

声纳中具方向性宽带强干扰的实时抑制方法*

李 巍[†] 陈新华 孙长瑜 卫翀华

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要 声纳中具方向性的宽带强干扰严重影响远处舰船的检测。本文针对此问题,提出一种能实时抑制此类干扰的方法,它以保证干扰方向输出功率最小为约束条件,本文还研究了此方法对目标信号的性能影响情况。最后,通过对海试数据的处理,证明此方法在实践中比较有效。

关键词 阵列, 方向性宽带强干扰, 干扰抵消, 实时信号处理

Real-time cancellation of directional wideband interference in sonar

LI Yi CHEN Xin-Hua SUN Chang-Yu WEI Chong-Hua

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract Directional wideband interference severely affects the detection of a faraway ship. In order to solve this problem, this paper presents a novel way which uses the criteria of minimum output power to cancel the directional wideband interference by real-time processing. The characteristic of the target signal affected by this method is also studied. Sea trial data is finally used to verify feasibility of the method, and the result is promising.

Key words Array, Strong directional wideband interference, Interference rejection, Real-time signal processing

1 引言

拖曳线列阵声纳中存在着拖船的自身辐射噪声,它是一种方向性较强的强干扰,完全掩盖

了远处传来的舰艇噪声。由于多途效应、海洋信道变化等影响,拖船噪声到达线列阵时成为具有一定带宽、占据一定角度范围的短时平稳信号,传统的波束形成方法不能抑制这类干扰。

2006-12-25 收稿; 2008-04-21 定稿

* 国家自然科学基金资助项目(60532040)

作者简介:李巍(1973 -),女,成都人,中国科学院声学所在职博士研究生,研究方向:水声信号处理。

陈新华(1978 -),男,副研究员。孙长瑜(1954 -),男,研究员。卫翀华(1976 -),男,助理研究员。

[†] 通信联系人 E-mail: liyi_731973@yahoo.com.cn

迄今为止,已有大量文献从时域角度出发,利用不同的约束条件提出了各种实时抑制宽带干扰的方法。如:Anderson等提出的^[1]DICANNE(Digital Interference Cancelling Adaptive Null Network Equipment)系统,它通过形成干扰波束和普通波束来抑制方向性干扰。Frost提出了一种经典的带约束条件的实时噪声抵消方法,但运算量非常大^[2]。Griffiths和Jim根据Frost提出的方法进行改进,提出了不需约束条件的实时噪声抵消方法,此方法中的旁瓣抵消支路能有效抑制方向性干扰^[3]。另外,Dybdal和Ott提出了一种用于天线阵的时间补偿自适应算法,它可快速、有效地对特定方向的宽带干扰信号进行抑制^[4]。

在实际声纳工作环境中,实时性要求较高,信号处理的计算量不能太大。本文参考前面提到的几种实时自适应信号处理方法,提出了一种应用在拖曳线列阵声纳中的实时强干扰抑制方法,其运算量小,抑制宽带方向性强干扰的能力强。通过对海试数据的处理证明,此方法性能良好。

2 算法描述

2.1 算法理论

采用图1的拓扑结构。用等间隔基元线阵接收信号,阵元间距为 d ,阵元输出的电信号为:

$$\mathbf{X}(m) = \{x_1(m), x_2(m), \dots, x_K(m)\}^T, \quad (1)$$

其中 $x_k(m)$, $k=1, 2, \dots, K$ 表示第 k 个阵元在时刻 m 得到的输出,它包含目标信号 $s(t)$ 、拖船干扰 $i(t)$ 和环境噪声, K 为阵元个数。 T 表示矩阵转置。

本文首先假设海洋环境噪声各向同性、处处相等,且噪声强度远小于拖船干扰。另外,假设目标信号和拖船干扰均来自点源,到达线阵时,为平面波入射。第三,假设目标信号在线阵各阵元产生的输出分别相等,拖船干扰在线阵各阵元产生的输出也分别相等。目标信号和拖船干扰除强度差异外,其区别仅在于到达线阵的方向不一样,即:目标信号和拖船干扰到达各水听器的延迟时间不一样。第四,假设目标信号、拖船干扰和环境噪声相互独立。

