

一种小波包分解的FX结构全频带ANC系统

佘 炜, 徐新盛, 吴英姿

(哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对传统有源降噪系统在噪声与信号混合的复杂环境中无法有效工作的问题,设计了一种应用于舰艇艏端被动声纳平台的本艇自噪声有源抵消系统,从而提高声纳的作用距离.该系统采用基于小波包分解的FX结构,小波包这种正交变换方法降低了各分量之间的相关性,改善了参考输入矩阵的特征值分布,而其滤波器组的工作方式可以对不同频段的噪声任意细分,分别抵消,具有多子带系统的效果.通过与LMS算法相结合,使系统具备了灵活的全频带时频多分辨能力和较快的收敛速度.利用真实海试数据仿真试验,在较小的信号失真度状态下,取得了约12.2 dB的全频带降噪量,进一步表明系统在复杂水下噪声场中的优势.该种结构提升了系统的噪声控制能力,具有较高的实用价值.

关键词: 声学;自适应有源噪声抵消;小波;Filtered-XLMS;自噪声

中图分类号: TB535 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2008)02-0356-06

Whole-band ANC system with the FX structure based on wavelet packet decomposition

XUAN Wei, XU Xin-sheng, WU Ying-zi

(College of Underwater Acoustic Eng., Harbin Eng. Univ, Harbin 150001, China)

Abstract: The traditional Active Noise (ANC) system does not work effectively in the environment where the noise is mixed with the useful signal. An active noise cancellation system applied on the passive sonar platform of warships is designed to solve the problem said above, which can enhance the role range of the passive sonar. This ANC system uses an FX structure based on wavelet packet decomposition. Because of the orthogonal characteristics of wavelet packet decomposition, the correlation between every two weights is reduced, and the distribution of reference-input matrix's eigenvalues is also improved. The working method of the system's filter-group ensures that the noise in different frequency bands can be distinguished and cancelled respectively. So the system has the effect that is the same as that of the multi-frequency-band system. Combined with the LMS algorithm, this system has the flexible whole-band distinguish ability in both the time-domain and the frequency domain and a faster convergence rate. Simulations are done based on practical sea-trial data. In the condition of smaller distortion of signals, a 12.2 dB noise reduction is achieved over the whole-band. It is indicated that the system designed in this paper has advantages in the complex underwater noise field. This system enhances the noise controlling capability. So it has a high practical value.

Key Words: acoustic; adaptive active noise cancellation; wavelet; Filtered-XLMS; self-noise

潜艇自噪声是被动声纳系统的主要干扰,它使声纳接收端的输入信噪比降低,导致被动声纳的有效作用距离相应减小.因此,降低潜艇的自噪声具有很重要的意义.潜艇的自噪声主要有机械噪声、螺旋桨噪声和水动力噪声3种主要的噪声源^[1],其特性表现为线谱和连续谱相互叠加的宽带噪声.采用有源降噪技术不需要改变潜艇基本结构和材料,就可以减小被动声纳平台的潜艇自噪声.噪声声源级每减小6 dB作用距离可增加约1倍^[2].

收稿日期:2007-09-19

基金项目:水声技术国家部委科技重点实验室基金资助(51445070101ZS2301)

作者简介:佘 炜(1980-),男,哈尔滨工程大学博士研究生,E-mail: efa0885@163.com.

传统的有源降噪技术^[3~5]是将一定空间域内的声信号完全抵消,而笔者研究的内容是噪声场中混杂有用信号的有源降噪(ANC)技术.关于线谱噪声或窄带噪声抵消的算法很多^[6~8].简单信道和噪声下,传统的平稳信号处理方法能够胜任;对于复杂情况下的噪声主动抵消问题,则需要更强有力的信号处理手段,而小波变换正是分析非平稳信号的有力工具.笔者将小波包分解技术和 FX 结构进行整合,提出了一种新的、基于小波包分解的 FX 结构 ANC 系统,并给出了相应的 LMS 算法公式.将系统的应用环境设定在水下,在技术上相对要复杂许多.目前还未见国内外关于水下有源降噪相关成果的报道,而笔者首先设计了水下有源降噪实验硬件系统方案,建立了相应的系统模型.

