

基于瞬时频率的双曲调频信号距离估计误差分析

庞玉红, 严 琪, 王世闯

(杭州应用声学研究所, 浙江杭州 310012)

摘要: 双曲调频信号的多普勒不变性可使运动目标匹配滤波输出的能量损失达到最小, 从而可对运动目标有很高的检测能力, 在运动目标检测与参数估计中具有独特优势, 但同时也给目标距离的估计带来一定误差。在双曲调频信号模糊函数、多普勒不变性和匹配滤波特性的基础上, 对距离分辨力和测距误差进行了分析, 提出了基于瞬时频率的距离误差计算公式, 可直接应用于目标距离的补偿以及目标跟踪中量测方程的校正, 提高声呐的工作性能。

关键词: 双曲调频; 多普勒不变性; 瞬时频率; 距离估计误差

中图分类号: B845.2 Q62

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2016)-05-0421-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.05.006

Instantaneous-frequency-based ranging bias analysis of HFM waveforms

PANG Yu-hong, YAN Qi, WANG Shi-chuang

(Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: Hyperbolic-Frequency-Modulated (HFM) waveforms offer the detection performance that is named “Doppler invariance”, which makes a minimal output loss—relatively unaffected by target range rate in matched filtering. In the meantime the Doppler invariance leads a ranging bias in estimating the range of moving targets. In this article, the range resolution and ranging bias based on the HFM ambiguity functions are analyzed based on the Doppler invariance and matched filter properties. And then an instantaneous-frequency-based ranging bias formulas is proposed, which can be utilized to calibrate the measurement equation of precise target tracking and so to improve the performance of sonar detection.

Key words: hyperbolic-frequency-modulated waveform; Doppler invariance; instantaneous frequency; ranging bias

0 引 言

主动声呐探测中, 宽带信号相比于窄带信号, 可以激发更多的目标特征, 其回波信号携带更多目标信息, 且混响背景相关性较弱, 更有利于目标参数的精确估计和目标检测^[1]。双曲调频信号(Hyperbolic-Frequency-Modulated waveforms, HFM)是一种多普勒不变信号, 当目标与声呐之间存在相对运动时, 接收信号瞬时频率的变化规律不变, 只是将原信号的瞬时频率 $f(t)$ 平移一个时间 t_0 。此时, 接收信号与发射信号依旧“匹配”, 经声呐系统处理后, 输出的信号幅度变化不大。目前, HFM 信号多应用于雷达系统中, 然而其宽带信号的多普勒不敏感性质对于声呐目标探测尤其重要, 该特性可使运

动目标匹配滤波输出的能量损失达到最小, 对运动目标检测与参数估计具有独特优势。但其多普勒不敏感性质会带来一定的距离估计误差, 降低声呐系统的测距精度, 也间接影响了声呐系统的跟踪能力。

本文基于 HFM 脉冲信号的瞬时频率, 对距离分辨力和系统参数的距离误差进行分析, 可用于声呐系统 HFM 脉冲信号目标距离的补偿和目标跟踪中测量方程的校正, 从而提高声呐系统对快速运动目标的距离估计精度和跟踪能力。

1 双曲调频信号(HFM)

1.1 时间波形

HFM 信号以脉冲形式发射, 脉宽为 T , 调频系数为 b ^[2]:

$$b = \frac{f_1 - f_2}{f_1 f_2 T} \quad (1)$$

式中: f_1 是 HFM 脉冲信号的起始频率, f_2 为截止

收稿日期: 2015-12-10; 修回日期: 2016-03-12

作者简介: 庞玉红(1990—), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 研究方向为水声工程。

通讯作者: 庞玉红, E-mail: yuru0502@126.com

频率, 发射信号可表示为^[2]

$$s(t) = A(t) \exp(j \frac{2\pi}{b} \ln(1 + bf_1 t)) \quad (2)$$

瞬时频率描述了不稳定波形的时间变化性质, 其定义为^[2]

$$f_s(t) = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{b} \ln(1 + bf_1 t) \right] = \frac{f_1}{1 + bf_1 t} \quad (3)$$

