

机载海洋激光雷达信号中噪声的混沌行为初探

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: 以机载海洋激光雷达试验数据为依据, 通过接收信号中噪声的相空间重建, 相关维分析及李雅普诺夫指数的计算, 首次初步揭示了其噪声内在的混沌特性, 为提高海洋激光雷达系统的检测性能提供了一条新的途径。

关键词: 海洋激光雷达 相空间 混沌

Phase space reconstruction for noise of the oceanic lidar

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

Abstract: In this paper, we first discuss the effect of parameters choosing on phase space reconstruction through the chaotic signal and the signal received from the oceanic lidar. Then we reconstruct the space of the three types signals of determinate signal (cosine), random signal, chaos and experimental signal. We preliminarily know the regular pattern to choose the parameters and the phase space character of the three types of the signals, and find that the phase space of the experimental signal is similar to chaos', but different from random's.

Key words: oceanic lidar phase space chaos

向性和功率都更加稳定的激光器, 并用计算机处理数据, 利用软件消除误差, 也可望得到更好的效果。

Table The relation between the standard displacement of metal plate and pulse number m_0

displacement (mm ± 0.001 mm)	0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00
pulse number m_0 (± 10)	4873	4768	4673	4581	4452	4378	4279	4176	4082
displacement (mm ± 0.001 mm)	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	
pulse number m_0 (± 10)	3980	3886	3791	3693	3601	3500	3395	3291	

参 考 文 献

- 程时琦, 杨齐民, 张文碧 *et al.* 云南工学院学报, 1992; 8(1): 127~ 130
- 刘振玉. 光电技术. 北京: 北京理工大学出版社, 1990: 14~ 316
- 张志锐, 邹延引. 数字电路设计手册与实用电路. 广州: 华南理工大学出版社, 1989: 156~ 159
- 郝鸿安. 民用电子线路实用手册. 北京: 中国计量出版社, 1989: 60~ 63

* * *

作者简介: 钟丽云, 女, 1968 年 2 月出生。硕士, 副教授。主要从事激光技术、激光光谱和光电微弱信号检测方面的研究工作。

引 言

机载海洋激光雷达利用大功率蓝绿脉冲激光,从飞机上探测海水深处的目标。从飞机上发射的很窄的大功率蓝绿激光脉冲,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最后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],导致系统接收信号的强度和脉宽变化极大。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的检测方法,用之于微波雷达检测海面目标试验,取得了传统方法很难达到的效果^[3]。

海洋激光雷达系统与 Haykin 等人应用的电磁波雷达系统有相似之处,海洋激光雷达接收信号中的噪声是否也具有类似的混沌特性呢?为此,我们将从以下几个方面进行研究:(1)相空间重建,(2)相关维分析,(3)李氏指数的计算。该研究将为探索基于混沌理论的新的检测方法提供依据。

相空间重建

机载海洋激光雷达系统接收信号噪声的典型波形如图 1 所示,其中 N 为数据点数(时间 $T = N \times \Delta t$, Δt 为采样时间间隔), A 为接收信号噪声的幅值。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^[4],它基于这样一个概念(Takens 的嵌入定理)^[3]: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:

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

式中, τ 为时间延迟, L 为嵌入维。嵌入维根据吸引子的相关维确定,但我们所能观察到的最多只能是三维空间,不失一般性,我们取维数 $L = 3$ 。而时间延迟的选取极其关键,若时间延迟选得过大,则可能

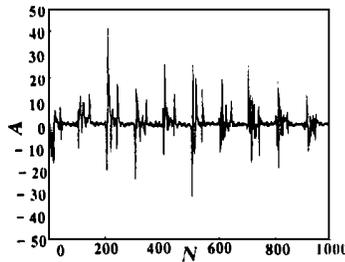


Fig. 1 The waveform of the noise in received signal of oceanic lidar

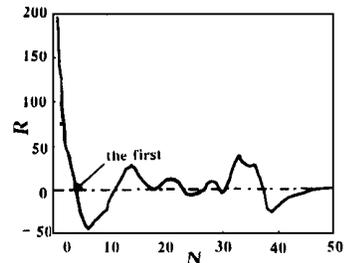


Fig. 2 The autocorrelation function of noise in received signal

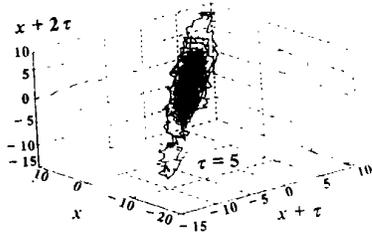


Fig. 3 3 - dimension phase space of the received noise, and $\tau=5$

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。可根据自相关函数的第一个过零点时刻来确定一比较合适的时间延迟^[4]。图 2 是其自相关函数图, 从图中可看出它的第一个过零点在 $N=5$, 故取延时 $\tau=5$ 。