1 实验装置设计

自适应有源噪声抵消(Adaptive Active Noise Cancellation, AANC)技术的原理是初级声源产生的声场与次级声源产生的声场相消干涉.图 1 所示为一个前馈型水下 AANC 试验系统几何布放模型.试验环境为消声水池,有源噪声抵消系统的目标是抵消误差传感器处的噪声,而保留有用信号.噪声信号(初级声源)通过水介质进行传播,靠传感器布放在噪声源的附近用于采集与噪声相关的信号以作为自适应滤波器的参考输入.待抵消区域为一定范围的三维空间,为了扩大降噪空间,提高降噪量,必须采用多个次级声源和误差传感器来构建多通道自适应有源噪声抵消系统.图中表示的是一个双通道抵消系统,其次级声源传感器和误差

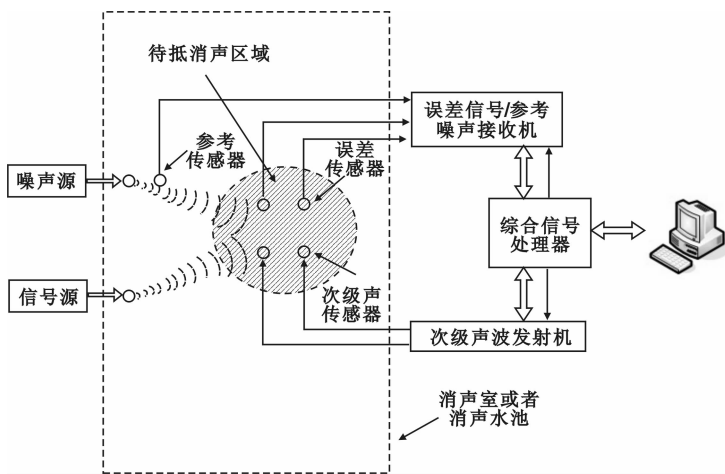


图 1 前馈型水下 AANC 试验系统布放模型

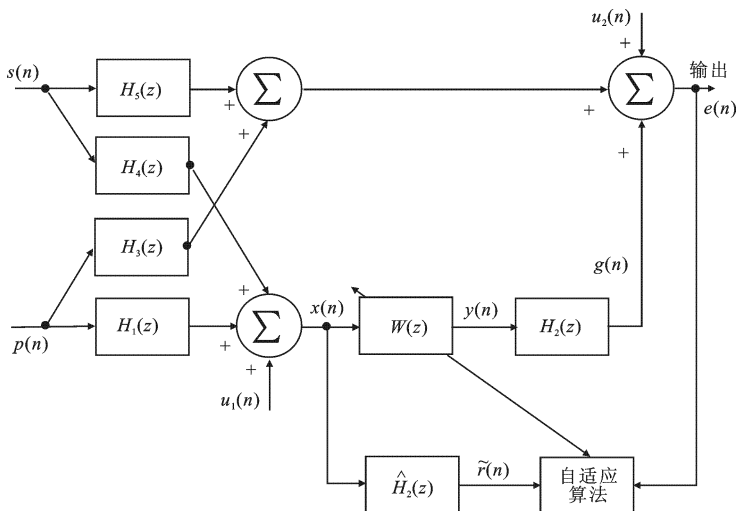


图 2 单通道自适应有源噪声抵消系统框图

传感器对称布放. 工作中, 参考输入信号送入信号处理器后, 经自适应算法解析, 将次级信号送于换能器, 在一定区域内实现与初级噪声的叠加, 提高该区域内的信噪比. 接收与发射设备采用可灵活扩展的多通道设计, 信号处理系统主体采用 TI 公司的高速 DSP 芯片. 误差传感器采集的信噪比变化数据通过信号处理器高速端口保存于计算机中, 以供后续数据分析.

为了方便分析自适应噪声抵消系统的算法, 提取其中一路通道来说明问题. 图 2 为相对应的有源噪声抵消器结构框图. H_1 表示噪声源到参考传感器处的声通道的传递函数; H_2 表示次级源到参考传感器处的声通道(反馈通道)的传递函数; H_3 表示噪声源到误差传感器处的声通道(初级通道)的传递函数; H_5 表示次级源到误差传感器的声通道(次级通道)的传递函数. s 为有用信号, p 为待抵消的噪声, e 为误差输出.

