

# 高频雷达海洋回波信号的混沌特性研究

董华春,宗成阁,权太范

(哈尔滨工业大学电子工程技术研究所,哈尔滨 150001)

**摘 要:** 高频波段海洋回波信号表现了非线性和频谱时变性. 传统的谱分析方法,无法反映回波信号在时间上的演化规律. 本文应用混沌动力学方法分析和计算了高频波段海洋回波信号的混沌特性参数,并通过高频地波雷达实测数据的验证,首次得到了高频无线电波海洋回波信号呈现混沌特性的结论. 这一结论对高频雷达目标探测和海态遥感研究都具有重要意义.

**关键词:** HF 雷达; 海洋回波; 混沌; 分形

**中图分类号:** TN958

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2000) 03-0025-04

## Chaotic Characteristics in HF Radar Backscatter from the Ocean Surface

DONG Hua-chun, ZONG Cheng-ge, QUAN Tai-fan

(Research Institute of Electronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** HF radar backscatter from the ocean surface shows nonlinearities and time variation of its spectrum. However, the spectrum analysis method cannot reflect the evolution of the HF backscatter in time domain. In this paper, the chaotic dynamic approach is used to analyze the chaotic characteristics of the HF backscatter, and based on the observed data, it is concluded for the first time that the HF radar backscatter from the ocean surface possesses some nature of chaotic process. This conclusion will be of much significance in the target detection and ocean sensing of HF radar.

**Key words:** HF radar; sea backscatter; chaos; fractals

### 1 引言

八十年代以来, HF 雷达海上超视距目标探测和海态遥感方面的研究, 受到世界各国的高度重视. 目前 HF 雷达海上目标探测和海态遥感的基本原理是基于高频波段电波与海洋表面作用的 Bragg 谐振理论和一阶、二阶散射理论. 现有的一阶、二阶散射理论是从频谱密度角度分析海浪与无线电波的作用规律<sup>[1]</sup>. 它存在着以下不足: 第一、无法处理海洋的高阶非线性运动分量; 第二、这种时间上的平均处理, 不足以反映表面波在时间上的演化过程. 因此它不能全面的反映海洋表面运动的复杂性. 如果要更全面的反映无线电波与海浪的作用规律, 必须从新角度在时域上考察信号的演化规律. 近年来, 混沌理论的发展为我们分析复杂系统的演化提供了新的理论和方法. S. Haykin 等人首先研究了 X 波段海杂波的混沌性质, 并采用混沌动力学方法, 构造了新型检测器<sup>[2]</sup>. 然而, 对于高频波段海洋回波混沌特性的研究目前仍处于空白. 为此, 本文从动力学角度分析和计算了高频雷达海洋回波信号的演化特征和混沌特性基本参数, 应用实测数据验证了高频雷达海洋回波信号的混沌特性.

本文的工作为进一步开展对高频波段海洋回波混沌行为

的理论研究奠定了基础, 同时对 HF 雷达的应用研究也具有重要意义. 一方面在海态遥感领域可以采用混沌动力学方法从无序的海洋回波信号中提取有序信息, 从而得到更准确的海洋信息. 另一方面, 在海面目标探测领域, 可以建立更准确的海洋回波信号数学模型, 实现一阶、二阶谱的对消, 从而可以探测淹没在一、二阶谱下的弱目标信号.

### 2 基于混沌理论的高频波段海洋表面回波行为的探讨

混沌理论认为自然界中许多貌似随机的复杂现象, 往往存在着内在规律性, 复杂现象本质上是由于大系统中多个变量的非线性交互作用而产生的. 高频无线电波与海浪作用后, 回波信号也同样表现了随机性和确定性. 我们可以假设这种复杂行为是由于海洋多个动力变量非线性交互作用的结果, 也可以看作是混沌现象. 然而, 要想在理论上严格证明高频雷达海洋回波信号是混沌过程, 至少在现阶段是十分困难的事. 本文从海洋波动和分形表面特征两方面的定性分析入手, 试验建立回波信号表现为混沌行为的理论基础. 首先, 信号的混沌特性来自于海洋波动的作用. P. J. Olver<sup>[3]</sup>等认为海

