

## 主动声纳的混沌波形设计和解调方法

周 胜 林春生

(海军工程大学兵器工程系 武汉 430033)

**摘 要:** 该文为解决主动声纳隐蔽性差的问题, 提出了一种新的波形设计方法: 将特定编码调制到混沌信号中, 作为主动声纳的发射信号。文中全面考虑了水声信道滤波和加性噪声对回波的影响, 采用自适应滤波器解调回波, 通过识别编码检测回波信号。提出了改进的相平面 Lyapunov 自适应滤波器作为解调算法。仿真结果表明: 该解调算法在加性白噪声和滤波情况均有较好的解调效果, 并能满足实时性的要求。与现有的主动声纳发射信号相比, 提高了主动声纳的隐蔽性。

**关键词:** 主动声纳; 调制; 混沌; 滤波

中图分类号: U666.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)05-1248-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00544

## Design of Chaotic Waveforms and Demodulator for Application to Active Sonar System

Zhou Sheng Lin Chun-sheng

(Dept. of Weapon Engineering, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In this paper a new kind of waveform is proposed to improve covertness of active sonar. A specified code is used to modulate the chaotic signal as waveform of active sonar. The issues of the distortions introduced by filtered by physical underwater channel and additive noise are discussed. Echoes are demodulated by adaptive filter. Recovered signals are identified by stored specified codes. The Lyapunov adaptive filter improved in phase space is applied to be demodulator. The obtained results indicate that proposed demodulator quickly and accurately recover original chaotic signal distorted by additive noise and filter. It is found that chaotic waveforms are better covertness than the classical waveforms of active sonar.

**Key words:** Active sonar; Modulate; Chaos; Filter

### 1 前言

传统的被动声纳依赖于目标推进系统和机械装置辐射的信号作为检测声源。随着舰船降噪技术的提高, 被动声纳检测低速舰船和静音潜艇变得越来越困难。在噪声复杂的浅海区域, 甚至出现了两艘低速航行的核潜艇相撞的情况。

与被动声纳相比, 主动声纳动作可靠, 定位性好, 但存在隐蔽性差的严重缺陷。主动声纳的发射信号易被敌方侦察声纳截获。一旦被截获, 就面临被干扰和被摧毁的威胁。因此, 主动声纳在军事邻域的使用受到很大的限制<sup>[1]</sup>。

对主动声纳进行深入分析, 确保主动声纳在有效发现目标的同时, 尽量隐蔽自己。研究发射信号的低截获率(LPI)和低利用率(LPE)是有现实意义的, 是对被动声纳的有益补充<sup>[2-4]</sup>。

本文将特定的编码信号调制到混沌信号中, 作为主动声纳的发射信号。接收方通过识别解调后的

编码来确定是否检测到回波。这种方法利用混沌信号的随机性, 保密性好。采用的解调和识别方法可以实时处理, 优于传统的副本相关的检测方法。

### 2 波形设计

混沌信号具备确定性系统的内在随机性, 与伪随机信号比较, 随机性更好, 可选择性强, 产生简便。选用混沌信号作为主动声纳的发射信号, 有以下优点: 混沌信号难以识别, 被识别为噪声信号, 难以被敌方发现。即使被检测到, 侦察接收方也难以从中推断出调制参数, 无法实施有效干扰; 混沌信号本身是确定性低维动力系统, 比高维随机信号更容易采用降噪措施, 提高回波的信噪比<sup>[2]</sup>。

本文设计的混沌波形, 借鉴了水声通信的原理。将某一特定的编码信号调制到混沌信号中, 作为声纳的发射信号。该编码作为回波信号的特征, 用于识别目的, 并不传递信息。系统结构图如图 1 所示。

