

# 混沌滤波器对水声信号非线性动力学特性的影响

李作川, 张宇, 许芳, 孙海信

(厦门大学海洋与环境学院, 水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 福建厦门 361005)

**摘要:** 本文探讨了混沌滤波器在水声信号处理中的一种新的应用。混沌蔡氏电路产生的信号进行频带调制和高通 IIR 滤波后, 由水声换能器发射并经过水池传播和接收。实验结果表明混沌滤波器实现了频带搬移, 且接收到的水声信号具有与原始的混沌发射信号相似的宽频带特性。进一步, 运用非线性动力学方法对原始混沌电路信号和接收水声信号进行时间序列分析比较。发现接收的水声信号具有比发射的原始混沌信号更为不规则的重建相空间和更高的分形维数。混沌滤波器运用于水声信道提高了接收信号的非线性复杂特性。

**关键词:** 混沌滤波器; 水声信号处理; 非线性

**中图分类号:** TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 10-2378-04

## Influence of Chaotic IIR Filter on Nonlinear Dynamic Characteristic of Underwater Acoustic Signal

LI Zuochuan, ZHANG Yu, XU Fang, SUN Hai-xin

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology (Xiamen University)

Ministry of Education, Xiamen, Fujian 361005, China)

**Abstract:** A new application of chaotic filter in underwater acoustic signal processing is described. After frequency modulation and high-pass IIR filtering, the chaotic signal generated by the Chua's circuit was transmitted through a underwater sound channel. The received acoustic signal shows similar frequency band characteristic with chaotic circuit. Furthermore, nonlinear dynamic analysis is applied to compare the underwater acoustic signal and the original circuit signals. The results show that the acoustic signal has more irregular phase space and higher fractal dimension than chaotic circuit signals. Chaotic filter increases the complexity of the underwater signal.

**Key words:** chaotic filter; underwater acoustic signal processing; nonlinearity

## 1 引言

滤波技术已广泛地应用在信号处理和通信领域中<sup>[1]</sup>。在水声通信领域, 由于水声信道是一个十分复杂的时变、空变、频变信道, 信号在信道中的传输存在严重的传播损失和多径效应。因此, 滤波技术在水声信号处理中有着十分重要的应用。

目前, 已经提出了很多成熟的线性滤波理论, 但不能直接用于混沌系统<sup>[2]</sup>。混沌系统因对初始条件有着高度的敏感依赖性且难以长期预测的特点, 在保密通信领域有着潜在的应用价值<sup>[3]</sup>。根据混沌理论, 一个滤波器, 随着初始脉冲信号幅度的扰动, 如果其无限脉冲响应呈现指数分离, 则该滤波器可认为是一个混沌滤波器。混沌滤波器结合了线性滤波器和混沌的特性, 已经引起了广泛的关注。本文研究了混沌滤波器在水声信号处理中的应用。分析了混沌高通滤波器对水声系统的频

率和非线性动力学特性的影响。

## 2 原理

实验采用蔡氏混沌电路和巴特沃兹高通滤波器组成的混沌滤波器系统, 其动力学方程可描述为:

① 蔡氏混沌电路系统<sup>[4]</sup>

$$\frac{dX(t)}{dt} = F[X(t)] \quad (1)$$

$$\text{其中, } X = \begin{Bmatrix} V_{c1} \\ V_{c2} \\ i_L \end{Bmatrix}, F = \begin{Bmatrix} [G(v_{c2} - v_{c1}) - g(v_{c1})]/C_1 \\ [G(v_{c1} - v_{c2}) + i_L]/C_2 \\ F_3 = -(v_{c2} + i_L R_L)/L \end{Bmatrix},$$

$g(x) = m_0 x + 0.5(m_1 - m_0)(|x + 1.592| - |x - 1.592|)$ , 是分段线性函数。  $V_{c1}$  和  $V_{c2}$  是电容器  $C_1$  和  $C_2$  的电压。  $i_L$  是电感  $L$  的电流。

② 频谱平移

$$s(t) = h[X(t)] \quad (2)$$

其中,  $h(*)$  是调制函数. 我们用  $h(X) = X(t) \cos(2\pi f_s t)$  来实现对信号  $X(t)$  的频谱平移,  $f_s$  是调制的中心频率, 实际实验中,  $f_s = 25\text{kHz}$ .