显然, $f_s(0) = f_1, f_s(T) = f_2$ 。瞬时频率在起始频率 f_1 和截止频率 f_2 之间连续单调, 服从双曲分布, 带宽 $B = |f_2 - f_1|$ 。如果 $f_2 > f_1$, 则 HFM 脉冲信号是调制频率随时间递增的双曲调频 ($b < 0$), 记为 HFM^+ , 反之, 调制频率随时间递减 ($b > 0$), 记为 HFM^- ^[3]。

1.2 模糊函数

模糊函数(Ambiguity Function, AF)可以方便地刻画波形与对应匹配滤波器的特征, 是波形设计与分析的有力工具。

信号 $s(t)$ 的模糊函数定义为^[4]

$$|\chi(\tau, \xi)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t) s^*(t + \tau) e^{-j2\pi\xi t} dt \right| \quad (4)$$

式中: ξ 为信号频移; τ 为信号时延; $s^*(t)$ 表示信号 $s(t)$ 的共轭。

根据式(4)绘出 HFM 脉冲信号的模糊函数图, 在宽带条件下, 如图 1 所示。

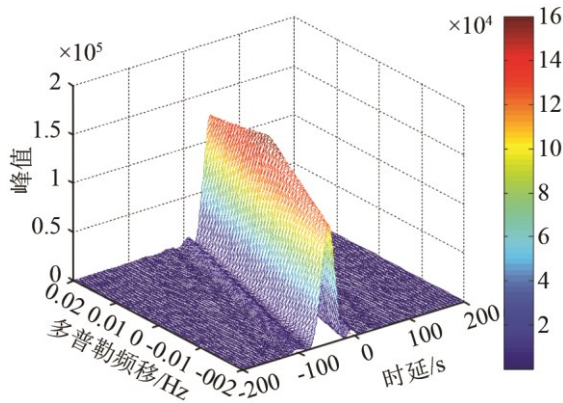


图1 双曲调频脉冲信号的模糊函数图
Fig.1 Ambiguity function of HFM

HFM 波形的距离分辨力取决于其模糊函数。从图 1 可以看出, HFM 脉冲信号的模糊函数峰脊线在时延与频移之间存在倾斜, 这是由于时延与频移之间的耦合造成的, 被称为距离-多普勒耦合。峰脊线的倾斜使得运动目标的匹配滤波的峰值偏离真实值, 产生了误差, 如图 2 所示。简单来说, 距离估计误差与模糊函数的峰脊线有关, 取决于信号的脉宽、频率、声速和调制波形等参数。

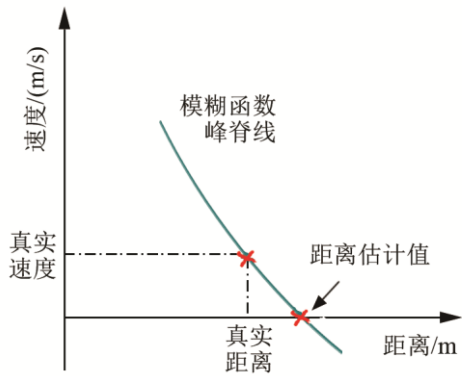


图2 HFM 脉冲信号距离估计误差原理图
Fig.2 Schematic of the ranging bias of HFM

1.3 多普勒不变性

声呐与目标间的相对运动会使接收的信号波形改变, 表现为频率的偏移, 即多普勒频移现象。

若目标接近声呐系统, 目标运动速度 v 为正。定义脉宽压缩参数^[4]为

$$\alpha = 1 - \frac{2v}{c} \quad (5)$$

式中, c 为声速。假设目标的初始距离为 d_0 , 结合式(2), 接收信号为

$$\begin{aligned} r_w(t, v) &= \sqrt{\alpha} s(\alpha(t - \tau_0)) = \\ &= \sqrt{\alpha} A(\alpha(t - \tau_0)) \times \\ &\quad \exp(j \frac{2\pi}{b} \ln(1 + bf_1 \alpha(t - \tau_0))) \end{aligned} \quad (6)$$

不考虑噪声和传播损失, $\tau_0 = 2d_0/c$, 将其代入式(3), 得到接收信号的瞬时频率为:

$$f_w(t, v) = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{b} \ln(1 + bf_1 \alpha(t - \tau_0)) \right] = \frac{\alpha f_1}{1 + bf_1 \alpha(t - \tau_0)} \quad (7)$$