2 系统结构和算法描述

考虑初级噪声 $x(n)$ 在 L 时刻内具有局部平稳特性, 误差传感器接收到的信号可表示为主输入噪声和抵消噪声之差:

$$e(n) = d(n) - v(n) = d(n) - \mathbf{r}^T(n)\mathbf{W}(n) \quad (1)$$

其中 $\mathbf{r}(n)$ 为 Filtered-X 信号, $\mathbf{W}(n)$ 表示滤波器权向量.

在小波包域的 ANC 系统中引入 Filtered-X 思想来降低次级通道的干扰. 其系统结构可以表示成图 3 的形式.

由最小均方理论可推导系统代价函数为

$$J(n) = E[d^2(n)] - 2E[d(n)\mathbf{r}^T(n)]\mathbf{W} + \mathbf{W}^T E[\mathbf{r}(n)\mathbf{r}^T(n)]\mathbf{W} \quad (2)$$

对于平稳输入, 可以求出一个最佳权值矢量, 其中 \mathbf{P} 为主输入信号和 Filtered-X 信号的互相关矢量; \mathbf{R} 为 Filtered-X 信号的自相关矩阵, 则

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{P} \quad (3)$$

利用最陡梯度下降来进行权值迭代, 即

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) - \mu \nabla J(n) \quad (4)$$

设小波树的低、高频被完全等层次分解, 相应的 Filtered-X 参考输入矢量为

$$\mathbf{r}'_{\text{low},j} = [r'_{\text{low},j}(n), r'_{\text{low},j}(n-1), \dots, r'_{\text{low},j}(n-K+1)]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{r}'_{\text{hig},j} = [r'_{\text{hig},j}(n), r'_{\text{hig},j}(n-1), \dots, r'_{\text{hig},j}(n-K+1)]^T \quad (6)$$

其中 $j = 1, 2, \dots, J$, 表示系数矢量的标号, 全频带一共被分割为 $2J$ 个频带, 低、高频各 J 个. $K = L/(2J)$ 表示每个滤波器输出的分解系数的长度, 全频带系数总长为 L .

由于低频轮廓和低频细节的分解具有结构相似性, 这里只对低频轮廓加权矢量进行分析, 高频部分可以容易地由推广得到.

$$\nabla J_{1,j}(n) = 2e(n) \left[\frac{\partial e(n)}{\partial w_{j,1}}, \frac{\partial e(n)}{\partial w_{j,2}}, \dots, \frac{\partial e(n)}{\partial w_{j,K}} \right]^T \quad (7)$$

为了分别计算其中的元素值, 将误差信号进行小波包分解具体化表示:

$$e(n) = d(n) - \sum_{j=0}^J \mathbf{r}'_{\text{low},j}{}^T \mathbf{W}_j - \sum_{j=0}^J \mathbf{r}'_{\text{hig},j}{}^T \mathbf{W}_j \quad (8)$$

求解其中的元素, 并将权值调节公式写成矢量的形式:

$$\mathbf{w}_j(n+1) = \mathbf{w}_j(n) + 2\mu_j e(n) \mathbf{r}'_{\text{low},j}(n) \quad (9)$$

同理, 高频控制滤波器迭代矢量为

$$\mathbf{w}'_j(n+1) = \mathbf{w}'_j(n) + 2\mu'_j e(n) \mathbf{r}'_{\text{hig},j}(n) \quad (10)$$

分析中可以发现, 整个理论和低、高频分解层数并无太大关系, 即使不是等层数完全分解, 只需将相关公

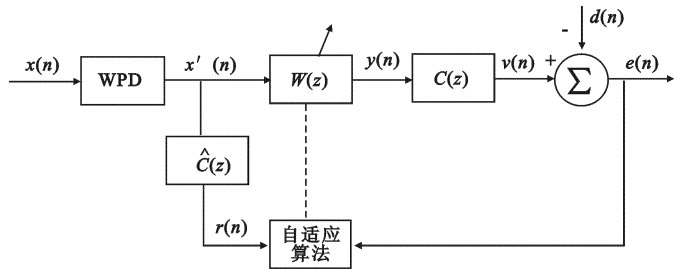


图 3 小波包 Filtered-X ANC 系统结构框图

式作简单修改即可,不用改变迭代规律.根据具体情况给出不同的小波树结构,既可以满足应用要求,也可以减少滤波器个数,从而减轻运算压力.