### ③ 巴特沃兹 IIR 滤波器

实际应用中, 巴特沃兹 IIR 滤波器使用的较多.  $n$  阶巴特沃兹滤波器可以用下面的  $n$  阶线性微分方程描述<sup>[8]</sup>:

$$A_n(\omega_c) \frac{d^n y(t)}{dt^n} + \dots + A_1(\omega_c) \frac{dy(t)}{dt} + \omega_c^n y(t) = \frac{d^n h(X(t))}{dt^n} \quad (3)$$

这里, 系数  $A_1(\omega_c), \dots, A_{n-1}(\omega_c)$  是截止频率  $\omega_c = 2\pi f_c$  的函数. 对于一个确定的混沌驱动信号  $X(t)$ ,  $y(t)$  则是混沌高通 IIR 滤波器的输出.

### ④ 水声信道

水声传输信道可以描述为时变离散多径信道. 声信号自声源发出后, 将沿不同路径到达接收点. 总的接收信号是通过接收点的所有声信号的叠加. 因此, 经过水池传输后, 在接收端的接收信号可描述为<sup>[5]</sup>:

$$r(t) = y(t) \otimes \sum_{i=1}^M \alpha_i \delta(t - \tau_i) \quad (4)$$

其中,  $M$  为路径条数, 表征信道时间扩展;  $\alpha_i$  是第  $i$  条路径的复幅度,  $\tau_i$  是第  $i$  条路径的时间延迟.

为了描述滤波前后信号的非线性复杂特性, 我们运用非线性动力学(相空间重构和关联维)方法对信号进行分析. 对于实验测量的信号  $y(t)$ , 通过延迟时间序列来重构相空间:

$$R(t) = \{r(t), r(t - \tau), \dots, r(t - (m - 1)\tau)\} \quad (5)$$

其中  $\tau$  为延迟时间,  $m$  为嵌入维. 由 Takens 定理<sup>[6]</sup>证明, 对于合适的嵌入维, 即如果延迟坐标的维数  $m \geq 2D + 1$  ( $D$  为原系统的阶数), 重构出的相空间和原始的状态空间是微分同胚的. 为了定量地描述系统的分形维, 我们应用 Grassberger 和 Procaccia 所提出的关联维数  $D_2$ <sup>[7]</sup>:

$$D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\log C(W, N, r)}{\log r} \quad (6)$$

这里,  $r$  为盒子半径.  $C(W, N, r)$  为关联积分, 满足以下方程:

$$C(W, N, r) = \frac{1}{(N+1-W)(N-W)} \cdot \sum_{n=W}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1-n} \theta(r - \|R_i - R_{i+n}\|) \quad (7)$$

其中,  $\theta(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$   $W$  取大于 1 的值以消除时间序列中数据自相关的影响. 我们设置  $W$  为延迟时间  $\tau$ .  $D_2$  可以通过计算标度区内  $\log C(N, r)$  和  $\log r$  关系曲线的本地斜率得到<sup>[3,7]</sup>. 随着嵌入维  $m$  的增加, 在标度

区<sup>[7]</sup>内, 计算出的确定性系统的关联维将收敛到一个有限的值.

## 3 实验设计和结果

基于上述分析, 我们设计并搭建了整个混沌滤波器的实验系统, 如图 1 所示.

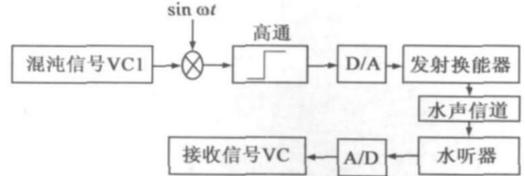


图1 实验系统原理图

其中, 混沌信号 VC1 是由经典的蔡氏电路产生的. 实验搭建的蔡氏电路图, 如图 2 所示.