图 3 给出了海洋激光雷达接收信号噪声的相空间图。从图中可看出, 海洋激光雷达接收信号噪声的相轨迹与确定信号和白噪声的相轨迹有明显的差别(白噪声的相轨迹随机行走, 充满整个区间, 毫无规律可言; 确定信号的相轨迹是一条简单曲线, 循环重复, 极有规律。这两种信号的相轨迹可方便地获得, 这里不再附图)。它既有一定的规律性, 每个轨道周期内的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区域。

二、相关维分析

通常可认为: 支持混沌动力学的有效维数是有限分数, 确定系统的维数是有限整数; 对于噪声, 其维数是无限的(即其运动形式对应无限多模)^[6,7]。

吸引子维数有相关维, 盒维数, 信息维等。常用的是相关维, 它的定义^[3,7]如下:

$$d_c = \lim_{r \rightarrow 0} \log C(r) / \log r \quad (2)$$

而

$$C(r) = 1/(N^2) * \sum_{i,j=1, i \neq j}^N H(r - \|x_i - x_j\|) \quad (3)$$

称为互相关。式中, $H(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}$ $\| \cdot \|$ 是任意范数, 常用欧氏范数, x_i 是由(1)式确定的状态矢量, r 是球半径。

计算相关维必须有足够长的时间序列, 因为它的最大值由下式确定^[3]: $d_c \leq 2 \log N$, N 为时间序列长度。只有 N 足够大, 才能使所求相关维的值不致饱和。 N 一般取 10^4 以上。

我们计算海洋激光雷达信号噪声的相关维时, 时间序列长度 N 取 5000(实验条件限制)。我们分别取嵌入维为 3, 4, 5 和 6, 先计算这几种情况下不同距离 r 时的互相关 $C(r)$, 然后在一对数坐标图上画出随 r 变化而变的 $C(r)$ 的曲线, 如图 4。从图中可明显地看出, 对某一嵌入维, 曲线在 r 接近 0 的某一区段内近似为一直线, 在 r 大于 0.5 时, 曲线的上升趋势发生变化, 趋于平坦。同时可看出, 对于不同的嵌入维, 各曲线形状大体相似, 而直线段斜率稍有不同; 当嵌入维为 5 和 6 时, 直线段斜率不再变化, 趋于饱和, 说明海洋激光雷达信号噪声的相关维是有限的。而对于白噪声, 曲线始终保持直线上升趋势^[6], 它的相关维是趋于无穷的。对近似直线区段(r 接近 0), 用最小二乘法进行曲线拟合, 确定其斜率, 即可求得相关维。我们计算的结果为 4.2, 为一分数, 且没有超过最大值 $2 \log 5000 = 7.39$ 。

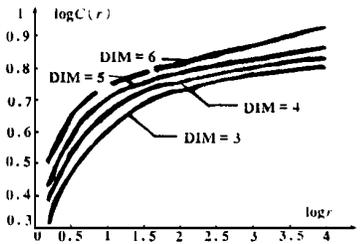


Fig. 4 The portion of the $C(r)$ versus r with different embedding dimension

给定距离 r , 维数测定吸引子的两个点在 r 内的分布, 并给出了从时间序列重建系统所需的最小的自由度^[3] $L = \text{ent}[d_c, 2d_c + 1]$, 我们可在这个范围内选择一合适的整数去重建系统。

三、李雅普诺夫(Lyapunov)指数计算

假设混沌动力系统的流起始于状态空间中某个半径 r 的超椭小球, 该小球的各半轴 r_1, r_2, \dots 为各个流形的方向, 则随时间的演变, 小球的各半轴将会作如下改变:

$$r_i \rightarrow r_i e^{\Lambda_i(x, t)}$$

式中, x 为 t 时刻的状态, $\Lambda_i(x, t)$ 的平均值即李氏指数^[6, 7]

$$\lambda = \frac{1}{t} \int d\rho(x) \Lambda_i(x, t) \tag{4}$$

式中, $\rho(x)$ 为概率测度函数。

λ 反映了系统的轨迹在状态空间的不同方向上被压缩或伸展的性质: $\lambda > 0$ 相应方向的平均效果将指数伸展, 对应混沌系统, $\lambda < 0$ 则压缩, 对应稳定系统, $\lambda = 0$ 则保持, 对应周期系统^[6]。

对于时间序列, 可采用 Wolf 提出的近似计算方法^[3, 4, 6]。

$$\lambda = 1/K * \sum_{k=1}^K \log 2[L'(t_k)/L(t_{k-1})] \tag{5}$$

式中, K 是下述过程中的替换次数, $L'(t_k)$ 是演化后两轨迹的距离, $L(t_{k-1})$ 是两轨迹每次替换出发时的距离, λ 是李氏指数。

具体实现步骤是: 首先用时间延迟法, 由单一时间序列得到 m 维空间中的数据状态 $\{X(t_0), X(t_1), \dots, X(t_n), \dots\}$, 然后再从 $X(t_1)$ 以后的数据中选择一于 $X(t_0)$ 较为靠近的数据 $X(t_m)$, 记为 $Y(t_0)$, 并且把 $\{Y(t_0), Y(t_1), \dots\} = \{X(t_m), X(t_{m+1}), \dots\}$ 看成与轨迹 $\{X(t_0), X(t_1), \dots, X(t_n), \dots\}$ 相邻的另一条轨迹。令 $L(t_0) = |X(t_0) - Y(t_0)|$, $L'(t_1) = |X(t_1) - Y(t_1)|, \dots$ 直到 $L(t_k)$ 足够大。接着再从后边的状态中找一个与 $X(t_k)$ 较为靠近的状态 $X(t_1)$ 。为了尽量使这种替换近似保向, 必须使 $L(t_k)$ 与 $L'(t_k)$ 之间的夹角 θ_k 尽可能地小, 如图 5 所示, 然后继续上述过程。