3 仿真结果与分析

3.1 仿真数据性能对比实验

通过仿真数据分别对比传统时域 FXLMS 算法与小波包分解 FXLMS 算法对线谱和连续谱噪声的有源抵消性能.线谱噪声为三正弦波叠加,采样率8 kHz,时域 FXLMS 步长为0.00006,小波包分解 FXLMS 步长为0.0004,滤波器长度均为64.对比图参见图4及图5.

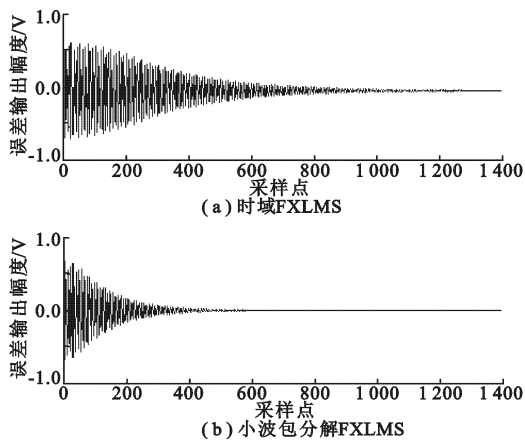


图4 线谱 ANC LMS 算法收敛速度对比图

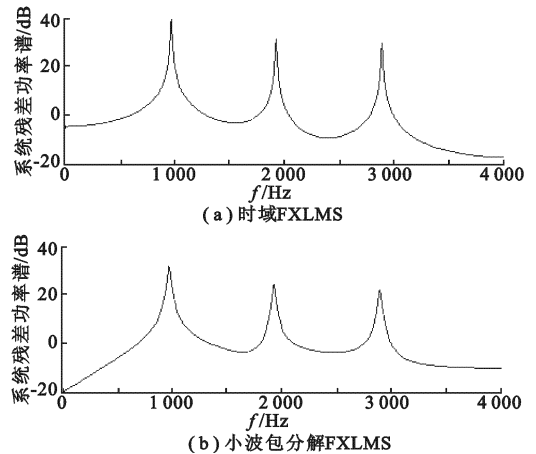


图5 线谱 ANC LMS 算法残差功率谱对比图

连续谱算法仿真,滤波器长度为128,时域 FXLMS 步长为0.003;小波包分解 FXLMS 步长为0.01.对比图参见图6及图7.

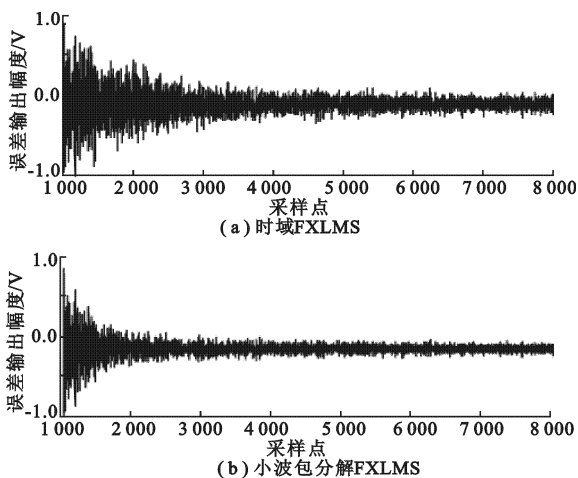


图6 连续谱 ANC LMS 算法收敛速度对比图

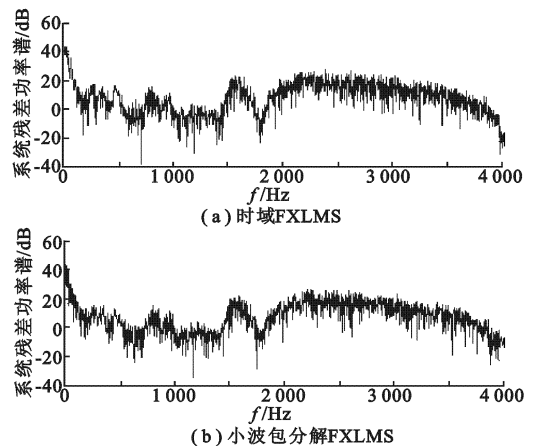


图7 连续谱 ANC LMS 算法残差功率谱对比图

从实验结果得出,无论是线谱还是连续谱噪声下,小波包分解 FXLMS 算法的收敛速度快于时域 FXLMS 算法.小波包分解 ANC 系统有着更高的降噪量和更低的稳态失调,经过计算:线谱条件下,小波包分解 FXLMS 算法的降噪量大于时域 FXLMS 算法约10 dB;连续谱条件下,时域 FXLMS 算法的降噪量为17.06 dB,小波包分解的 FXLMS 算法的降噪量为21.65 dB.