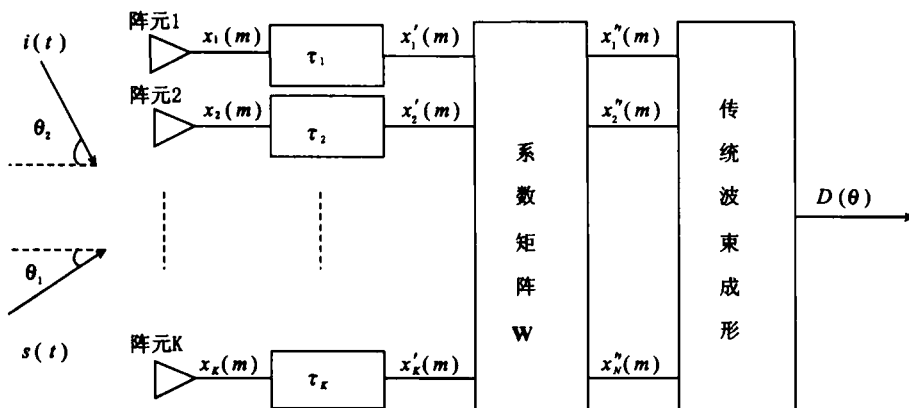


图1 算法的拓扑结构

参见图1,延迟时间 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$ 用于进行时间校正,使阵列指向我们感兴趣的方向。由于拖曳线列阵声纳中拖船干扰入射方向的

强度远大于目标信号和海洋环境噪声强度,因此降低该方向的输出功率能有效抑制拖船干扰^[5]。由此可知,待定参数 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$ 应保

证阵列指向拖船干扰入射方向。

图 1 中的系数矩阵 W 为需要确定的权重,信号通过 W 后得到:

$$X''(m) = WX'(m) \quad (2)$$

对 $X''(m)$ 做传统的波束成形就可得最终结果,即:干扰被抑制后的波束图 $D(\theta)$ 。其中 $X'(m) = \{x'_1(m), x'_2(m), \dots, x'_K(m)\}^T$, $X''(m) = \{x''_1(m), x''_2(m), \dots, x''_N(m)\}^T$ 。

从上面的分析可知,在整个算法中,需确定的参数是系数矩阵 W 。 W 应保证在拖船干扰入射方向有:

$$\begin{aligned} \min E\{X''^T X''\} &= \min E\{(WX')^T (WX')\} \\ &= \min W^T R_{X'X'} W, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $R_{X'X'}$ 为 $X'(m)$ 的协方差矩阵。

由于拖船干扰的强度非常大,导致其在各个阵元,尤其是相邻阵元的输出基本相等,所以在确定系数矩阵 W 时,只要简单地保证在拖船干扰入射方向满足 W 的每行之和等于零,尤其是每行相邻几个元素之和等于零,就可抑制拖船干扰。如果用 b_k^T 表示 W 的第 k 行,即:

$$b_k^T I = 0, k = 1, 2, \dots, N, \text{ 且 } N \leq K - 1 \quad (4)$$

其中 I 是全 1 的列向量, b_k 线性独立。这样可以保证 X'' 中最多有 $K - 1$ 个线性独立的量,即: W 的行的维数必须为 $K - 1$ 或更少^[3]。

满足上述条件的 W 很多,如(以阵元个数为 6 个的情况为例):

$$W^1 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$W^2 = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$W^3 = \begin{bmatrix} 1 & -3 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -3 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -3 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

⋮
⋮

2.2 仿真结果

本文对上述算法进行了仿真,设线阵的阵元间距为 1m,阵元个数为 70 个,海洋声速为 1500m/s,采样频率为 20kHz。将拖船正横方向定义为 0° 。

分别产生两个频带为 500Hz 到 1000Hz 的零均值高斯白噪声,用于模拟拖船干扰和目标信号。拖船干扰入射方向与拖船正横方向的夹角为 -45° ,目标信号入射方向与拖船正横方向的夹角为 30° 。信干比为 -12dB 。仿真结果如图 2 中的 a、b 所示。由图可知,本文所述方法中的 W 均有抑制方向性强干扰的能力。以 5、6、7 式中的 W 为例进行计算可得,它们抑制方向性宽带强干扰的性能基本一样,信干比可提高 50dB 左右。但相对来说,在阵元个数较多的情况下,如果选用 W^1 作为系数矩阵,则算法的运算量最小,在实际工作中实时性最强。