即

$$f_w(t, v) = \frac{f_1}{1 + bf_1(t - \tau_0 - \tau_1)} \quad (8)$$

对比式(3)和式(8)可得, τ_1 即为频率调制函数在时间上的平移:

$$\tau_1 = \frac{1 - \frac{1}{\alpha}}{bf_1} = \frac{2vf_1 T}{c\alpha(f_2 - f_1)} \quad (9)$$

此时

$$f_w(t, v) = f_s(t - \tau_0 - \tau_1) \quad (10)$$

若一种信号的多普勒效应等效于频率调制函数在时间上的平移, 接收信号的调制特性不变, 则称该信号具有多普勒不变性。此时, 接收信号瞬时频率的变化规律不变, 只是将原信号的瞬时频率在时间上进行平移。HFM 脉冲信号即为多普勒不变

信号。

2 距离误差分析

2.1 匹配滤波特性

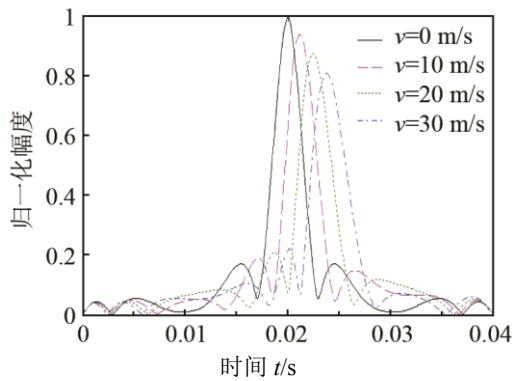
匹配滤波是进行距离估计的常用方法，是对发射信号和接收信号进行相关处理，使其输出信噪比达到最大。理论上，估计距离 $\hat{d}_0$ 的计算公式为^[2]

$$\hat{d}_0 = \arg \max \left| \int r_w(t, v) s^* \left(t - \frac{2d}{c} \right) dt \right| \quad (11)$$

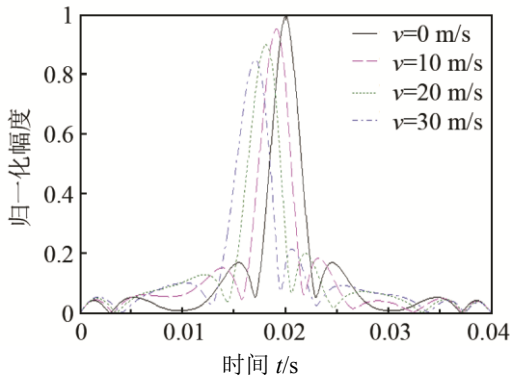
当目标与声呐之间存在相对运动时，接收信号产生频移。HFM 脉冲信号由于其多普勒不变性，接收信号的瞬时频率与匹配信号相比，平移一个时间 τ_1 。该时间平移导致匹配滤波的输出峰值的平移，仿真分析如下：

图 3(a)和 3(b)分别为 HFM⁺和 HFM⁻在目标速度为 0、10、20、30 m/s 时的匹配滤波输出结果。

如图 3 所示，匹配滤波输出的主峰突出且不存在展宽，也没有明显突出的旁瓣；运动目标的输出峰值和静止目标的峰值相比，在时间轴上有所移



(a) 正双曲调频 HFM⁺



(b) 反双曲调频 HFM⁻

图3 HFM⁺脉冲和 HFM⁻脉冲信号不同速度下的匹配滤波输出
Fig.3 Matched filter outputs of HFM⁺ and HFM⁻ for different velocities

动，速度 v 转换为时间延迟 τ ，且速度越大，偏移越多；针对正负不同的调频参数 b ，时延 τ 的偏移方向不同。因此，当 $v \neq 0$ 时，匹配滤波器估计得到的 $\hat{d}_0$ 不等于真实距离 d_0 ，存在一定的估计误差，且目标运动速度越大，误差越大。

2.2 基于瞬时频率的距离误差分析

基于式(5)，反射脉宽为 $T_r = T/\alpha$ ，如果 $\alpha - 1$ 的值是非负的，接收信号与发射信号的脉冲宽度不同。通常，当 v 为正时，接收脉冲的宽度被拉伸， v 为负值时，脉冲宽度被压缩。