小波包分析是从小波分析延伸出来的一种对信号进行更加细致的分析与重构的方法,在信号处理的应用方面具有明显的优势,主要表现在:能对频带进行多层次划分;能对高频部分进一步分解;能够提高时频分辨率.其代价就是信号分析的计算量上升,而计算量与小波包分解层数的选择有着密切的联系,实际应用中

应兼顾运算复杂程度和噪声控制质量(笔者选择为 2 层). 由于小波包这种正交变换方法降低了各分量之间的相关性,改善了参考输入矩阵的特征值分布,而其滤波器组的工作方式可以对不同频段的噪声任意细分,分别抵消,兼具有多子带系统的效果,且其灵活的全频带时频多分辨能力又是频域系统和 2 进小波分解系统所不具备的. 所以基于小波包分解的 ANC 技术收敛速度、降噪量等指标比传统时域 ANC 系统具有更大的技术优势.

3.2 真实海试数据处理结果

最后通过真实的海试数据来检验系统性能(其中 FXLMS 算法步长为 0.0006). 噪声抵消结果如图 8~图 10 所示.

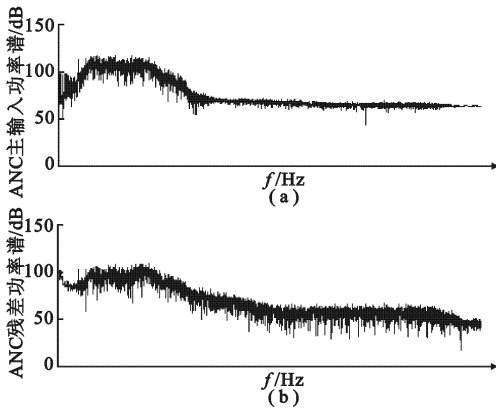


图 8 基于小波包分解的 ANC 系统实验结果

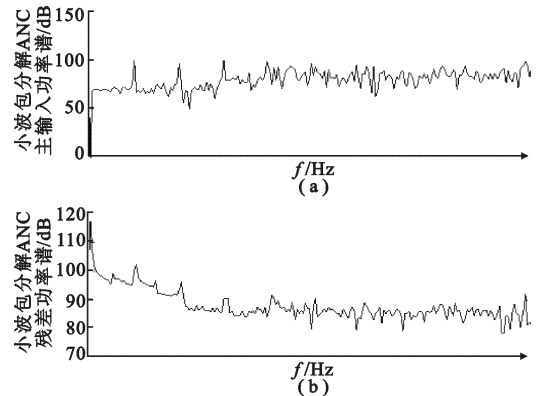


图 9 基于小波包分解的 ANC 系统实验结果(低频线谱)

主输入噪声和干扰噪声的相关系数为 0.8;系统残差和干扰噪声的相关系数为 0.065,也就是说,系统信号端单元附近的噪声和潜艇的干扰噪声的相关性已经大大降低,干扰噪声被抵消了. 连续谱(0.05~0.4 倍的归一化频率)降噪量为 10.9 dB;全频带降噪量为 12.2 dB.

因此,相对于时域系统这种小波包 ANC 系统具有更大的降噪量和更小的信号失真度.

4 结束语

传统的有源降噪技术是将一定空间域内的声信号完全抵消,而笔者研究的内容是降低潜艇自噪声分量的同时保留目标信号,难度更大. 在水声领域一定空间域内的噪声抵消至今还没有明显的成果. 本次设计的系统为实现水下声场的有源降噪提供了有效的理论依据和具体的实施方案,具有一定的工程应用价值. 笔者研究了潜艇自噪声有源抵消的试验系统设计,提出了一种基于小波包分解的 FX 结构全频带自适应有源抵消算法,并将其结合试验系统,通过理论分析和仿真试验得出这样的结论:基于小波包分解的 ANC 系统的性能(包括收敛速度、降噪量和稳态失调等指标)都要优于时域 ANC 系统. 而且基于小波包的控制滤波器权值迭代算法和时域传统算法类似,许多时域、频域的成熟技术可以拿来借鉴,例如变步长、变滤波器长度等方法;再结合小波域固有的时、频多分辨能力,基于小波包、二带小波和 M-带小波变换的 ANC 系统将有着更广阔的发展前景.