调制编码信号到混沌信号中。将调制后的信号作为主动声纳的发射信号。考虑回波信号在水声信道传递中, 存在滤波和加性噪声干扰的情况。接收

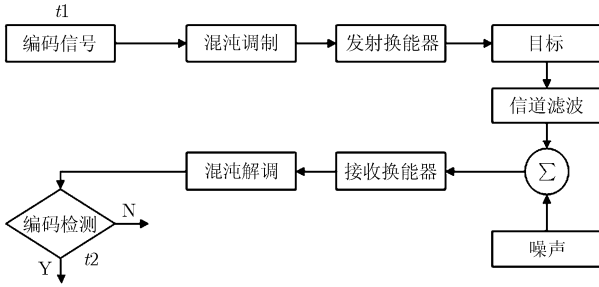


图 1 混沌声纳系统结构图

端将回波信号进行解调处理，还原编码信号。解调后的编码信号作为回波的特征。若还原的编码与原始编码匹配，则认为检测到回波信号。

这种方法具备以下几个优点：采用混沌调制，与传统的主动声纳方法相比，隐蔽性好。采用自适应解调方法，可以较好地解决水声信道的噪声干扰以及信道和接收端的滤波影响。解调方法不需要码的同步，可以实时处理。

根据介质中的声速和发射信号与检测回波的时间差，可计算出发射装置与目标间的距离。采用如文献[5]介绍的回波脉冲比较法等，得到目标的径向速度。

### 3 混沌回波滤波影响

比较混沌序列的均衡性、游程分布和相关特性，选择 logistic 混沌系统<sup>[6]</sup>。logistic 混沌系统为 1 维动力系统，产生简单。

logistic 混沌系统：

$$x(k) = ax(k-1)[1-x(k-1)] \quad (1)$$

其中  $a$  为分形参数。

将编码信号  $s(k)$  调制到 logistic 混沌系统的分形参数上，将式(1)改写为

$$x(k) = s(k-1)x(k-1)[1-x(k-1)] \quad (2)$$

其中  $|s(k)| \in [3.7, 4]$ ，以保证  $x(k)$  处在混沌区。

由式(3)，解调得到编码信号  $s(k)$  为

$$s(k) = \frac{x(k+1)}{x(k)[1-x(k)]} \quad (3)$$

在没有噪声干扰的情况下，式(3)可以将编码完整准确解调出来。而实际水声环境中，信道不但对目标信号进行能量变换(声传播损失)，而且它对声源的发射波形也进行变换，因而水声信道可以看作对发射波形进行变换的滤波器。从大多数应用场合来看，声信道可以合理假定为时不变的滤波器<sup>[7]</sup>。另外，接收端的频率滤波也是应该考虑的。

声纳回波由于介质空间的局限性和其非均匀性所引起的多径衰落和畸变比雷达回波严重得多。因此，声纳系统采用混沌雷达技术，就必须考虑滤波

因素的影响。

由图 2 可以发现，滤波会改变混沌信号的特性，相平面轨迹将发生混叠和模糊。文献[8]研究发现混沌信号经过滤波后，混沌特性会发生改变，混沌信号的分形维会增加。强滤波情况，滤波后的信号会变为非混沌。

之所以没有采用直接发射混沌信号，回波采用副本相关的方法，也正是因为滤波的影响。副本相关方法，仅对加性噪声干扰有效，无法消除滤波。文献[9]提出了粒子滤波方法，对加性噪声有效，但针对滤波的情况效果不佳。

设发射的混沌信号为  $x(k)$ ，考虑滤波  $h(k)$  和加性噪声  $n(k)$  的影响，回波接收到的信号为  $y(k)$ 。

$$y(k) = x(k) \cdot h(k) + n(k)$$

则实际解调的结果为

$$\begin{aligned} \hat{s}(k) &= \frac{y(k+1)}{y(k)[1-y(k)]} \\ &= \frac{x(k+1) \cdot h(k+1) + n(k+1)}{[x(k) \cdot h(k) + n(k)][1-x(k) \cdot h(k) - n(k)]} \quad (4) \end{aligned}$$

