

LFM 脉冲信号的联合互相关实时检测算法

张庆国, 王健培, 刘 璠, 杨 彬

(昆明船舶设备研究试验中心, 云南昆明 650051)

摘要: 针对线性调频(Linear Frequency Modulated, LFM)脉冲信号在水声跟踪系统中的实时检测问题, 提出了一种基于互相关的联合检测算法。该算法将接收到的声信号分别与修正后副本及上周期实际声信号样本进行相关, 并按照一定加权系数将两次互相关数据进行融合处理, 实现 LFM 脉冲信号的有效检测。经过仿真分析及湖上试验, 证明该算法具有较高的检测精度, 是水声信号处理的一种实用方法, 可有效提高水声跟踪系统的检测性能。

关键词: 信号处理; 线性调频; 联合互相关; 实时检测

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-01-0079-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.01.015

The joint cross-correlation real-time detection algorithm of LFM pulse signal

ZHANG Qing-guo, WANG Jian-pei, LIU liu, YANG Bin

(Kunming Shipborne Equipment Research & Test Center, Kunming 650051, Yunnan, China)

Abstract: Aiming at the problem in the real-time detection of LFM pulse signal in underwater acoustic tracing system, a joint cross-correlation detection algorithm based on cross correlation is raised. The algorithm correlates the acoustic signal received to the backup copy revised and the real acoustic signal in the last period, and makes the two copy cross-correlation data fusing with a certain weighting coefficient. The purpose is to realize the valid detection of LFM pulse signal. It comes to a conclusion that the algorithm has high precise detection ability, and this is a perfect method in underwater acoustic signal processing to improve the detection performance of underwater acoustic tracing system effectively.

Key words: signal processing; linear frequency modulated; joint cross-correlation; real-time detection

0 引言

由于线性调频脉冲信号具有较好的自相关特性和较宽的多普勒容限, 因此, 在声呐系统中得到广泛应用。LFM 脉冲信号不仅是鱼雷声自导的基本信号波形, 也是主动式水声跟踪及水声通信系统常用的信标单元。在实际水声环境下, LFM 脉冲信号受到多径传播和多普勒效应的影响, 产生时域、频域的变化, 直接导致互相关特性下降, 甚至影响了声信号的检测, 降低了系统性能。因此, 针对 LFM 脉冲信号的实时检测算法进行试验研究, 对于声呐系统的工程应用具有重要意义。

本文针对 LFM 脉冲信号在主动式水声跟踪系统中的应用开展研究, 借鉴自适应相关原理^[1], 利用上一周期的声信号做样本对本周期的声道进行

互相关匹配; 同时, 将声信号与修正后的副本进行独立互相关; 最后将上述两次相关数据进行加权融合, 以提高信号处理增益及系统检测概率。

1 LFM 信号及其应用

1.1 LFM 信号

LFM 信号时域波形为:

$$u(t) = \begin{cases} A \exp[j(2\pi f_0 t + \pi k t^2)], & -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $k=B/T$ 为调频斜率; A 为信号幅度; f_0 为中心频率; B 为信号调频带宽; T 为信号脉冲宽度。

由式(1)可知, 其相位函数和瞬时频率分别为:

$$\begin{cases} \Phi(t) = 2\pi f_0 t + \pi k t^2 \\ f(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d(\Phi(t))}{dt} = f_0 + k t \end{cases} \quad (2)$$

根据上述公式, 产生 LFM 信号波形和时频曲线波形如图 1 所示。

收稿日期: 2014-07-10; 修回日期: 2014-10-18

作者简介: 张庆国(1982-), 男, 黑龙江人, 工程师, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 张庆国, E-mail: ZQG750@126.com