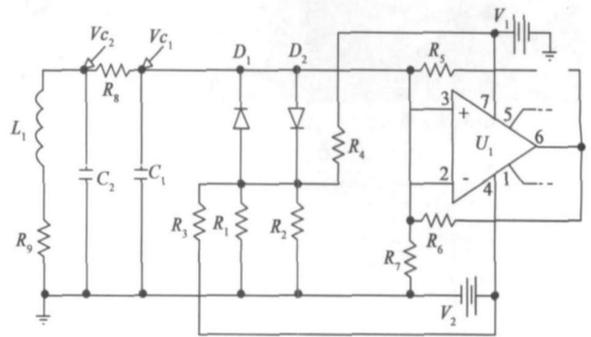


图2 蔡氏电路

蔡氏混沌电路<sup>[4]</sup>的参数测量如下:  $L_1 = 9.48\text{mH}$ ,  $R_9 = 3.46\Omega$ ,  $C_1 = 5.13\text{nF}$ ,  $C_2 = 51.1\text{nF}$ ,  $R_1 = R_2 = 3.3\text{k}\Omega$ ,  $R_3 = R_4 = 46.1\text{k}\Omega$ ,  $R_5 = R_6 = 0.3\text{k}\Omega$ ,  $R_7 = 1.20\text{k}\Omega$ ,  $R_8 = 1.48\text{k}\Omega$ ,  $m_0 = -0.511$ ,  $m_1 = -0.835$ . 该电路输出的非周期的  $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$  时间序列如图 3 所示.

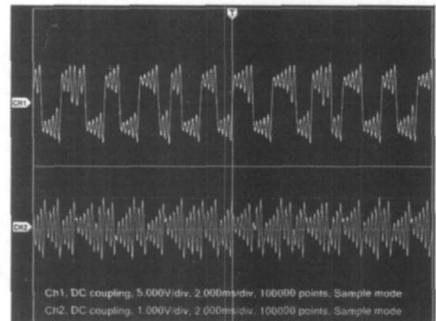
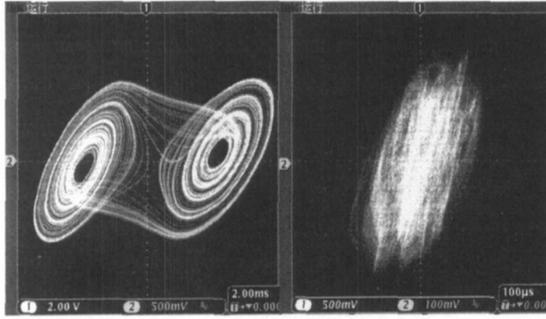


图3  $V_{c1}, V_{c2}$  的时域图

电路产生的双螺旋混沌吸引子可以用  $(V_{c1}, V_{c2})$  相图来表示, 如图 4(a) 所示. 结果通过 Tektronix DPO-3000 示波器观察记录. 为了实现混沌信号的频谱平移, 用 AD633JN 芯片做乘法器, 将  $V_{c1}$  与频率为  $\omega_c$  的正弦波信号相乘. LMF100CCN 芯片以及电阻、电容搭建巴特沃兹滤波器.

水池实验在厦门大学水声部重点实验室的非消声

水池进行. 换能器距离为 1m. 实验中用到的水声换能器带宽在 25kHz~ 35kHz 之间, 其发射响应如图 5 所示. 原始的信号频带为 0~ 8kHz, 因此, 需要将混沌信号的频谱平移到换能器的带宽上, 信号才能在水池中传输. 通过将信号  $V_{c1}$  乘以一个频率为 25kHz 的正弦信号后, 再通过高通滤波可以实现信号的频谱平移. 图 6 显示了经过水池传输后接收端接收到的信号与原始信号的频谱图.