与式(3)比较，直接解调无法得到原始的编码信号，本文考虑采用自适应滤波器解调回波信号。

### 4 PLAF 方法的应用和改进

文献[10]比较了 LMS(Least Mean Square), RLS(Recursive Least Square)以及 LAF(Lyapunov Adaptive Filter)几种自适应滤波器，发现 LAF 误差收敛优于传统的 LMS 和 RLS 方法。本文中的解调方法选用了 LAF，并在相平面上对 LAF 方法进行了优化。

LAF 算法是基于 Lyapunov 稳定理论的自适应滤波方法。定义 Lyapunov 函数作为理想信号与滤波信号的误差函数，该函数在状态空间内具有唯一的全局最小值。根据 Lyapunov 稳定理论调整滤波器的权值，使误差以指数速度趋于零。通过合理的设置参数，使得滤波器输出信号渐趋于理想信号。

LAF 具体算法如下：

$$\varepsilon(k) = y(k) - s(k-1)y(k-1)[1-y(k-1)],$$

$$g(k) = \frac{y(k-1)[1-y(k-1)]}{|y(k-1)[1-y(k-1)]|^2 + r_1} \left( 1 - \tau \frac{|e(k-1)|}{|\varepsilon(k)| + r_2} \right),$$

$$s(k) = s(k-1) + g(k)\varepsilon(k),$$

$$e(k) = y(k) - s(k)y(k-1)[1-y(k-1)] \quad (5)$$

式(5)中  $0 \leq \tau < 1$ 。  $r_1, r_2$  取小的正数，避免分母为零的情况。

如图 2 (d)所示，未滤波的 logistic 混沌信号，在相平面有着规则形状。在相平面上，将 LAF 进行优化处理，可以在两维上同时进行误差收敛，比 LAF

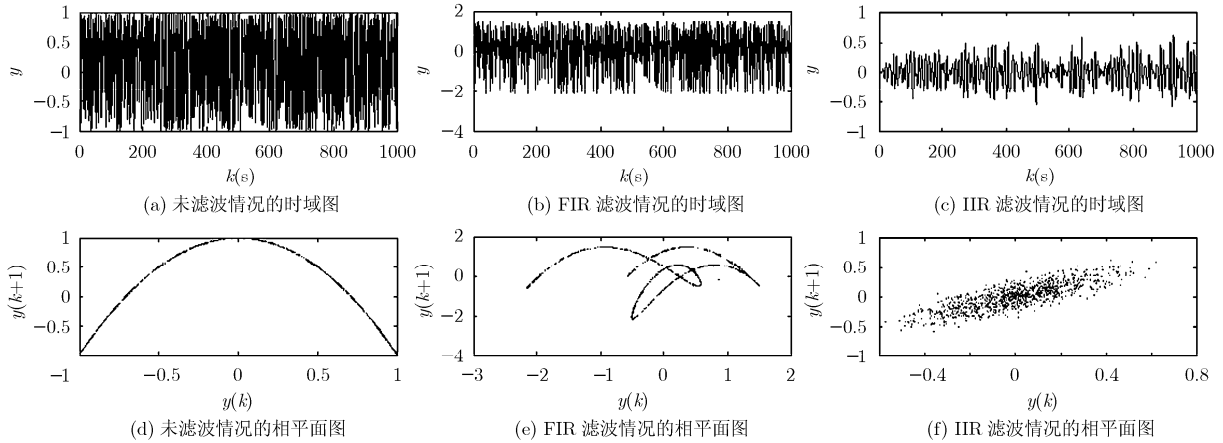


图 2 混沌信号滤波的相平面图

滤波收敛更快。本文将这种方法称为 PLAF(Phase Lyapunov Adaptive Filter)。

取  $\mathbf{y}_k = [y(k), y(k+1)]^T$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon}_k = [\varepsilon(k), \varepsilon(k+1)]^T$ , 如图 3。