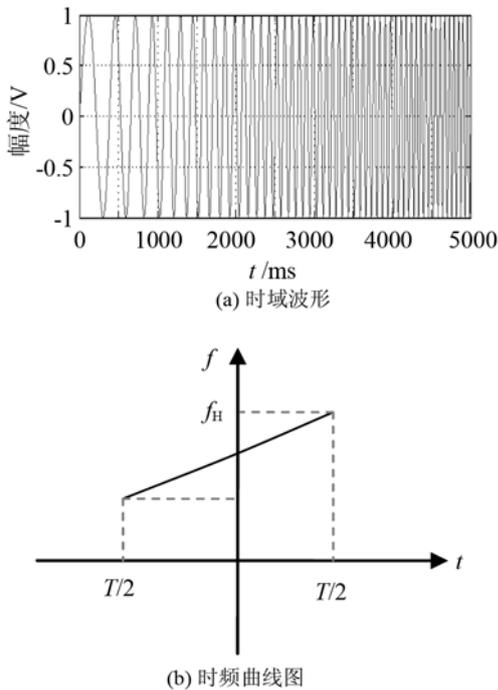


图 1 +LFM 信号时域波形及时频曲线图
Fig.1 +LFM signal waveform and its time-frequency curve

从图 1 中可以看出，LFM 信号的频率是时间 t 的线性函数，当 k 为负数时对应 -LFM 信号。

1.2 LFM 脉冲信号的典型应用

在主动式水声跟踪系统中，为了充分利用单频脉冲信号(Continue Wave, CW)的高时延分辨率和 LFM 的多普勒宽容性，常采用 CW 和 LFM 相组合的方式完成水下目标的跟踪与测量。其信标波形结构见图 2 所示。图 2 中， T 常取 1 s； t 为目标深度值调制编码时延值，常取 40~80 ms。

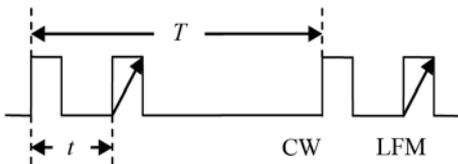


图 2 信标波形结构示意图
Fig.2 Structural chart of beacon waveform

上述信标信号在固定时刻，由安装在水下目标上的发射机顺序发出，接收端对接收到的声信号进行检测识别及处理，最终获得其传输时延值及频偏等有效信息，利用球面或双曲面交汇原理完成水下目标的定位跟踪与测量。另外，在水声通信中也常利用 LFM 信号进行编码及多普勒频移估计^[2]；在鱼雷自导系统中，特别是主动式自导系统，LFM 脉冲信号是其最常用的信号波形之一。因此，LFM 信号是主动式水声信号的基本单元，研究高精度的实时检测算法具有重要的实用价值。

1.3 副本相关实时检测算法

近年来，随着高速数字信号处理器性能的不不断提高，多数算法均可实时实现，无需文献[3]所述的降低抽样频率后再处理，可直接高频采样，连续实时处理。但计算量大大超出计算能力的一些算法依然难以实时实现。

目前针对 LFM 信号的检测和参数估计，主要采用副本互相关法、时频分析法、RWT(Radon Wigner)及 RAT(Radon Ambiguity)法，以及分数阶傅立叶变换(Fractional Fourier Transform, FRFT)法。时频分析法具有较好的时频积聚性，但在某些情况下，存在严重的交叉项^[4]。RWT 及 RAT^[5]法可对多分量信号进行检测，但是需要进行一维或多维的峰值搜索，计算量较大。FRFT 法适用于低信噪比的 LFM 信号检测，但需要在每一个分数阶域对信号做 1 次变换，以扫描到最大峰值。文献[6]提出的分数阶频率域混合相关法虽然对 FRFT 算法进行了改进，减少了一些计算量，但也需要先进行 FRFT，再进行分数阶频率相关处理，并且不能直接估计出时延值，尤其不能适应水声信道多径混叠的情况。

在主动式水声跟踪测量系统中，可充分利用信标信号的先验知识进行简化处理。因此，针对 LFM 脉冲信号，多采用副本相关的方式进行检测。另外，在实际工程中，考虑到数字信号处理器的硬件结构，多利用快速傅里叶变换(FFT)进行互相关处理，其副本互相关处理框图如图 3 所示。在图 3 中，将接收到的声信号 $x(i)$ 与修正后的副本信号 $X(i)$ 进行共轭相乘，再对其乘积进行反傅里叶变换，最后进行取模，利用峰值尖锐度及峰值位置信息检测信号及时延值估计。