下面通过两步来引入基于瞬时频率的距离误差计算公式。

(1) 假设 $2v/c \approx 0$ ，此时接收信号与发射信号的脉宽相等。设目标距离为 $\hat{d}$ ，如果发射信号的瞬时频率等于 $r_w(t, v)$ 的瞬时频率，则

$$f_s \left(t - \frac{2\hat{d}}{c} \right) = f_w(t, v), \quad 0 \leq t \leq T \quad (12)$$

(2) 如果两个信号的脉宽不同，利用发射和接收脉冲的中心点对齐方式，如图 4 所示。若 $v > 0$ ，脉冲宽度增加 $T_r - T$ ，若要保持两信号的中心点对齐，发射脉冲需延时 $(T_r - T)/2$ 。令

$$f_w \left(t + \frac{T_r - T}{2}, v \right) = f_s \left(t - \frac{2\hat{d}_0}{c} \right) \quad (13)$$

或者

$$f_w(t, v) = f_s \left(t - \frac{2\hat{d}_0}{c} - \frac{T_r - T}{2} \right) \quad (14)$$

将式(3)和式(7)代入式(14)，得到：

$$\frac{f_1}{1 + bf_1 \left(t - \frac{2\hat{d}_0}{c} - \frac{T_r - T}{2} \right)} = \frac{\alpha f_1}{1 + bf_1 \alpha \left(t - \tau_0 \right)} \quad (15)$$

或

$$\alpha + bf_1 \alpha \left(t - \frac{2\hat{d}_0}{c} - \frac{T_r - T}{2} \right) = 1 + bf_1 \alpha \left(t - \frac{2d_0}{c} \right) \quad (16)$$

两边各减去 $bf_1 \alpha t$ ，得

$$\alpha - 1 - \alpha bf_1 \frac{T_r - T}{2} = \frac{2\alpha bf_1}{c} (\hat{d}_0 - d_0) \quad (17)$$

或

$$-2v - bf_1 v T = 2\alpha bf_1 (\hat{d}_0 - d_0) \quad (18)$$

定义宽带距离误差 $\Delta_{\text{HFM}}^w = \hat{d}_0 - d_0$ ，得到

$$\Delta_{\text{HFM}}^w = \frac{-2v - bf_1 v T}{2\alpha bf_1} = \frac{v T f_2}{\alpha (f_2 - f_1)} - \frac{v T}{2\alpha} \quad (19)$$

当 $v = 0$ 时， Δ_{HFM}^w 趋近于 0。 Δ_{HFM}^w 的第一项等于 $\tau_1 c / 2$ ，其中 τ_1 的定义见式(9)。第二项是 $(T - T_r) c / 2$ 。

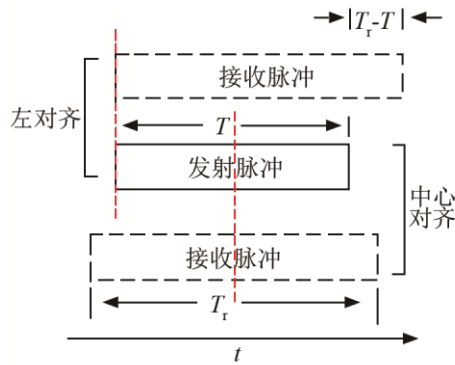


图4 $v > 0$ 时脉冲对齐方法示意图
Fig.4 An illustration of pulse alignment for $v > 0$

设 $f_c = (f_1 + f_2)/2$, 则误差为

$$\Delta_{\text{HFM}}^w = \frac{vTf_c}{\alpha(f_2 - f_1)} - \frac{vT(f_2 - f_1)}{2\alpha(f_2 - f_1)} - \frac{vT}{2\alpha} = \frac{vTf_c}{\alpha(f_2 - f_1)} \quad (20)$$

显然, 宽带信号的距离估计误差 Δ_{HFM}^w 是速度 v 的非线性函数。也可以看到, Δ_{HFM}^w 是 T 的线性函数, 脉宽 T 增加, 距离估计误差增加。

