Bradley(加)等人。向教授25年来对耦合空间声场研究领域作出了杰出的贡献,并在双耳缩尺模型测量、M-序列理论和应用,以及贝叶斯信息处理等方面的成就驰名于国际声学界。他是一位集理论和实验于一身的声学家,他的成就对建筑声学以外的其他声学领域也有很大的贡献。

向宁的声学生涯始于1984年德国波洪鲁尔大学,在国际上听觉空间研究权威J. Blauert教授指导下获得了硕士(1986)和博士(1990)学位。在学期间,专攻双耳声学模拟系统,建立了新颖的缩尺模型传感器和1:10缩尺双耳仿真头,从而为他日后高水准的实验技能打下了坚实的基础。他对M-序列在声学测量的研究,使其成为具备理论和信息处理技能的声学家。他在运用M-序列矩阵新的分解方法求解排列矩阵以适应快速哈达玛变换(Fast Hadamard Transforms),发现了M-序列与Morse-Thue序列通过求得的排列矩阵严谨唯一的对应关系。利用Morse-Thue序列的自相似结构简捷地验证所求排列矩阵的正确性。它使得超长M-序列得以简便地应用于室内声学测量。正是这项工作的进展使得他与声学名家M. Schroeder教授一直保持长期的合作关系。

向宁获得博士学位后,进入德国Head Acoustics声学公司成为一名研发部的研究员。他将理论与实验工作结合,发表了数篇重要的文章(包括他的用于Schroeder曲线的非线性回归法)。1998年,向宁成为美国国家物理声学研究中心的研究员。他接受新的挑战,研究利用声波与地质波的耦合机理探测地雷。尽管暂时离开建声领域,但是他把握这一机会拓展进入物理声学研究领域,把M-序列应用于声波与地质波耦合测量中。他对贝叶斯理论的探索不仅把贝叶斯信息处理应用于声波探雷,而且成功地运用贝叶斯概率论估算单斜率和多斜率的施罗德衰变曲线的室内声学中的重要衰变参量。

2003年向宁博士进入RPI理工学院建筑声学专业,他又回到建筑声学研究和教学领域,不久成为该学院的终身教授。他开始拓展M-序列和贝叶斯估算的研究,把在声耦合空间的参量以及模型估算的研究工作引向应用扩散方程模拟耦合空间,同时进一步采用输运方程扩展室内声学计算模型,并用严谨细致的缩尺模型测量技术验证这些模拟计算结果。在这些研究工作中,他指导了许多硕士和博士研究生,协同一些国际上的研究团队,取得了令人瞩目的进展。他的研究领域也由双耳测量技术和多斜率衰变曲线分析扩展到对散射、材料阻抗、模态分布的模拟计算和测量。他的坚定和执着使他在声学生涯中不断走向成功。2010年建筑声学界泰斗Beranek博士特意将自己珍藏的声学经典书籍200余册赠与RPI理工学院,足见对向宁教授领导下声学团队的重视和厚爱。

向宁教授活跃于国际声学界各种学术会议,亦不忘宣扬我国声学界前辈的学术成就,例如在国际声学会议上发起和成功地组织两次纪念马大猷学术成就专题报告会,即inter-noise 2008年(8位报告人)和21届ICA 2013年(12位报告人)。2013年他曾是法国巴黎居里大学客座教授。向宁教授自2004年起被聘任美国声学学报JASA建筑声学专业编辑至今。20年来,向教授经常回国讲学,曾任天津大学、华南理工大学的客座教授,与中国科学院声学研究所、同济大学、上海交通大学、南京大学等单位保持学术联系。