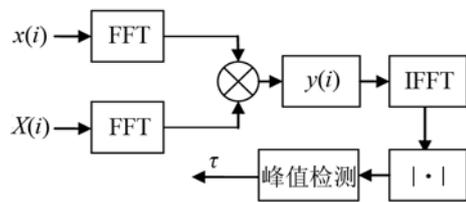


图 3 副本互相关处理框图
Fig.3 The flow chart of cross-correlation processing

2 联合互相关实时检测算法

以图 2 所示的信标信号波形为例，在水声跟踪系统中的主要处理流程是：首先进行 CW 信号的检测，获得中心频率值，然后利用所获得的 CW 信号中心频率进行 LFM 副本信号的修正；之后再将声信号与上步修正后的副本进行互相关，最后利用相

关峰值完成 LFM 脉冲信号的检测识别与时延值估计。

由于 LFM 脉冲信号具有较宽的多普勒容限, 上述传统互相关算法可在多数情况下完成检测, 满足一般的水声定位需求。但接收信号受到的多普勒影响, 实际上是多个多普勒的叠加组合, 不能简单采用固定频偏进行统一补偿修正。并且在实际工程中发现, LFM 脉冲信号的互相关时延估计精度远达不到理论值; 特别是在水下目标强机动状态下, 经常出现漏检 LFM 信号的情况。经过仔细分析, 本文认为出现上述情况的主要原因是: (1) 互相关时延值估计精度和所构建的副本精度有关。首先, 利用 CW 脉冲信号的中心频率进行副本的普勒频移修正, 但 CW 脉冲信号的频率估计精度是有限的。其次, 针对副本信号频率线性修正的方式, 也不能与实际多普勒频移规律完全符合。最后, 由于水声信道的随机、时变特性引起信号的多普勒扩展(约为 0.1~0.7 Hz^[7])是无法进行实时精确修正的。(2) 实际上在接收端获得的声信号是直达波与水面、水底反射信号的迭加, 再加上环境、混响等噪声信号的混合叠加信号。在水下目标强机动状态下又加剧了发射声源指向性的剧烈变化, 直接产生 LFM 脉冲信号相关峰下降、相关峰分裂等现象, 最终导致 LFM 脉冲信号的漏检。

联合互相关实时检测算法正是为了解决上述问题而提出的, 该算法借鉴自适应相关及被动时反处理自动匹配算法^[8]的原理, 利用经过信道传输的实际声信号做互相关副本, 以提高处理增益。该算法的假设前提为: (1) 在声信标信号的重复周期内, 由于时间间隔较短(多为 0.5 s 或 1 s), 水下目标的速度相对变化不大, 因此, 可假设相邻周期内所产生的多普勒频移相同。(2) 由于在该时间段内水声信道的时变较小, 因此, 可假设相邻周期的两个 LFM 脉冲信号所受到信道影响程度相同, 具有良好的互相关特征。联合互相关实时检测算法流程见图 4 所示。

图 4 中的副本可根据先验知识在初始化时产生, 然后依据 CW 检测结果进行实时修正更新。其中样本为上一周期的实际水声信号, 不能在初始化时产生, 只能在确认 LFM 脉冲信号后进行更新。融合处理主要采用分布式检测融合^[9,10]原理, 并针对相关性进行加权处理。