基于瞬时频率的距离误差公式有很明确的物理意义, 且运算过程简单。定义 $R_w(v)$ 为不考虑噪声的情况下, 速度 v 的模糊函数序列。HFM 脉冲信号的功率损耗率近似为^[2]

$$\xi_w(v) = \frac{R_w(v)}{R_w(0)} \approx 1 - \frac{2|v|}{c} \left| \frac{1}{2} + \frac{1}{bf_1T} \right| = 1 - |v| \frac{2f_c}{cB} \quad (21)$$

其中, $0 \leq \xi_w(v) \leq 1$ 。因此, 如果在信号检测过程中要求 $\xi_w(v) > \xi_0$, 则若要利用式(20)计算距离误差, 需满足

$$|v| < \frac{cB(1 - \xi_0)}{2f_c} \quad (22)$$

3 性能分析

为了验证基于瞬时频率的距离误差公式的性能, 进行仿真分析如下:

HFM⁺ 和 HFM⁻ 脉冲信号的瞬时频率为 $1.5 \text{ kHz} \leq f_s(t) \leq 2 \text{ kHz}$, 脉冲宽度 $T = 0.1 \text{ s}$, 若声速 $c = 1500 \text{ m/s}$, 则目标在不同运动速度下, 距离估计误差如图 5 所示。

若设定目标运动速度为 $v = 15 \text{ m/s}$, 脉宽为 $T = 0.1 \text{ s}$, HFM⁺ 和 HFM⁻ 脉冲信号的瞬时频率满足 $\min\{f_1, f_2\} = 2 \text{ kHz}$, 且 $\max\{f_1, f_2\}$ 的变化范围是 $3 \sim 8 \text{ kHz}$, 距离估计误差与带宽的关系如图 6 所示。

同样, 若目标运动速度 $v = 15 \text{ m/s}$, HFM⁺ 和

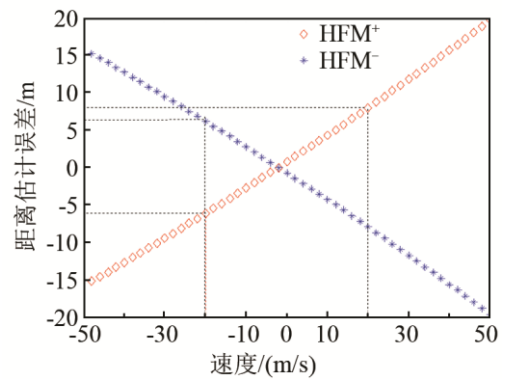


图5 不同运动速度的距离误差
Fig.5 Ranging bias versus movement velocity

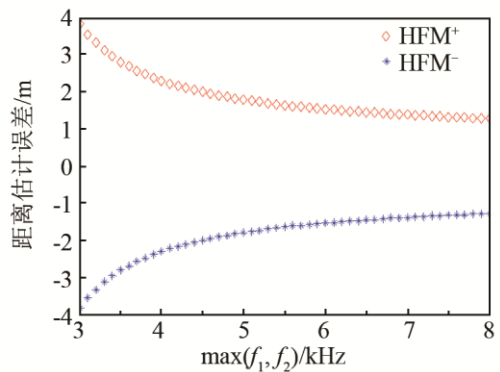


图6 距离估计误差与带宽的关系
Fig.6 Ranging biases as a function of bandwidth

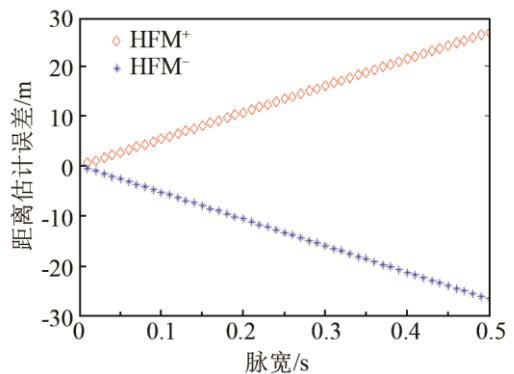


图7 距离估计误差与脉宽的关系
Fig.7 Ranging biases as a function of pulse width

HFM⁻ 的瞬时频率为 $1.5 \text{ kHz} \leq f_s(t) \leq 2 \text{ kHz}$, 脉冲宽度 T 的变化范围是 $0.01 \sim 0.5 \text{ s}$, 距离估计误差与脉宽的关系如图 7 所示。