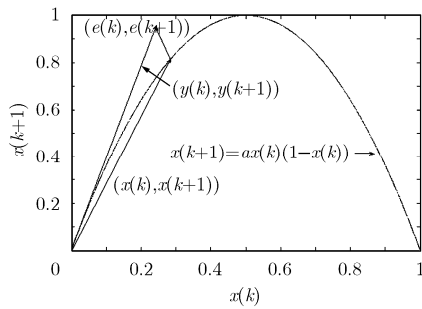


图 3 PLAF 的相平面图

将式(5)改写为

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_k &= \mathbf{y}_k - s(k-1)\mathbf{y}_{k-1}[1 - \mathbf{y}_{k-1}] \\ \mathbf{g}_k &= \frac{\mathbf{y}_{k-1}[1 - \mathbf{y}_{k-1}]}{\|\mathbf{y}_{k-1}[1 - \mathbf{y}_{k-1}]\|^2 + r_1} \left( 1 - \tau \frac{\|\boldsymbol{\varepsilon}_{k-1}\|}{\|\boldsymbol{\varepsilon}_k\| + r_2} \right) \\ s(k) &= s(k-1) + \mathbf{g}_k^T \boldsymbol{\varepsilon}_k \\ \mathbf{e}_k &= \mathbf{y}_k - s(k)\mathbf{y}_{k-1}[1 - \mathbf{y}_{k-1}] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

### 5 仿真

特定编码采用 0 1 的二值编码, 所对应的分形

$$\text{参数 } s(k) = \begin{cases} 3.7, & 0 \\ 4, & 1 \end{cases}$$

$$x(k) = s(k)x(k-1)[1 - x(k-1)]$$

采用 PLAF 解调回波信号。参数设置为:  $\tau = 0.1$ ,  $r_1 = 0.2$ ,  $r_2 = 0.2$ 。

下面比较 PLAF 在不同滤波程度情况下的工作情况, 为简化起见, 所选择的是一阶 IIR 滤波器:

$$z_{k+1} = e^{-\eta}z_k + x_{k+1}$$

$\eta$  为滤波器截止频率。 $x_{k+1}$  为发射的混沌序列,  $z_{k+1}$  为滤波后的信号序列。 $\eta \rightarrow 0$  为强滤波, 对发射的混沌序列的特性改变更为明显。

从图 4 可以发现, PLAF 可以较好解调出二值编码。随着  $\eta \rightarrow 0$ , PLAF 解调码幅值有所变化且效果下降, 但仍可以观察到周期码的出现。