3 仿真分析

为了对所提出的算法性能进行评价, 进行计算

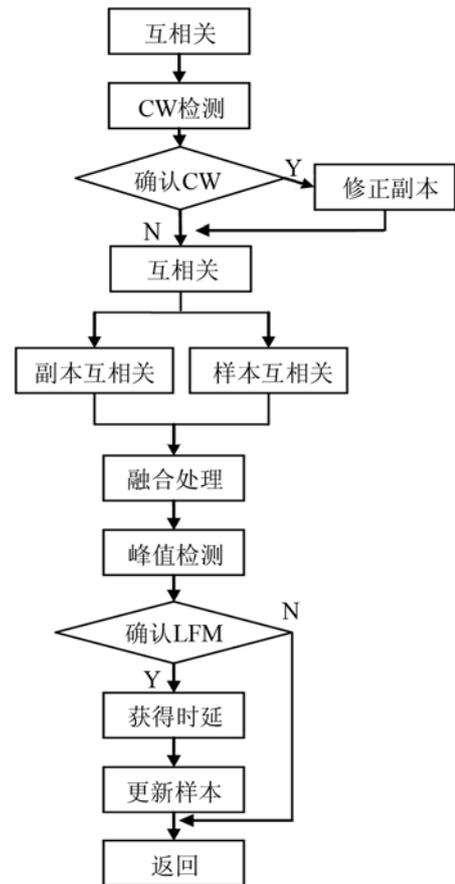


图 4 联合互相关实时检测算法流程图
Fig.4 The algorithm chart of the joint cross-correlation real-time detection

机仿真分析。仿真参数如下: LFM 脉冲宽度为 5 ms, 调制带宽为 7 kHz, 中心频率为 75 kHz, CW 脉冲宽度为 5 ms, 中心频率为 75 kHz, CW 与 LFM 之间的时延间隔为 50 ms, 采样频率为 500 kHz。由于 CW 脉冲宽度是有限的, 因此针对 CW 信号的频率估计精度也是有限的(也可采用插值等方法进行细化, 但精度有限), 其频率分辨率为 200 Hz。

为了简化计算, 仿真时假设为声速均匀信道, 采用虚源法估计信道冲击响应函数^[11]。其中多途传播为 3 个随机路径, 各路径平均功率一致, 其多径对应的时延值分别为 0、3、10 ms。以线性插值法进行多普勒频移的仿真^[12], 分别对水下目标在 10、30、60 kn 条件下, 采用传统副本互相关及联合互相关两种算法进行时延值估计偏差比较, 见图 5~7 所示。

从图 7 可以看出, 在不同速度下, 传统副本相关方法利用 CW 信号进行频移估计, 然后修正副本, 可在一定程度上修正多普勒带来的影响, 但是由于频率估计精度有限, 导致传统互相关副本的构建精度不高, 因此采用副本相关获得的时延值具有

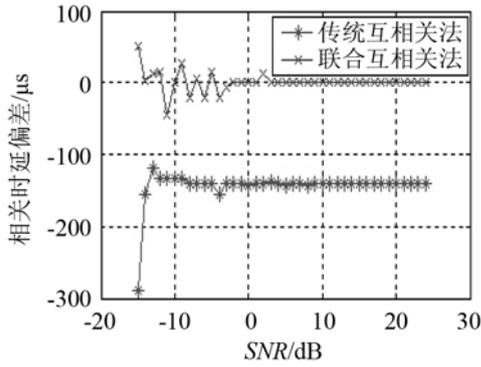


图 5 10 kn 相对速度下的相关时延值估计偏差
Fig.5 The relative time-delay estimate deviation at the relative velocity of 10 kn

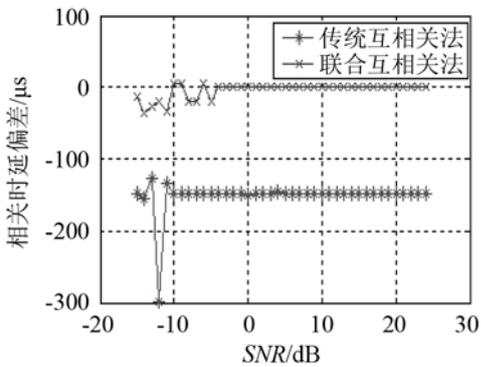


图 6 30 kn 相对速度下的相关时延值估计偏差
Fig.6 The relative time-delay estimate deviation at the relative velocity of 30 kn

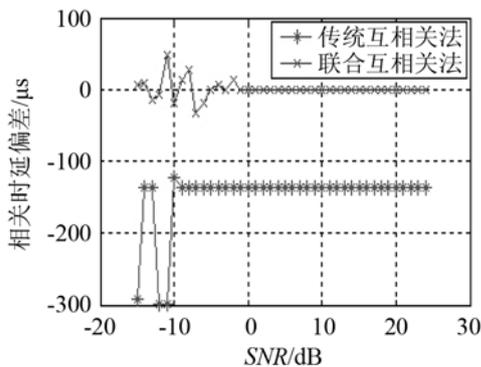


图 7 60 kn 相对速度下的相关时延值估计偏差
Fig.7 The relative time-delay estimate deviation at the relative velocity of 60 kn