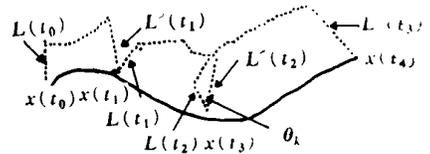


Fig. 5 A schematic representation for estimating the largest Lyapunov exponent from a time series

Table Lyapunov exponents with varied parameters

order	dimension	evolving time	time delay	Lyapunov exponment
1	3	360	300	0.013
2	4	300	345	0.017
3	5	340	285	0.019
4	6	380	300	0.020
5	7	420	315	0.016
6	8	300	380	0.018

因为我们只要证明至少有一个正的李氏指数, 故只须求李氏指数谱中最大的一个(在上述计算过程中使替换保向^[3, 4])。在上述计算过程中, 李氏指数在迭代次数 K 较小时变化较大, 当 K 在大于一定值后, 李氏指数趋于饱和, 这时的值才是可信的。

附表给出了各个参数变化时的李氏指数, 其中最大及最小标度分别为 8 和 2(单位是轨道

周期)。从表中可看出, 尽管有些情况下李氏指数为负值, 但在多数情况下(维数为 4~ 7, 时延为 280~ 460 个数据点, 演化时间为 300~ 560 个数据点时) 李氏指数为正值。

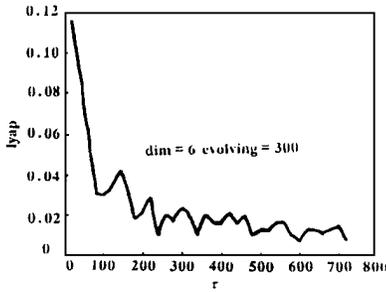


Fig. 6 The relationship between Lyapunov exponents and the time delay

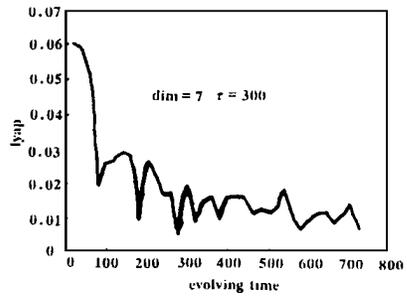


Fig. 7 The relationship between Lyapunov exponents and the evolving time

计算中, 参数的选择极为关键, 如选择不当, 其结果有可能差异较大。我们大范围地改变参数的值(以文献[5] 的经验值为参考依据), 组合各种参数变化的情况, 计算了李氏指数。图 6 与图 7 分别给出了李氏指数随演化时间和时延变化而变化的曲线。从图 6 与图 7 中可看出, 在时延为 300、演化时间大于 250 和演化时间为 300、时延大于 200 的区段, 李氏指数趋于饱和, 在某一值附近上下摆动, 总体趋势稳定。两种情况下的李氏指数平均值分别为 0. 017 和 0. 015。这样, 我们可尽量消除参数选择的影响, 提高李氏指数计算结果的可信度。

四、结 论 与 展 望

我们对机载海洋激光雷达接收信号中的噪声的混沌行为进行了初步的探索。相空间重建显示它有一明显的吸引子存在; 相关维分析表明吸引子的维数是一个有限的分数; 李氏指数计算的结果证明至少有一个正的李氏指数, 这些研究结论初步说明, 机载海洋激光雷达接收信号中的噪声具有一定的混沌行为。该研究将为探索基于混沌理论的新的检测方法提供依据, 我们正在进行这一方面的研究。

参 考 文 献

- 1 陈文革. 大气/海水光散射信道特性的研究. 华中理工大学博士论文, 1995
- 2 陈文革, 卢益民, 黄铁侠. 电子学报, 1996; 24(3): 112~ 116
- 3 Haykin S, Li X. Proc IEEE, 1995; 83(1): 94~ 122
- 4 Leung H, Lo T. IEEE J Oceanic Engng, 1993; 18(3): 287~ 295
- 5 Wolf A, Swift B, Swinney H L *et al.* Physica, 1985; 16D(4): 285~ 317
- 6 裴留庆, 顾 勇. 电子学报, 1991; 19(6): 80~ 90
- 7 郝柏村. 物理学进展, 1983; 3(3): 329~ 416

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、激光通信及深潜的教学与研究。
罗志祥, 男, 1972 年 1 月出生。硕士。主要从事数字信号处理及混沌理论的研究和应用。
陈文革, 男, 1966 年 6 月出生。博士后。现主要从事大气海水光信道及数字信号处理的研究。