

海洋激光雷达系统的噪声相空间重建的研究

卢益民 罗志祥 陈文革 杨宗凯
(华中理工大学电信系, 武汉, 430074)

摘要: 通过对混沌信号以及海洋激光雷达接收信号噪声的相空间分析, 探讨了由时间序列重构相空间时参数选择的影响。重建了确定信号、随机信号、混沌信号和海洋激光雷达接收信号噪声的相空间。经过以上工作, 初步掌握了重构相空间时参数选择的规律, 明确了确定信号、随机信号和混沌信号各自的相空间特性, 并发现海洋激光雷达接收信号噪声与混沌信号有相似的相轨迹。

关键词: 海洋激光雷达 相空间 逻辑斯蒂克吸引子

Phase space analysis of noise for oceanic lidar

Lu Yiming, Luo Zhixiang, Chen Wenge, Yang Zongkai
(Dept. of Electronics and Information, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: First we discuss the effect of the parameter selection on the reconstruction of phase space through the analysis of chaotic signal and the signal received by laser underwater target detection system. Then we analysis the phase space of cosine, random, chaos and experiment signal, and find that the phase space of the experiment signal is similar with chaos phase space, but different from the random phase space.

Key words: oceanic lidar phase space logistic equation

引 言

海洋激光雷达系统利用大功率蓝绿脉冲激光, 从飞机上探测海水深处的目标。从飞机上发射的激光脉冲, 经过大气、大气/海水界面和海水等介质的传播^[1], 击中目标后被反射回来, 经过逆向传播, 其中很小的一部分能量被安装在飞机上的光学系统接收, 再经过光电转换、信号处理来检测目标。该系统的光传输信道是一个十分复杂的复合信道, 散射效应和吸收效应非常严重, 并且信道特性随海水水质和气候条件的变化呈现出巨大的差异性^[2]。另外, 由于海洋激光雷达系统一般工作在量子限状态, 接收信号噪声主要来自海水后向散射包络的散弹噪声^[1], 因此, 接收信号中的噪声是一种非平稳的相干噪声。对于这种特殊噪声中的信号检测, 使用基于计数统计的光电信号检测方法, 很难得到令人满意的效果, 系统的探测性能往往受限于此, 所以必须探索新的检测机理。

混沌理论是近几十年才发展起来的一门交叉学科, 它对传统的思维方式带来了深刻的影响。混沌理论指出^[6]: 一个完全确定的系统, 只要初始值有些微变化, 其结果可能完全不同而表现出一定的随机性, 也就是说, 表面复杂的信号不一定就是噪声, 或者说, 类似噪声的信号不一定就是噪声, 它有可能是一确定系统产生的。混沌理论从更深层次来说明噪声。加拿大 McMaster 大学的 Haykin 领导的研究小组将混沌理论用于微波雷达检测海面微小目标系统, 证明海杂波信号为混沌的, 并提出了一套基于混沌理论检测方法用于试验, 取得了传统方法很

难达到的效果^[4]。

基于以上原因,我们试图利用混沌理论来提高海洋激光雷达系统的检测性能。在没有任何经验知识的情况下,相空间重建是非常直观的工具,它是混沌特性分析的第一步。在这篇文章中,我们分别利用混沌信号(由 Logistic 方程^[3,4]产生)以及海洋激光雷达接收信号噪声进行相空间重建与分析,找出相空间重建时参数的选择规律,最后给出了确定信号、随机信号、混沌信号以及海洋激光雷达信号噪声的相空间图,发现了上述各种信号的不同相空间特性。

一、相空间重建

海洋激光雷达接收信号噪声的典型波形如图 1,其中, N 为数据点数(时间 $T = N * \tau$, τ 为采样间隔), A 为噪声的幅值。针对时间序列的状态空间重建的方法中,最常用的方法是时间延迟法^[5],它基于这样一个概念(Takens 的嵌入定理)^[4]:用时间延迟的状态矢量重建的动态系统在某种意义上等效于原始动态系统。用时延法构造的状态矢量可表示为:

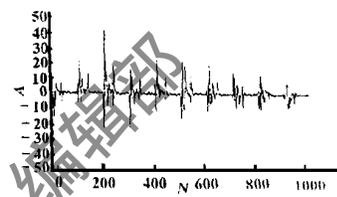


Fig. 1 The noise signal received by oceanic lidar

$$X(t) = (x(t), x(t + \tau), \dots, x(t + (L - 1)\tau)) \quad (1)$$

式中, τ 为时间延迟, L 为嵌入维。参数的选取极为关键,下面我们分别讨论参数 L 和 τ 选取的影响。

1. 参数 L 的选取

嵌入维根据吸引子的相关维确定。因为我们所能观察到的最多只能是三维空间,不失一般性,我们对维数 $L = 2$ 和 3 两种情况进行讨论。

2. 参数 τ 的选取

时间延迟的选取极其关键,若时间延迟选得过大,则可能存在的混沌特性使得 $x(t)$ 与 $x(t + \tau)$ 没有联系;另一方面,时间延迟选得过小,则 $x(t)$ 与 $x(t + \tau)$ 太近而非独立,不足以充当独立的坐标^[5]。我们将通过典型混沌信号(Logistic)与海洋激光雷达接收信号噪声的相空间重建,了解时延选择的规律,为正确重建接收信号噪声的相空间及分析它的混沌特性打好基础。