另外,我们还仿真研究了本算法对环境噪声的抑制作用。首先,去掉上段所述的拖船干扰,然后在目标信号上叠加一个零均值高斯白噪声,用于模拟海洋环境噪声,信噪比为 10dB。仿真结果如图 2 中的 c、d 所示,由图可知,虽然本文所述方法对拖船干扰入射方向的环境噪声有抑制作用,但对其它方位环境噪声的抑制作用与传统波束形成方法基本一样,没有改善。

仿真结果进一步验证了本算法的约束条件是:保证干扰方向输出功率为最小。

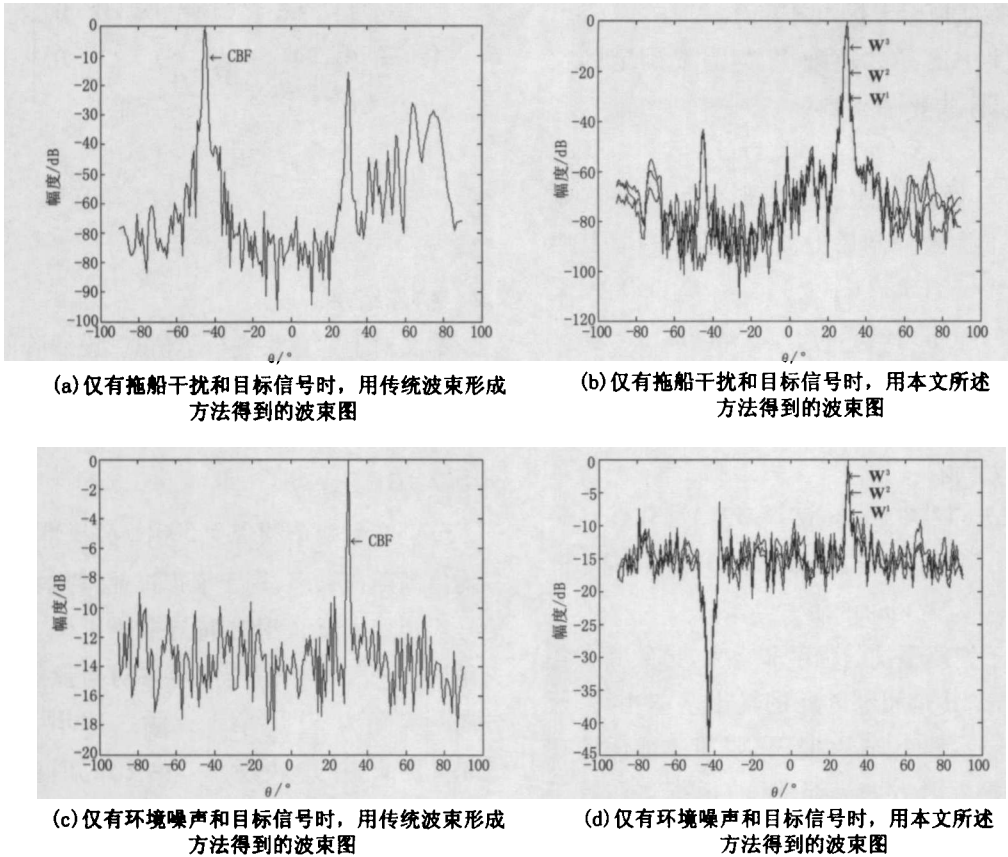


图2 仿真结果

3 与传统波束形成方法的性能比较

舰艇辐射噪声在很大的频率范围内由宽带噪声和单频噪声混合而成, 可表示为叠加有线谱的连续谱^[6]。本文仅针对单频信号进行讨论, 宽带信号则可用适当的方法由单频信号合成得到。下面的系数矩阵取为 W^l 。

假设目标信号 $s(t)$ 从角度 θ_1 入射, 拖船干扰 $i(t)$ 从角度 θ_2 入射, 两个信号的角频率均为 ω 。令阵元 k 在时刻 t 的输出为:

$$x_k(t) = s(t) + i(t) + n_k(t) \quad (8)$$

其中 $n_k(t)$ 为各向同性、处处相等的海洋环境噪声。则阵元 $k+1$ 在时刻 t 的输出为:

$$x_{k+1}(t) = s\left(t + \frac{d \sin \theta_1}{c}\right) + i\left(t + \frac{d \sin \theta_2}{c}\right) + n_{k+1}(t) \quad (9)$$