洋表面波存在两种主要的成分,一种是由周期动力产生的长波,形成表面波的相干分量;另一种是由风力产生的短重力波,形成表面波的混沌分量。事实上,海洋表面波含有大量的非线性结构,传统的傅立叶分析不足以分析这种非线性。有对观测数据的研究结果表明海洋表面波确实表现了一定的混沌特性<sup>[4]</sup>。所以,可以认为海洋的这种混沌波动行为与高频波段电磁波作用后所形成的高频雷达回波信号也表现为混沌过程。其次,第二个原因是因为海洋表面呈现分形特征。近年来,在粗糙表面建模领域,人们提出的分形表面模型非常符合海洋表面的自然特征。从 Pierson-Moskowitz 波高谱中可以看到,当频率大于峰值频率时谱结构表现指数规律,即:  $P_{PM}(f) \propto f^{-q}$ , 其中指数  $q > 0$  也是海洋表面分维特征的一种度量<sup>[5]</sup>。因此可以建立海洋表面分形模型:

$$(x, y, t) = \sum_{m, n, l=1}^N \sum_{j, k, s=1}^{(D-1)^{j+k+s}} P(m, n, l) \exp\{ia(mb^jx + nc^k y) - wld^s t\} \quad (1)$$

其中:  $x, y$  为平面坐标,  $t$  为时间;  $a = 2/L$ ,  $w = 2/T$ ;  $L$  和  $T$  是海洋表面的空间和时间周期。  $1 < D < 2$  为一维表面分维数,  $b, c, d > 1$  为常数。  $P(m, n, l)$  是相对于固定  $m, n, l$  频率表面波的波高。这种分形模型使得表面波高看起来具有复杂的随机特征。那么,波高谱为:

$$S(p, q, ) = \iiint \exp(ip_x + iq_y - i) (x_1, y_1, t_1) (x_2, y_2, t_2) dx_1 dy_1 dt_1 dx_2 dy_2 dt_2 \quad (2)$$

我们知道,一阶谱和二阶谱的幅值都取决于波高谱的空间积分,也就是说海洋表面的分形特征及随机性最后可反映到一阶谱、二阶谱幅值的变化上。所以,回波中任一距离门的多普勒时域信号包含了海洋表面演化的信息,有理由认为呈现混沌特征。

另一方面,对于分形表面形状,雷达入射角很小的差别将导致雷达后向散射回波很大的变化,也就是说,雷达散射回波表现了对初值的敏感依赖性。这也从另一个侧面说明了雷达海面散射回波会表现分形特征或混沌特征。

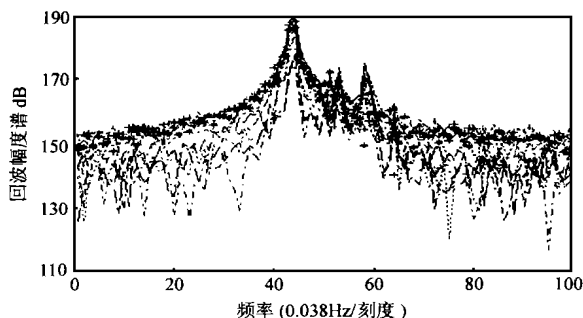


图1 高频雷达海洋回波多谱勒频谱图  
(每条曲线代表连续的不同时间段内的谱线)

还有一点需要说明的是,由图1中回波信号的多普勒谱可知二阶谱无论谱结构还是谱的幅值随时间都有较大的改变,时变性非常明显。与一阶谱频率固定不同,二阶谱是由不同波长,不同方向和不同速度的海浪与无线电波作用后形成的。在海浪较大时,海洋的非线性作用突出,此时二阶谱模型

并不能真实反映回波情况。即使采用实测波高谱数据,仿真多普勒谱与实测多普勒谱最多也可相差 10 ~ 20dB 之多。这说明,传统的无线电波与海洋作用的二阶频域机制难以处理二阶作用的时变性和非线性。因此,应该从时域分析回波信号的动力特征,进而更好地把握回波信号的演化机制。

### 3 混沌系统检验

对混沌系统的检验往往只能从分析系统的混沌特性入手。本文采用 S. Haykin<sup>[2]</sup>的标准,从下面三个方面来检验混沌特性:

#### (1) 正的最大 Lyapunov 指数

混沌动力系统中 Lyapunov 指数有明确的物理意义。它反映了系统轨线在状态空间不同方向上被压缩或伸展的性质。若系统至少有一个 Lyapunov 指数为正,则说明它具有对初值的敏感依赖性,这是混沌系统的最本质的特性。