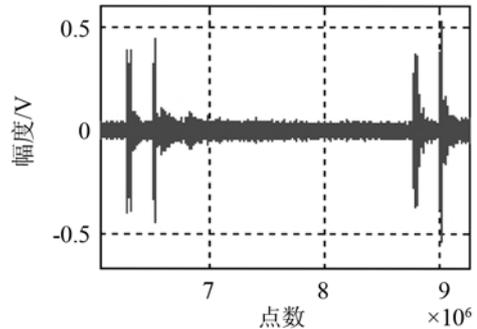
较大的偏差；而采用上一周期实际水声信号作为样本的联合互相关算法，由于样本精度较高，因此相关获得的时延值偏差较小，而且受相对速度的影响较小，在一定信噪比条件下，相关时延值估计精度很高。

4 试验测试

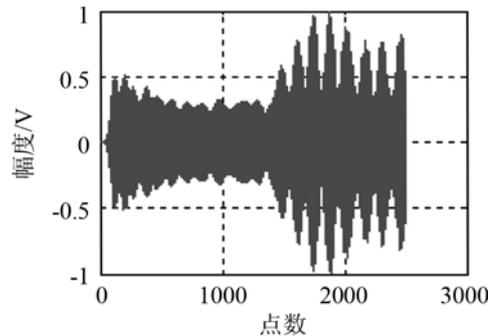
在某湖水域进行“跑船”试验，针对图 2 所示的信标信号($T=0.5$ s)进行测试。在试验船上安装发

射声源，利用固定布放在水底的水声基阵(接收端)进行声信号接收，发射换能器距离水面约 0.6 m，接收端深度约为 128 m。水平距离大约 2.2 km，装载发射声源的试验船速度约 8~10 kn。

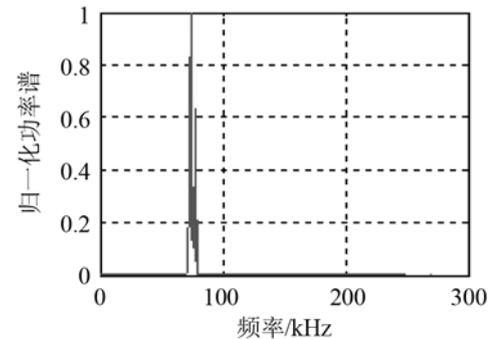
图 8 中试验数据采样率为 500 kHz，脉宽均为



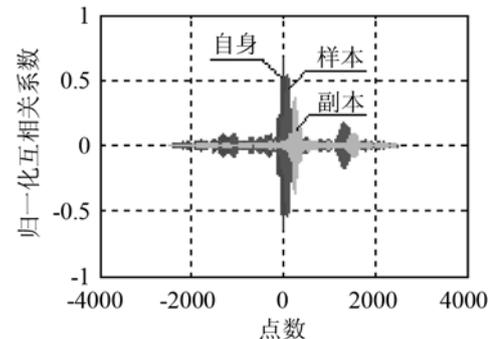
(a) 时域波形



(b) LFM信号时域波形



(c) LFM信号功率谱图



(d) 归一化互相关

图 8 试验数据分析图

Fig.8 The analysis chart of experiment data

5 ms, 中心频率为 75 kHz。在距离较远时(2.2 km)信号衰减较大, 需要进行相应的滤波及放大等处理。图 8(d)中的副本为根据 CW 脉冲信号进行重构的数据与实际信号的相关, 样本为上周期 LFM 脉冲信号与实际信号的相关, 自身为实际信号自相关。可以看出, 采用上周期实际声信号的样本相关方式比副本相关方式更接近中心点, 也就是说具有更高的相关时延值估计精度。