将阵元 $k+1$ 的输出信号相对阵元 k 的输出信号延迟时间 τ , 再通过系数矩阵 W^l 后得到的新信号为:

$$\begin{aligned} x''_k(t) = & x_k(t) - x_{k+1}(t - \tau) = s(t) + i(t) \\ & + n_k(t) - s\left(t + \frac{d \sin \theta_1}{c} - \tau\right) \\ & - i\left(t + \frac{d \sin \theta_2}{c} - \tau\right) \\ & - n_{k+1}(t - \tau) \end{aligned} \quad (10)$$

从上式可看出: 当延迟时间 τ 取得恰当时, 上面的方法可将拖船干扰完全抵消掉。此处当 $\tau = \frac{d \sin \theta_2}{c}$ 时可完全抑制拖船干扰, 得到的新信号为:

$$\begin{aligned} x''_k(t) = & s(t) - s\left(t + \frac{d \sin \theta_1}{c} - \frac{d \sin \theta_2}{c}\right) \\ & + n_k(t) - n_{k+1}(t - \tau) \end{aligned} \quad (11)$$

将 $x''_k(t)$ 表示为频域形式有:

$$X''_k(\omega) = S(\omega) [1 - e^{j\omega(\frac{dsin\theta_1}{c} - \frac{dsin\theta_2}{c})}] + N(\omega)(1 - e^{-j\omega\tau}) \quad (12)$$

由上式可知,虽然在理想情况下 $x''_k(t)$ 中的拖船干扰被抵消了,但 $X''_k(\omega)$ 中的目标信号相对真实目标信号 $S(\omega)$ 也发生了失真。下面将进一步讨论 $X''_k(\omega)$ 中目标信号的变化情况。

由于拖船干扰主要位于船尾方向,所以令拖船前进方向为 -90° ,正横方向为 0° 。本文将针对拖船干扰入射角 θ_2 为 -90° 、 -45° 、 0° 的情况

进行讨论,其它情况可以推而广之。 $X''_k(\omega)$ 中目标信号相对于真实目标信号的变化比值如图 3 所示。从图中可看出:(1)当信号频率固定时,目标在方位上越靠近拖船干扰,则 $x''_k(t)$ 中目标信号幅度衰减越大;当目标远离拖船干扰时, $x''_k(t)$ 中目标信号幅度衰减变小,甚至其幅度可能会得到加强。(2)当信号频率 f 变化时,虽然 $x''_k(t)$ 中目标信号在方位上的幅度变化仍满足上面的规律,但目标信号的幅度变化程度是不同的。高频时变化快,低频时变化慢。

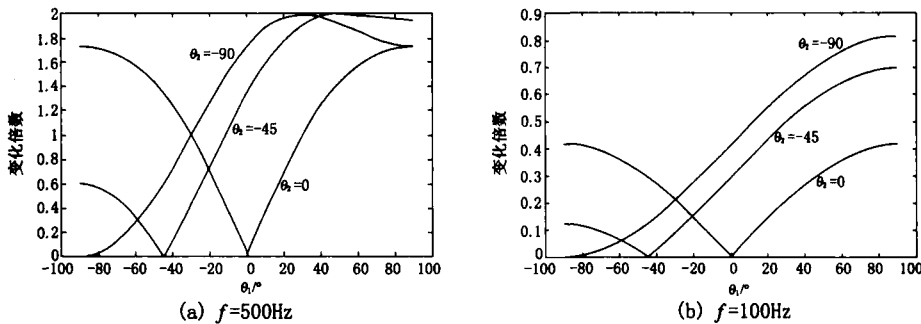


图 3 $x''_k(t)$ 中目标信号相对真实目标信号的幅度变化倍数

综上所述,在理想情况下,对信号 $x''_k(t)$ 做波束成形会有下面特点:(1)虽然 $x''_k(t)$ 中目标信号的延迟时间相对于真实目标信号的延迟时间发生了变化,但 $x''_k(t) \sim X''_k(t)$ 中目标信号的延迟时间有相等变化量,所以直接对 $x''_k(t) = 1, 2, \dots, N$ 做传统波束成形不会改变目标信号的方位指示。(2)当有多个目标存在时,由于它们位于不同的方位,所以本算法波束图中显示的强度差异可能会与实际情况有区别。如:靠近拖船干扰的强目标信号通过上述处理后可能显示为一个弱信号,而远离拖船干扰的弱目标信号通过上述处理后可能显示为一个强信号。(3)当有多个目标存在时,由于它们的频率分量不一样,所以在本算法得到的波束图中显示的强度差异也会与实际情况有区别。如:在同一个方位上,通过本算法的处理,强度不同的高频信号和低频信号的强度可能变为相同。