#### (2) 分维数

混沌吸引子在相空间内收敛到有限的区域,具有分维特性。本文采用常用的 GP 算法计算关联维数作为吸引子的维数。

#### (3) 局部可预测性

因混沌是由确定性动力系统产生的,所以它具有短期可预测性;又因为相空间内任意接近的两条轨道将以指数速度发散,所以它又是长期不可预测的。

然而,在实际情况下,对一个系统的研究往往只能限制在对一两个变量的观测上,因此,这就出现了从观测数据重构整个系统的逆问题。本文采用时间延迟法重构了吸引子的相空间,重构方法如下:

若有某一距离门的时域数据序列  $\{x_i\}$ ,

则取重构向量  $X_1 = (x_1, x_{1+t}, \dots, x_{1+(d-1)*t})^T$ ,  $X_2 = (x_2, x_{2+t}, \dots, x_{2+(d-1)*t})^T, \dots, X_N = (x_N, x_{N+t}, \dots, x_{N+(d-1)*t})^T$  构成重构相空间内的轨迹。其中,  $t$  为延迟时间,  $d$  为相空间嵌入维数。用时延方法重构混沌吸引子的关键是嵌入维数和时间延迟的确定。这里嵌入维数通过计算关联维数来确定,时间延迟的选择通过交互信息曲线的第一个极小点来确定。

### 4 实验数据分析

实验数据来源于哈尔滨工业大学高频地波雷达站。几年来,实验站录取了大量的时域数据。作者采用这些数据进行了大量的计算。本文给出数据的录取时间为 1997 年 9 月 1 日 15:50 ~ 16:02, 雷达载频为 7.14MHz, 线性调频周期为 0.263 秒。

雷达信号采用的是线性调频连续波信号体制,每经过一个调频周期对回波信号采样数据做一次距离处理;每经过一个积累周期,对每个距离门的数据再做一次距离处理;每经过一个积累周期,对每个距离门的数据再做一次速度处理。因为要考察的是海洋回波信号随时间的演化规律,所以只需取某个距离门多谱勒信号的时域采样即可。

混沌检验的实验步骤如图 2 所示。下面分别给出处理过

程和结果.

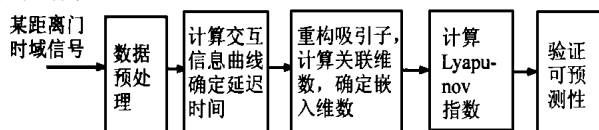


图2 高频海洋回波信号数据混沌特性验证实验框图

#### 4.1 数据预处理

高频雷达工作的波段内, 信号环境复杂, 海杂波背景中包含许多干扰和噪声. 所以在计算混沌特性参数之前, 必须对数据进行预处理. 首先, 仔细观察频谱特性, 剔除掉其中的干扰; 然后, 将数据通过低通滤波器, 滤除高频噪声 (因为海杂波主要集中在低频段); 最后, 采用合适的动力学消除噪声方法, 消除随机噪声的作用. 第三步也就是混沌去噪问题是关键. 这也是许多混沌信号处理研究人员所关注的问题. 当混沌信号和噪声都是宽带时, 无法通过线性滤波的方法滤除噪声. 这里采用主元分析方法消除噪声, 方法如下.

设矩阵  $X = [X_1, \dots, X_N]$  为重构吸引子的轨迹矩阵. 则  $X$  的协方差矩阵  $\Sigma = X^T X$ , 则有  $c_i = \frac{1}{\lambda_i} c_i$ , 其中  $\lambda_i$  为  $\Sigma$  的特征值,  $c_i$  为  $\Sigma$  的特征向量. 将  $\lambda_i$  从大到小排列有:  $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_d$ .  $\{c_i\}$  构成一组标准正交基. 我们取较大的特征值对应的特征向量. 比如  $\lambda_1, \dots, \lambda_m$  对应的特征向量矩阵:  $C = [c_1, \dots, c_m]$ . 取信号  $x$  在这几个特征向量上的投影,  $Y = Xc$ , 则所得到的新轨迹向量  $y_1, \dots, y_N$  信噪比增大, 达到去噪效果.

#### 4.2 吸引子维数计算

把实测回波数据进行去噪处理后, 计算数据的交互信息曲线, 结果如图3所示. 交互信息第一个最小点的延迟时间为2, 因此取重构延迟时间为2, 重构系统向量, 计算关联维数.