如图 5, 可以发现 PLAF 对于加性白噪声有较好的解调效果, 对于滤波和滤波加白噪声的实际情况效果有所下降, 但仍能满足要求。滤波后的信号

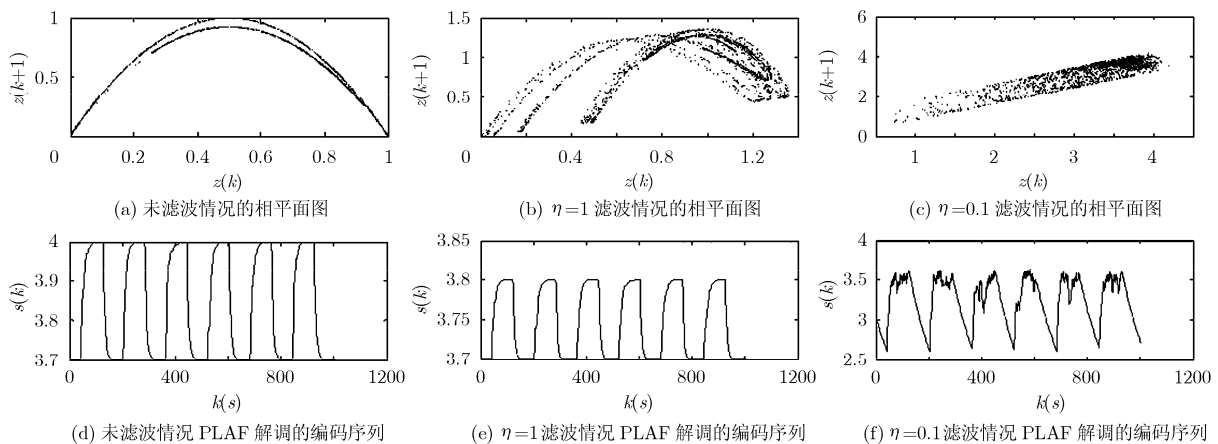


图 4 PLAF 解调滤波混沌信号效果图

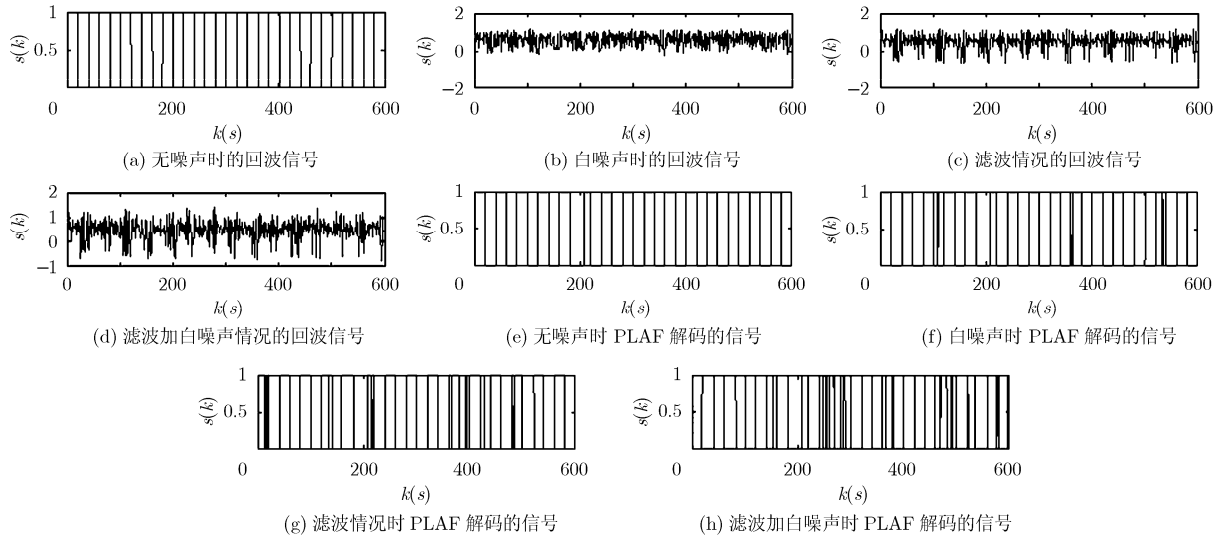


图5 PLAF 解调效果图

会出现间断点情况，可以通过分段平均的方式来消除，提高信噪比。仿真发现，PALF 在信噪比 15 dB 以上均有较佳的效果，对于信噪比 15 dB 以下，效果较差。

通过设置 MSE 作为性能指标，比较几种滤波器的解调性能：

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (S_k - \hat{S}_k)^2$$

其中  $\hat{S}_k$  为解调的回波信号。

由图 6 可以看出 LAF 方法优于传统的自适应滤波器 LMS 和 RLS。改进的 PLAF 方法由于是相平面的二维收敛，性能最好。

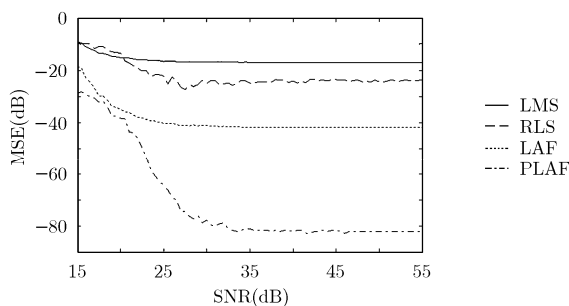


图6 几种自适应滤波器解调效果图

设计如下的 011 作为特殊编码，重复发射该编码 8 次，作为发射信号。判断规则为接收该编码 3 次即认为确定收到该回波信号。不同信噪比和滤波情况下的发现概率见表 1 和表 2。