(a) 双螺旋吸引子 (b) 滤波后的吸引子  
图4 滤波前后的混沌吸引子

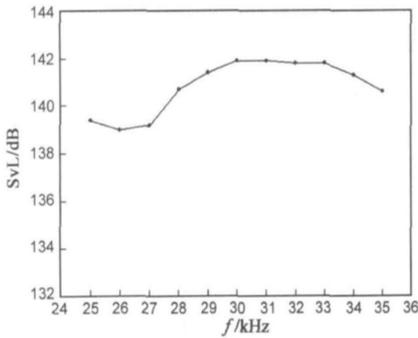


图5 发射电压响应级

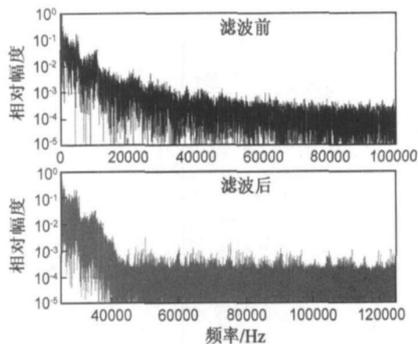


图6 滤波前与水池传输后的信号  $V_{c1}$  的频谱

经典的线性滤波器理论表明, 线性水声信号在经过水下传输后, 如果在接收端能够成功接收. 那么, 接收信号具有与发射信号相似的频谱特性, 其时域特征也与原始发射信号基本相同<sup>[8]</sup>. 然而我们的混沌滤波器研究表明对于混沌信号, 情况则不一样. 从图 6 可以看出, 混沌信号经过水下传输后, 尽管其频谱分布与原始发送信号相似, 但是, 接收信号的混沌吸引子变得更加不规则, 如图 4(b) 所示. 这表明, 经过水下传输, 混沌

信号的时域特征变得更加复杂.

在海洋声学中, 声波在复杂的水下环境传输可能产生复杂的行为. 以往的研究<sup>[9-11]</sup> 也表明, 海洋环境噪声、目标舰船辐射噪声都可以产生混沌行为. 本文的混沌滤波器理论表明, 经过水下信道传输后, 所接收到的信号与原始的混沌信号在动力学特性上可能是不同的. 通过被动声纳技术来探测远程的混沌声信号源以检测和识别目标需要考虑声源和信道的耦合作用.

进一步, 利用非线性动力学分析对接收端信号进行相空间重构后, 我们计算了发送端信号和接收端信号的关联维数  $D_2$ , 结果如图 7 所示.

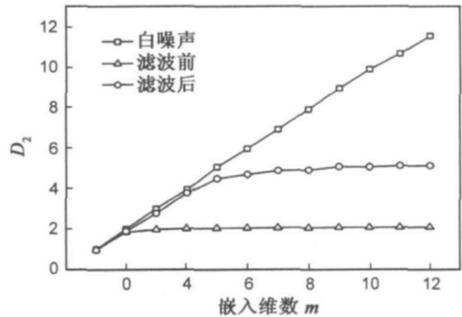


图7 滤波前后的  $D_2$

随着嵌入维  $m$  的增加, 滤波前后信号的  $D_2$  分别收敛到  $2.08 \pm 0.01$  和  $4.13 \pm 0.03$ . 不同于白噪声的不收敛维数, 表明滤波后的信号具有低维的动力学行为. 此外, 图 8 显示了滤波器阶数  $n$  对关联维数  $D_2$  的影响. 可以看出,  $n$  越大,  $D_2$  值越高. 但是, 当  $n$  的值充分大 ( $n > 32$ ) 后,  $D_2$  的值不再变化. 表明了进一步增加滤波器的阶数并不能增加系统的复杂性.

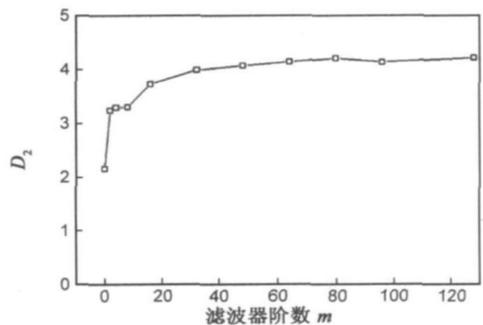


图8 滤波器阶数  $n$  对  $D_2$  的影响

值得说明的是滤波后信号的维数  $D_2$  比原始的蔡氏电路高. 在本实验系统中, 混沌滤波器耦合了水声信道, 因而提高了水声传输系统的复杂性. 混沌信号, 经过这样一个滤波与信道耦合的系统, 滤波后吸引子关联维数比滤波前高, 这一分析同样表明了混沌信号经过水声信道后其自身的非线性动力学特性变得更加复杂.

由于混沌信号固有的高度随机性和宽频特性, 在以往混沌信号作为载波的水声通信中, 能够充分利用

信道的宽频带特性. 因此, 在混沌载波通信中, 这一结果从混沌动力学的角度表明了作为载波的混沌信号非线性动力学特性的变化, 对混沌载波应用于水声通信有着一定的参考价值, 同时为理解混沌系统复杂的滤波行为提供了一个重要的参考工具.