根据上述仿真分析, 可以得到如下结论:

(1) 距离估计误差 Δ_{HFM}^w 是速度 v 的非线性函数, 因为 $\alpha = 1 - 2v/c$ 。这种非线性关系是由距离-多普勒峰脊线的非线性特性决定的。且速度越大, 距离估计误差越大。

(2) 正双曲调频的 Δ_{HFM}^w 和速度 v 正相关, 反双曲调频的 Δ_{HFM}^w 和 v 负相关。

(3) 对于给定的速度 v , $\Delta_{\text{HFM}^+}^w = \Delta_{\text{HFM}^-}^w$, 该结论也可由(20)式得到:

$$|\Delta_{\text{HFM}^+}^w| = \frac{|v|Tf_c}{\alpha|f_2 - f_1|} = |\Delta_{\text{HFM}^-}^w| \quad (23)$$

(4) 当 $v > 0$ 时, $|\Delta_{\text{HFM}}^w(v)| > |\Delta_{\text{HFM}}^w(-v)|$ 。因为

$$|\Delta_{\text{HFM}}^w| = \frac{|v|Tf_c}{|f_2 - f_1|} \cdot \frac{c}{c - 2v} \quad (24)$$

显然, $v > 0$ 时分母较小, 距离误差较大。

(5) 当脉宽 T 增加时, Δ_{HFM}^w 增加;

(6) 当带宽 B 增加时, Δ_{HFM}^w 增加。

4 结 论

本文对宽带 HFM 脉冲信号的距离估计误差进行研究, 主要内容如下: 对 HFM 脉冲信号的模糊函数、多普勒不变性和匹配滤波特性进行分析, 并依据上述性质, 提出基于瞬时频率的距离误差计算公式, 同时给出该公式的适用条件。通过分析发现, 宽带 HFM 脉冲信号的距离估计误差 Δ_{HFM}^w 是速度 v 的非线性函数, v 越大, 距离估计误差越大; Δ_{HFM}^w 也与信号的脉宽 T 和带宽 B 有关, T 和 B 的增

加均会使得距离估计误差增大。

因此, 在主动声呐波形设计过程中, 需综合考虑脉宽和带宽等参数对目标距离估计的影响, 以提高声呐的工作性能。同时, 本文对距离误差的计算可用于补偿主动声呐 HFM 宽带信号的距离探测结果, 也可用于校正目标跟踪中的测量方程, 从而提高声呐系统对快速运动目标的距离估计精度和跟踪能力。

参 考 文 献

- [1] 庞玉红, 严琪, 王世闯. 双曲调频信号测速测距方法研究[J]. 声学与电子工程, 2014, 4(4): 21-24.
PANG Yuhong, YAN Qi, WANG Shichuang. An method of range and range rate estimation using HFM[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2014, 4(4): 21-24.
- [2] SONG Xiufeng, Peter Willett. Range bias modeling for hyperbolic-frequency-modulated waveforms in target tracking[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2012, 37(4): 670-679.
- [3] ZHANG Lan, XU Xiaomei. HFM spread spectrum modulation scheme in shallow water acoustic channels[C]//IEEE Xplore, 2012: 1-6.
- [4] 田坦. 声呐技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010: 30-40.
TIAN Tan. Sonar technology[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010: 30-40.

• 简 讯 •

中国科学院声学研究所东海研究站技术成果亮相宁波智博会

2016年9月9~11日, 第六届中国(宁波)智慧城市技术与应用产品博览会在浙江宁波国际会展中心隆重召开。

中国科学院声学研究所东海研究站(简称: 东海站), 在“智能电网”、“智能水网”领域分别展示了“无线无源温度检测系统、高压局部放电监测系统、配电房无线智能综合管理系统”和“城市排水在线监测系统、城市集中供暖防垢系统”等5项高技术成果。

展会期间, 浙江省、宁波市领导莅临东海站展位参观指导, 并听取了东海站工作人员对相关成果的详细介绍。其中利用超声波阻垢原理设计的“城市集中供暖防垢系统”获得了专业观众的关注。

据悉, 智慧城市技术与应用产品博览会, 是中国首个以“智慧城市”为命名的国家级重点展会, 也是中国科学院主办的展会之一。

《声学技术》编辑部