将副本相关结果与样本相关结果相融合, 采用 Neyman-Pearson(N-P)准则的全局最优化融合算法^[10]。为了分析算法效果, 分别对传统副本互相关及本文提出的联合互相关实时检测算法, 针对“跑船”试验数据进行统计分析, 将其 LFM 脉冲信号的检测概率(P_D)进行统计分析, 见图 9 所示。

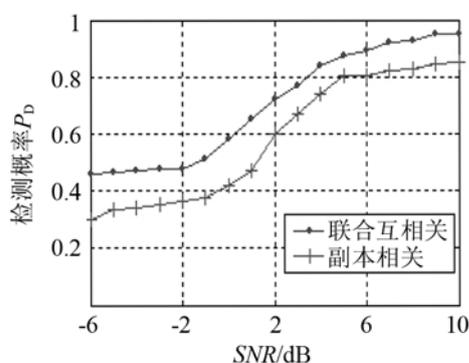


图 9 不同信噪比下的 LFM 脉冲信号检测概率曲线

Fig.9 The curve of LFM pulse signal detection probability in different SNR

根据发射机声源级、水平距离等参数进行信噪比的估计, 利用接收端解算的数据进行水下目标的定位与跟踪。图 9 中的 P_D 代表跟踪系统的检测有效率, 即 LFM 脉冲信号有效检测后, 还要相关时延值估计精度也满足定位要求, 才能算是有效检测。因此, 图 9 所示的试验数据检测概率与文献[13]相比略低。

另外, 本文的联合互相关实时检测算法是在硬件处理器可连续实时处理的前提下提出的, 也就是说假设副本互相关和样本互相关是相互独立的。但在某些情况下(如非实时检测系统中), 两者常具有一定的相关性, 需要在融合中根据实际情况分配不同的相关系数。

5 结论

针对 LFM 脉冲信号在主动式水声跟踪系统中的实时检测问题, 本文提出了一种联合互相关检测算法。该算法将接收到的水声信号, 分别与修正后

的副本及上一周期实际接收到的 LFM 脉冲信号进行互相关, 并采用 N-P 准则对相关结果进行融合处理。经过仿真分析及“跑船”试验验证, 证明该算法相比于传统的互相关算法具有检测效率高, 时延值估计精度高, 有利于工程实现等优点。

参 考 文 献

- [1] 田坦. 声呐技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010: 220-224.
TIAN Tan. Sonar technology[M]. Harbin: Harbin Engineering University press, 2010: 220-224
- [2] 林伟, 张歆, 黄建国. 多载波相干水声通信中的多普勒处理方法[J]. 西北工业大学学报, 2005, 23(4): 520-524.
LIN Wei, ZHANG Xin, HUANG Jianguo. Doppler processing method in multicarrier coherent underwater acoustic communication[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2005, 23(4): 520-524.
- [3] 周德善, 李志舜, 朱邦元. 鱼雷自导技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 191-195.
ZHOU Deshan, LI Zhishun, ZHU Bangyuan. Torpedo Homing Technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009: 191-195.
- [4] 邹红星, 戴琼海, 李衍达, 等. 不含交叉项干扰且具有 WVD 聚集性的时频分布之不存在性[J]. 中国科学(E 辑), 2001, 31(4): 348-354.
ZHOU Hongxing, DAI Qionghai, LI Yanda, et al. Free of cross term interference with WVD concentration in the time frequency distribution of nonexistence of[J]. Science in China(E), 2001, 31(4): 348-354.
- [5] 邵智超, 吴彦鸿, 贾鑫. 基于时频分析的 LFM 信号检测与参数估计[J]. 装备指挥技术学院学报, 2004, 15(2): 71-75.
SHAO Zhichao, WU Yanhong, JIA Xin. Detection and parameter estimation of LFM signal based on time-frequency analysis[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2004, 15(2): 71-75.
- [6] 李家强, 金荣洪, 耿军平. 基于分数阶频率域混合相关的线性调频信号检测与参数估计[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(9): 1478-1482.
LI Jiaqiang, JIN Ronghong, GENG Junping. Fractional frequency domain hybrid LFM signal detection and parameter estimation based on correlation[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(9): 1478-1482.
- [7] 惠俊英, 生雪莉. 水下声信道[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 40-120.
HUI Junying, SHENG Xueli. Underwater Sound Channel[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007: 40-120.
- [8] 何成兵, 黄建国, 孟庆微, 等. 水声多径信道多普勒因子精确估计方法[J]. 电声技术, 2010, 34(12): 57-59.
HE Chengbing, HUANG Jianguo, MENG Qingwei, ZHANG Qingwei. The accurate estimation for multipath underwater acoustic channel Doppler factor[J]. Electro Acoustic Technology, 2010, 34(12): 57-59.
- [9] 梁小果, 相明. 基于分布式检测融合技术的水声信号检测方法[J]. 探测与控制学报, 2001, 23(2): 25-30.
LIANG Xiaoguo, XIANG Ming. The underwater acoustic signal detection method based on distributed detection fusion technique[J]. Journal of Detection and Control, 2001, 23(2): 25-30.
- [10] 相明, 王昭, 李宏, 等. 一种分布式水声信号检测系统的融合算法[J]. 西北工业大学学报, 2000, 18(2): 237-240.
XIANG Ming, WANG Zhao, LI Hong, et al. A fusion algorithm