根据关联维数随嵌入维数的变化的特性, 可以来区分白

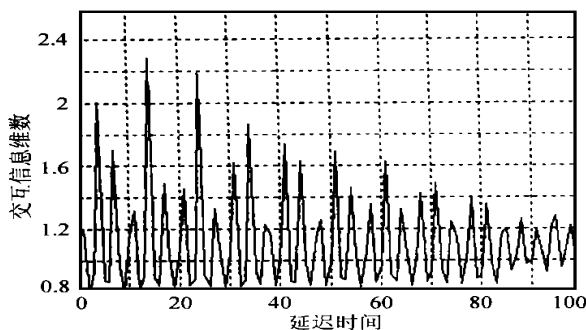


图3 高频雷达海洋回波交互信息曲线

噪声和混沌. 混沌吸引子的关联维数随嵌入维数的增加而收敛到一固定值; 而白噪声的关联维数则无收敛性. 我们把关联维数的收敛值取为重构吸引子的关联维数, 由此关联维数可确定嵌入维数. 为保证重构吸引子与原吸引子保持微分同胚, 一般要求嵌入维数  $d \geq 2D_2 + 1$ .

本文中采用 P. Grassberger 的快速算法, 实现了关联维数的快速计算. 计算结果如图4所示. 图4(a) 是不同嵌入维数下关联积分对数曲线图. 图4(b) 为去噪后高频波段海洋回波关联维数-嵌入维数曲线图. 关联维数表现了收敛性, 收敛值大约为10.12. 因此, 取嵌入维数为21 重构相空间.

#### 4.3 Lyapunov 指数的计算

考虑到回波信号中接近正弦的信号占主要成分, 所以可以假设切空间内小向量的演化接近线性. 又因为信号含有噪声污染, 因此采用 Jacobian 方法<sup>[7]</sup> 计算海杂波的 Lyapunov 指数是合理的. 计算结果表现对参数很敏感, 但最大 Lyapunov 指数大于0. 平均大约为0.015.

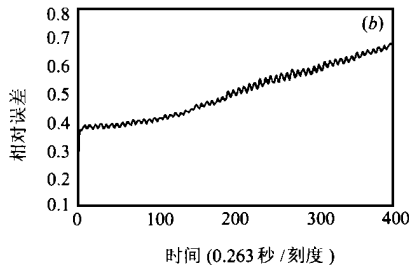
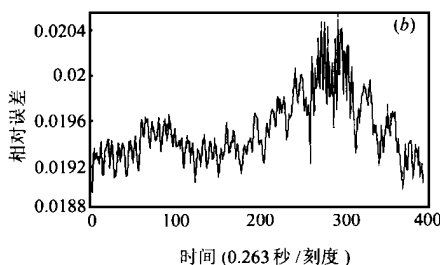
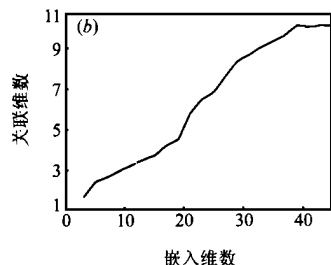
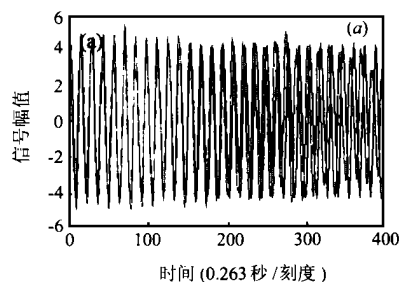
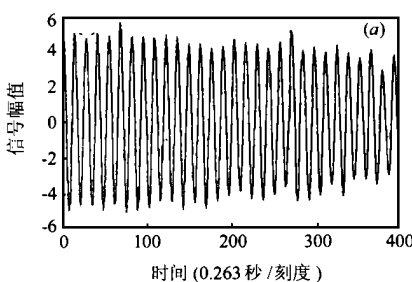
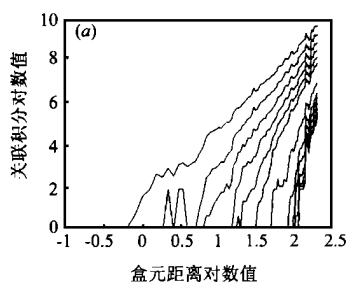