4 海试结果

2005 年 5 月在某海域进行了海试。采用拖曳线列阵接收数据,拖缆长度约为 400m,水深约 80m,声速剖面为负梯度。接收阵共有 80 个阵元,阵元间距为 1m,采样频率为 20kHz。

本文提取其中性能良好的 70 个阵元进行数据处理。定义拖船前进方向为 -90° ,拖船正横方向为 0° ,在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 范围内形成 181 个波束,拖船干扰主要集中在 -80° 左右。根据线列阵形状和采样频率可以求得,要用数字信号形成 $-90^\circ \sim -78^\circ$ 之间的波束,相邻阵元的时间延迟均为 13 个采样周期。

数据处理结果如图 4 所示。从图中可看出, 45° 左右有一个弱目标信号。如果用传统波束形成方法对数据进行处理,则目标信号强度比拖船干扰低 25dB 左右,在方位历程图中

目标将被拖船干扰完全掩盖。但如果采用本文所述的方法对数据进行处理,拖船干扰基本被完全抑制,在方位历程图中用肉眼基本看不到拖船干扰,而目标信号明显显现出来。

在实际的声纳工作环境中,由于多途效应、阵形畸变、海洋信道变化、各阵元的幅频响

应不一致等多种因素影响,会产生时间延迟的量化误差、干扰入射角的估计误差、各阵元输出误差等很多问题。但通过对海试数据的处理证明,通常这些误差量在本算法中基本可以忽略不计。本文提出的方法在精度要求不是非常高时,性能好、运算高效。

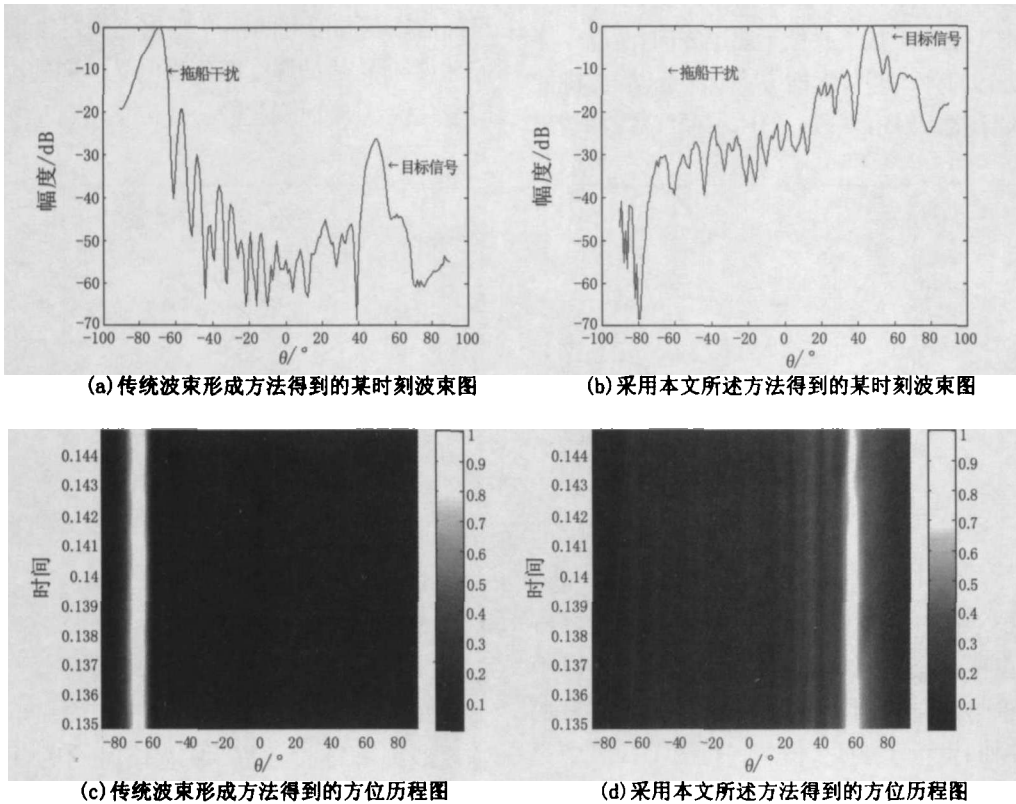


图4 海试数据处理结果

5 小结

本文提出了一种抑制拖曳线列阵声纳中强干扰的实时处理方法,通过理论分析、仿真模拟以及海试数据的处理可得到下面结论:

(1)本算法以保证干扰方向输出功率最小为约束条件,抑制方向性宽带强干扰的能力非常强,但同时会使干扰方向的目标信号发生衰减。在实际工作中我们称干扰方向为盲区,所以即使此方位内的目标信号发生了衰减,对我们的影响也不是很大,因此本算法的实用性

很强。

(2)本算法虽然会引起目标信号的强度发生改变,但不会改变目标信号的方位指示,所以尤其适用于方位历程图的显示。

(3)由于拖船干扰方向基本固定,所以延迟时间 τ 可由线列阵的阵形预先估计出来。结合本算法的拓扑图可知,此方法相对于传统波束形成方法仅多了乘以系数矩阵 W 的过程,整个算法的运算量非常小,实时性很强。

本文的所有理论分析是基于理想状态的,下一步的工作可对非理想条件下的误差来源、

误差大小,以及这些误差对声纳性能的影响程度做更深入分析。研究出既可抑制拖船干扰,又不会使目标信号发生衰减的实时信号处理方法。

参 考 文 献

- [1] Victor C. Anderson and Philip Rudnick. Rejection of Coherent Arrival at an Array, JASA, 1969, 45(2): 406 - 410.
- [2] Otis Lamont Frost, III. An algorithm for Linearly Constrained Adaptive Array Processing, Proceedings of the IEEE, 1972, 60(8): 926 - 935.
- [3] Lloyd J. Griffiths and Charles W. Jim. An alternative Approach to Linearly Constrained Adaptive Beamforming, IEEE Trans. On Antennas and Propagation, 1982, AP - 30 (1): 27 - 34.
- [4] R. B. Dybdal and R. H. Ott. Time-compensated Adaptive Interference Cancellation, Antennas and Propagation Society International Symposium, 1987, vol. 25: 74 - 77.
- [5] R. L. Fante and J. J. Vaccaro. Wideband Cancellation of Interference in a GPS Receive Array, IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(2): 549 - 564.
- [6] R. J. 尤立克著,洪申译. 水声原理(第三版). 哈尔滨:哈尔滨船舶工程学院出版社,1990:259.

“民用建筑隔声与地产价值”高峰论坛通知

为推广民用建筑隔声设计中成熟做法、成熟工艺及新方法、新工艺、新材料的应用,清华大学建筑环境检测中心将于 2008 年 10 月举办“2008 建筑未来·民用建筑隔声与地产价值”高峰论坛。

本次论坛获得了各级主管部门的大力支持,是首个由建筑师、工程施工、房产开发、建筑声学材料及声学顾问等行业精英人群组成的高端论坛。论坛的成立将站在国际高度,为管理部门、建筑业界、科研院所提供信息研究、营销、交流的平台,并根据近年来收集到的对各类民用建筑噪声、隔声、吸声方面的意见,综合考虑各类民用建筑的现状、人们对各类民用建筑的声学要求、社会经济的发展水平、建筑声学技术的发展水平,提出住宅、学校、医院、旅馆、办公建筑及商业建筑等六类建筑中的允许噪声级标准、隔声标准、隔声减噪设计,以及观演建筑、教室、会议室的吸声设计。论坛将对已有成熟做法、成熟工艺综合分析应用,并为参会嘉宾推荐新做法、新工艺、新材料、新设备,为民用建筑在建筑声学方面所做工作给出指导建议,该论坛的成立将对我国建筑业发展产生积极的推动作用。

请各有关单位积极参加本次论坛,并同期参观由清华大学建筑环境检测中心协办的“2008 中国国际建筑声学材料与工程设计展览会”。有关具体内容,请参见论坛邀请函及相关活动方案,或咨询主办单位。

组委会秘书处:(010)62796708、62782679、62797308、62784105、62782707

论坛网址:www. abcd. edu. cn

(清华大学建筑物理实验室 清华大学建筑环境检测中心)