参考文献:

- [1] 尤立克 R J. 水声原理[M]. 洪申译. 第三版. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990.
- [2] 王杰. 互耦多通道自适应有源噪声抵消技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学水声工程学, 2004.

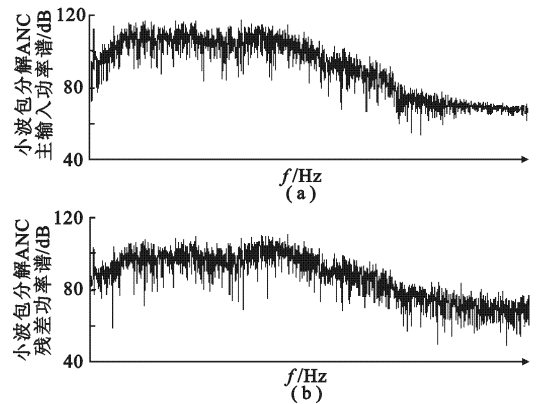


图 10 基于小波包分解的 ANC 系统实验结果(中高频连续谱)

- [3] Botto M A, Sousa J M C, Sa da Costa J M G. Intelligent Active Noise Control Applied to a Laboratory Railway Coach model[J]. *Control Engineering Practice* 2005,13(4): 473-484.
- [4] Donadon L V, Arruda J R F. Experimental Energetic Analyses of an Actively Controlled One-dimensional Acoustic Waveguide[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 280(1): 159-179.
- [5] Pawelczyk M. Adaptive Noise Control Algorithms for Active Headrest System [J]. *Control Engineering Practice*, 2004, 12(9): 1 101-1 112.
- [6] Sujbert L, Peceli G. Signal Model Based Periodic Noise Controller Design[J]. *Measurement*, 1997, 20(2): 135-141.
- [7] Bodson M, Jensen J S, Douglas S C. Active Noise Control for Periodic Disturbances[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2001, 9(1): 200-205.
- [8] Bershad N J, Bermudez J C M. Sinusoidal Interference Rejection Analysis of an LMS Adaptive Feedforward Controller with a Noisy Periodic Reference[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1992, 46(5): 1 298-1 312.

(编辑: 郭 华)

(上接第 350 页)

- [2] 张义荣, 肖顺平, 鲜明, 等. 基于机器学习的入侵检测技术概述[J]. *计算机工程与应用*, 2006, 42(2): 7-10.
Zhang Yirong, Xiao shunping, Xian Ming, et al. An Overview of Intrusion Detection Techniques Based on Machine Learning[J]. *Journal of Computer Engineering and Applications*, 2006, 42(2): 7-10.
- [3] Viola P, Jones M. Robust Real Time Object Detection [R]. Massachusetts: Compq Cambridge Research Laboratory, 2001.
- [4] Freund Y, Schapire R E. A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting[J]. *Journal of Computer and System Sciences*, 1997, 55(1): 119-139.
- [5] Schapire R E, Freund Y, Bartlett P, et al. Boosting the Margin: a New Explanation for the Effectiveness of Voting Methods[J]. *The Annals of Statistics*, 1998, 26(5): 1 651-1 686.
- [6] Hu Wei, Hu Weiming. Network-based Intrusion Detection Using Adaboost Algorithm[C]//Proceedings of the 2005 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence (WI'05). Compiègne: IEEE Computer Society Press, 2005: 712-717.
- [7] 杨武, 云晓春, 李建华. 一种基于强化规则学习的高效入侵检测方法[J]. *计算机研究与发展*, 2006, 43(7): 1 252-1 259.
Yang Wu, Yun Xiaochun, Li Jianhua. An Efficient Approach to Intrusion etection Based on Boosting Rule Learning[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2006, 43(7): 1 252-1 259.
- [8] 王勇. 基于计算智能的分布式入侵检测方法研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2005.

(编辑: 齐淑娟)