- for distributed underwater signal detection system[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2000, 18(2): 237-240.
- [11] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2002: 153-154.
- LIU Bosheng, LEI Jiayu. Acoustics principle[M]. Haerbin: Haerbin Engineering University Press, 2002: 153-154.
- [12] 林伟. 远程水声通信技术的研究[D]. 西安: 西北工业大学硕士学位论文. 2005.
- LIN Wei. Research on remote underwater acoustic communication technology[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.
- [13] 姚山峰, 曾安军, 严航, 等. 基于多重累积相关的 LFM 脉冲信号实时检测算法[J]. 电讯技术, 2011, 51(5): 71-76.
- YAO Shanfeng, ZENG Anjun, YAN Hang, et al. Multiple accumulation related to real-time detection of LFM pulse signal based on[J]. Telecommunications Technology, 2011, 51(5): 71-76.

中国科学院声学研究所喜获国家科技进步二等奖

2015年1月9日上午, 2014年度国家科学技术奖励大会在人民大会堂隆重举行, 党和国家领导人习近平、李克强、刘云山、张高丽出席大会并为获奖代表颁奖。中国科学院声学研究所完成的某项目获国家科学技术进步奖二等奖, 侯朝焕院士代表获奖团队到会领奖。

中国科学院院长白春礼向声学研究所发来贺信, 希望认真学习贯彻党的十八大和十八届三中、四中全会精神, 深刻领会习总书记对科技创新及中科院发展提出的期望和要求, 全面实施“率先行动”计划, 系统谋划“十三五”改革创新, 秉承爱国为民理念, 树立创新自信, 勇攀高峰, 锐意改革, 开拓创新, 为实施创新驱动发展战略、建设世界科技强国、实现中华民族伟大复兴中国梦, 不断做出国家战略科技力量应有的贡献。

《声学技术》编辑部

讣告

我国著名的声学家、同济大学教授、中共党员赵松龄教授, 因病医治无效, 于2015年1月17日上午11时56分在上海新华医院逝世, 享年88岁。

赵松龄教授1927年2月生于浙江东阳, 1951年毕业于浙江大学物理系, 同年进入同济大学工作, 历任同济大学科研处处长、物理系系主任、声学研究所所长等职; 曾任中国声学学会副理事长, 上海市声学学会副理事长, 《同济大学学报》主编, 《物理教学》副主编等。

赵松龄教授长期从事物理、声学的教学与科研工作, 在物理声学 and 噪声控制领域取得了丰硕的成果, 在纤维材料吸声理论、管道中声传播理论以及穿孔共振结构吸声理论等领域作出重要贡献。同时, 他对同济物理学科的建设和发展也作出了卓越贡献。赵松龄教授一生发表科学论文百余篇, 出版有《物理学》、《普通物理》以及《噪声的降低与隔离》等专著。

赵松龄教授兢兢业业工作在教学科研的第一线, 为国家培养了一批优秀的科研、教学人才。他治学严谨、淡泊名利, 深受尊崇。

同济大学声学研究所