#### 4 结论

本文探讨了混沌滤波器在水声信号处理中的一种新的应用. 混沌电路产生的信号进行频带调制和高通 IIR 滤波后, 由换能器发射并经过水池传输. 接收到的水声信号具有与混沌发射信号相似的频带特性, 表明混沌滤波器实现了混沌信号的频带搬移. 进一步, 运用非线性动力学分析对发送和接收信号进行定量比较. 接收的水声信号具有比发射的混沌信号更为不规则的相空间和更高的分形维数. 混沌滤波器运用于线性的水声信道提高了水声信号的复杂特性. 以前的研究表明, 混沌低通滤波器在监测物质结构的变化<sup>[12]</sup>和检测雷达和声纳的 IIR 回音方面<sup>[13, 14]</sup>有着有用的价值. 通过混沌电路实验, 研究表明了混沌高通滤波器结合了线性滤波器和混沌的特性, 并对理解混沌系统复杂的滤波行为提供了一个参考工具.

#### 参考文献

- [1] 李春庚, 栾秀珍, 王百锁. 自适应小波的构造及其在信号处理中的应用[J]. 电子学报, 2007, 35(1): 4-7.  
LI Chun-geng, LUAN Xi-zhen, WANG Bai-suo. Self-adapted wavelet construction and its application to signal processing [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(1): 4-7. (in Chinese)
- [2] Zhang Y, Jiang JJ, Feroze FA. Wavelet-based denoising for improving nonlinear dynamic analysis of pathological voices [J]. Electronics Letters, 2005, 41(16): 930-931.
- [3] 包浩明, 朱义胜. 基于多层密钥的混沌映射保密通信系统[J]. 电子学报, 2009, 37(6): 1222-1225.  
BAO Hao-ming, ZHU Yi-sheng. A chaotic mapping secure communication system based on hierarchical key [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(6): 1222-1225. (in Chinese)
- [4] Zhang Y, Du GH, Jiang JJ. Synchronizing chaos by impulsive feedback method [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos (IJBC), 2001, 11(8): 2233-2243.
- [5] Tranter W H, Shanmugan K S, Rappaport T S 等著. 肖明波, 杨光松等译. 通信系统仿真原理与无线应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [6] Takens F. Detecting strange attractor in turbulence [J]. Lecture Notes in Mathematics, 1981, 898(2): 361-381.

- [7] Grassberger P, Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors [J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1983, 9(1-2): 189-208.
- [8] Oppenheim A V, Willsky A S, Nawab S H. Signals and Systems (2nd ed)[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1997.
- [9] 章新华, 张晓明, 林良骥. 船舶辐射噪声的混沌现象研究[J]. 声学学报, 1998, 23(2): 134-140.
- [10] Frison T W, et al. Chaos in Ocean Ambient Noise [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1996, 99(3): 1527-1539.
- [11] Yen K. Investigating Chaos in Ocean Acoustics [R/OL]. <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA321391>, 1997.
- [12] Carroll T L. Detecting recursive and nonrecursive filters using chaos [J]. Chaos, 2010, 20(1): 1-9.
- [13] Nichols J M, Todd M D, Seaver M, Trickey S T, Pecora L M, Moniz L. Controlling system dimension: a class of real systems that obey the Kaplan-Yorke conjecture [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003, 100(26): 15299-15303.
- [14] 董华春, 宗成阁, 权太范. 高频雷达海洋回波信号的混沌特性研究[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 25-28.  
DONG Hua-chun, ZONG Cheng-ge, QUAN Tai-fan. Chaotic characteristics in HF radar backscatter from the ocean surface [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(3): 25-28. (in Chinese)

#### 作者简介



李作川 男, 1986年10月出生, 福建漳州人. 2008年本科毕业于厦门大学海洋系, 现于厦门大学海洋系攻读硕士学位, 从事混沌滤波技术以及水声信号处理方面的有关研究.

E-mail: lizuo-chuan@xmu.edu.cn



张宇 男, 1973年生, 厦门大学海洋系教授, 博导, 主要研究领域为水声学, 混沌动力学, 非线性声信号处理等.