根据上面时延选取的要求,信号自相关函数的分析(自相关函数的第一个过零点)有利于我们正确选取时延参数。对信号 $x(t)$ 而言,其自相关函数定义为:

$$R(m) = E[x(t) * x(t + m)] \quad (2)$$

为确保自相关函数有一个过零点,我们先求信号的均值 e ,用信号与均值的差作自相关:

$$R_1(m) = E[(x(t) - e) * (x(t + m) - e)] = E[x(t) * x(t + m)] - e^2 = R(m) - e^2 \quad (3)$$

(3) 式与 (2) 式只是有一“直流偏置”。实际工作中通常用下述公式:

$$R(m) = 1/(N - m) * \sum_{n=1}^{N-m} x(n)x(n + m), m = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (4)$$

下面我们分别给出混沌信号与接收信号噪声的自相关函数。

图 2a 表明 Logistic 的自相关函数的第一个过零点在 $N = 2$ 时刻;而接收信号噪声的自相关函数的第一个过零点为 61(图 2b)。下面我们给出 Logistic 信号在延时 $\tau = 2$ 和接收信号噪声在延时 $\tau = 61$ 时的二维、三维相轨迹。

图 3a 和图 3c 是 Logistic 信号的二、三维相空间,它既有一定的规律性,每个轨道周期内的

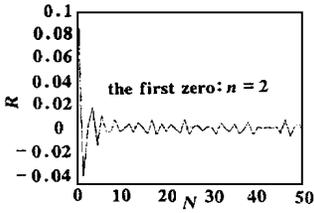


Fig. 2a The autocorrelation function of Logistic

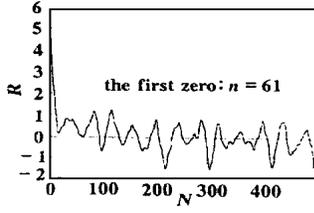


Fig. 2b The autocorrelation function of the received noise

相轨迹形状有相似性; 又表现出一定的随机性, 每个轨道周期内的相轨迹从不完全重复。同时可发现它的相轨迹存在一明显的吸引子; 图 3b 和图 3d 是接收信号噪声的二、三维相空间, 它与图 3a 和图 3c 有一定的相似性

性, 它也是既有一定的规律性, 又表现出一定的随机性, 且存在一明显的吸引域。但是它们之间也有区别, Logistic 信号是计算机产生的, 表现出非常明显的混沌特性, 而接收信号噪声受到观测噪声、量化噪声等影响, 它的相轨迹虽然有一定的规律, 但随机性更强。

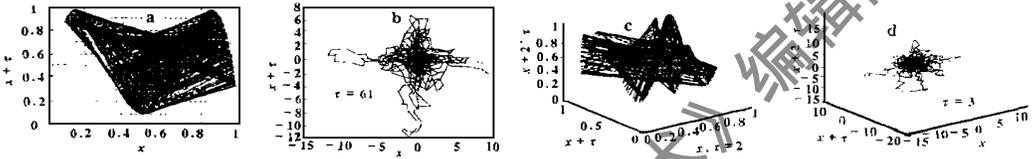


Fig. 3 a~ d- 2-D and 3-D phase space of the Logistic

我们也重建了不同的时间延迟时的信号的相空间, 下面给出时延选择不当时的一组图(图 4)。

从图中可看出, 时延选择极为关键, 对 Logistic 信号而言, 当 τ 为 15 (远大于它的自相关函数的第一个过零点 2)

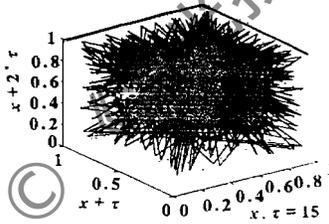


Fig. 4a Phase space of Logistic

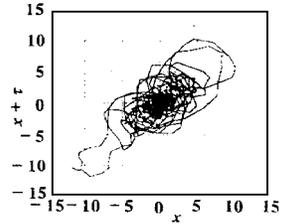


Fig. 4b Phase space of the received noise

相轨迹变化极大, 其规律性已不明显, 相反其随机性增强, 和随机信号的相轨迹较为相似(随机信号的相轨迹见图 5a, b), 从而无法判断它具有混沌特性; 而接收信号噪声的相