## 6 结论

本文通过识别调制到混沌信号中的特定编码，检测回波信号。利用了混沌信号的随机特性，保密

性好。针对混沌信号在水声信道中的滤波和加性噪

表 1 不同的信噪比下的发现概率

SNR(dB)	40	30	20	15	10
$P_f$	1	0.978	0.844	0.681	0.21

表 2 不同的截止频率下的发现概率

$\eta$	2	1	0.6	0.4	0.2
$P_f$	1	0.933	0.867	0.63	0.212

声的干扰，采用了改进的相平面 Lyapunov 自适应滤波器解调回波。PLAF 方法计算量较大，可以考虑 RBF 的方法，提高解调的效率是下一步研究的重点。这种方法不能从回波中直接解调出目标的速度信息。需要采用如文献[5]介绍的回波脉冲比较法等，间接得到目标的径向速度。这种回波检测方法更适用于对速度要求不高的场合，如水雷主动引信中的使用。

## 参考文献

- [1] 刘贯领, 凌国民, 严琪. 主动声纳检测技术的回顾与展望[J]. 声学技术, 2007, 26(2): 335-340.
- [2] 戴军旗, 唐劲松, 苏广东. 主动声纳的低截获数字仿真研究[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(12): 174-176.
- [3] Willett P and Reinert J. LPI waveforms for active sonar? [C].

Liu Guan-ling, Ling Guo-min, and Yan Qi. Review and prospect of active sonar detection techniques[J]. *Technical Acoustics*, 2007, 26(2): 335-340.

Dai Jun-qi, Tang Jing-song, and Su Guang-dong. Study on digital simulation on low probability of interception of active sonar[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2008, 28(12): 174-176.

- IEEE Aerospace Conference, CT, USA, IEEE, 2004: 2236-2248.
- [4] Harman S A, Fenwick A J, and Willianms C. Chaotic signal in radar [C]. Proceeding of the 3rd European Radar conference, Manchester, UK, IEEE, 2006: 49-52.
- [5] 田坦, 刘国枝, 孙大军. 声呐技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2000: 124-138.
- Tian Tan, Liu Guo-zi, and Sun Da-jun. Technology of Sonar[M]. Haerbing: Harbin Engineering University Press, 2000: 124-138.
- [6] 王国红, 陈长兴, 李彦. 混沌信号发生器的研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版)2007, 22(4): 92-95.
- Wang Guo-hong, Chen Chang-xing, and Li Yan. Study on chaotic signal oscillator[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)* 2007, 22(4): 92-95.
- [7] 惠俊英, 生雪莉. 水下声信道[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 37-40.
- Hui Jun-ying and Sheng Xue-li. Underwater Sound Channel[M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2007: 37-40.
- [8] Mitschke F, Moller M, and Lange W. Measuring filtered chaotic signals[J]. *Physical Review A*, 1988, 37(11): 4518-4521.
- [9] 刘凯, 李辉, 戴旭初, 徐佩霞. 一种新的含噪混沌信号降噪算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(8): 1849-1852.
- Liu Kai, Li Hui, Dai Xu-chu, and Xu Pei-xia. A novel denoising algorithm for contaminated chaotic signals [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(8): 1849-1852.
- [10] Henry L and Jennifer L. Design of demodulator for the chaotic modulation communication system [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental theory and application*, 1997, 44(3): 262-267.
- 周 胜: 男, 1978 年生, 博士, 研究方向为水声信号处理、混沌检测.
- 林春生: 男, 1961 年生, 教授, 研究方向为水中信号处理、水雷引信.