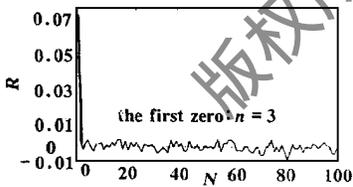


Fig. 5a Autocorrelation function of the received noise

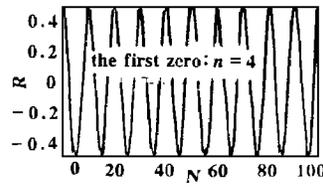


Fig. 5b Autocorrelation function of deterministic signal

轨迹则因 τ 为 3 (过小), 信号前后相关, 轨迹很有规律。因此, 对一个复杂系统, 在重建其相空间时必须正确选择参数, 尤其是时延。

对于完全随机信号和确定信号, 时延选择的影响不

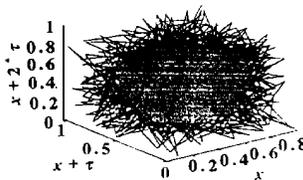


Fig. 6a 3-D phase of the random signal

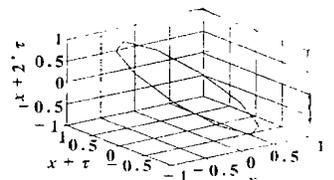


Fig. 6b 3-D phase space of the deterministic signal

大。下面我们给出随机信号和确定信号(余弦信号)的自相关函数及三维相空间。

图 6a 是随机信号的三维相空间,它的相轨迹随机行走,充满整个区间,毫无规律可言,图 6b 是余弦信号的三维相空间,从中可看出它的轨迹非常有规律,表现为一条简单的曲线,循环重复。

二、结 论

根据上面的对比分析,我们可把自相关函数的第一个过零点作为相空间重建时的时延参数,从而为我们正确分析接收信号噪声的混沌特性打下了基础;同时我们还发现接收信号噪声相空间与 Logistic 信号的相空间有一定的相似性,它也是既有一定的规律性,又表现出一定的随机性,且存在一明显的吸引域。但是它们之间也有区别,Logistic 信号是计算机产生的,表现出非常明显的混沌特性,而接收信号噪声受到观测噪声、量化噪声等影响,它的相轨迹虽然有一定的规律,但随机性更强。尽管如此,接收信号噪声的相轨迹与随机信号的相轨迹有明显的差别,表明它不同于随机信号而是相似于混沌信号。这些研究为我们继续探索海洋激光雷达接收信号噪声的混沌特性打下了坚实的基础。

参 考 文 献

- 1 陈文革. 大气/海水光信道特性的研究. 华中理工大学博士学位论文, 1995
- 2 陈文革, 卢益民, 黄铁侠. 电子学报, 1996, 24(3): 112~ 116
- 3 郝柏林. 物理学进展, 1983; 3(3): 329~ 416
- 4 Haykin S, Li X B. Proc IEEE, 1995; 83(1): 94~ 122
- 5 Leung H, Lo T. IEEE J O E, 1993; 18(3): 287~ 295

作者简介: 卢益民, 男, 1945 年 8 月出生。教授。现主要从事图像处理、激光通信及探潜的教学与研究。

收稿日期: 1996-10-22

• 快 讯 •

我国小型化晶体存储取得重要进展

最近, 清华大学精密系现代光学实验室在金国藩院士的主持下, 采用 DPL 小型激光器, 用角度多重记录法成功地实现了单一记录位置 200 多幅图像的快速存储。

晶体体全息存储技术具有存储容量大、传输速率高、寻址速度快等突出特点, 是新一代的存储技术。在国家自然科学基金和国防预研基金的资助下, 该实验室在晶体体全息存储方面进行了两年多的工作, 对晶体参数优化、误码率的改善及信息的编码技术等进行了深入研究, 构建了一套采用 Ar 离子激光作为光源、计算机控制的自动存储系统, 实现了 1000 余幅数字图像的记录与复现。

为摆脱庞大的 Ar 离子激光光源, 实现晶体存储器的小型化, 该实验室的研究人员采用新研制的二极管泵浦 Nd: YAG 倍频 532nm 激光器作为光源, 以 Fe: LiNbO₃ 晶体作为记录材料, 成功地存储并且复现了 200 多幅数字图像, 更大容量的存储已不存在技术问题; 记录速度也大幅度提高。本项实验的成功为存储器的实用化迈出了关键的一步。目前, 小型化晶体存储器的设计与研制正在进行中。

何庆声 巩马理 供稿