图4 (a) 高频波段海洋回波数据关联积分对数曲线图; (b) 去噪后高频波段海洋回波关联维数-嵌入维数图

图5 (a) 30公里处海洋回波时域信号与一步预测信号; (b) 一步预测信号误差

图6 (a) 30公里处海洋回波时域信号与迭代预测信号; (b) 迭代预测信号误差

#### 4.4 可预测性

考虑到可预测性的验证不需要很高的精度,因此采用简单的局部预测法.在预测过程中,训练向量取 2000 个,预测向量为 400 个.同时,还计算了误差值,误差计算公式为  $e(k) = |p(k) - v(k)| / |v(k)|$ . 其中,  $p(k)$  为预测值,  $v(k)$  为真实值. 30 公里的距离门数据的预测结果如图 5(a) 所示,误差信号如图 5(b) 所示.一步预测的精度非常高,说明高频回波信号有很好的短期可预测性.图 6(a) 为 30 公里处时域信号和迭代预测信号的比较,图 6(b) 为相应的误差信号.可以看到,长时间的预测误差越来越大,混沌信号短期可预测而长期不可预测的特点.

从以上三个方面的检验结果来看,高频波段海洋回波确实表现了一定的混沌特性,我们完全可以利用混沌动力学方法分析高频波段无线电波与海浪的作用机制,建立高频雷达海洋回波的数学模型,并进一步开展高频波段海洋回波混沌信号处理的研究.

#### 5 结论

本文首先从海洋波动和分形表面两个方面定性的分析了高频波段海洋回波信号发生混沌行为的可能性,并采用实际数据计算了回波信号的混沌特性参数,证明了海洋回波信号具有有限分维数,正的 Lyapunov 指数及短期可预测和长期不可预测的特点,从而得出了高频雷达海洋回波信号呈现混沌特性的结论.

最后需要强调的是,海洋的混沌运动与高频波段无线电波的作用机制的理论研究是有待探讨的课题,这需要有关海洋物理学研究人员的合作.

#### 参考文献

- [1] 周志鑫. 高频地波雷达海洋信息提取, 哈尔滨工业大学博士论文, 1997
- [2] S. Haykin, Detection of signals in chaos. Proceeding of the IEEE, 1995, 83(1): 94 ~ 122
- [3] P. J. Olver and D. H. Sattinger. Solution in Physics, Mathematics, and Nonlinear Optics. New York: Springer-Verlag, 1990
- [4] J. Chen. The use of fractals for modeling EM waves scattering from rough sea surface. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 34(4): 966 ~ 972
- [5] A. R. Osborne. Nonlinear Fourier structure of complex surface wave trains: A search for integrable and chaotic effects in the dynamics of ocean waves. Office of Naval Research Report, Contract No. N00014-92-J-1330, 1995
- [6] E. J. Kostelich and T. Schreiber. Noise reduction in chaotic time series data: A survey of common methods. Phys. Rev. E, 1993, 48: 1752 ~ 1783
- [7] H. F. von Bremen. An efficient QR based method for the computation of Lyapunov exponents, Phys. D, 1997, 101: 1 ~ 16



董华春 1974 年出生, 助教, 1996 年开始攻读博士学位. 研究方向有混沌信号处理, 混沌神经网络, 高频雷达数据处理等.

宗成阁 (见本期第 8 页)



权太范 1949 年出生, 教授, 哈尔滨工业大学电子工程研究所副所长, 博士生导师. 十几年来一直从事高频雷达研究, 曾获得国家科技进步一等奖, 航天部科技进步一等奖. 研究方向有雷达信号与数据处理、多站数据融合、神经网络——模糊推理, 高频雷达海态遥感等.

(上接第 60 页)

#### 参考文献

- [1] K. K. Mei, Rafacl Pous and Zhaoqing Chen. Measured Equation of Invariance: A New Concept in Field Computations. IEEE Trans on AP. 1990, 42(3): 320 ~ 327
- [2] 洪伟, 朱震海, Wagen W. M. Dai. 一种提取多层介质多导体互连线电磁参数的快速算法: 有限差分-不变性测试方程法. 电子学报, 1997, 25(9): 37 ~ 42
- [3] 马西奎. 电磁场理论及应用, 西安: 西安交通大学出版社, 2000
- [4] Wei Hong, Yao Wu Liu, Kenneth K. Mei. Application of the measured equation of invariance to solve scattering problems involving a penetrable medium. Radio Science, 1994, 29(4)
- [5] 钱伟长. 格林函数和变分法在电磁场和电磁波计算中的应用. 上海: 上海科学技术出版社, 1989
- [6] 符果行. 电磁场中的格林函数法. 北京: 高等教育出版社, 1993
- [7] J. D. Jackson. 朱培豫译. 经典电动力学, 上册. 北京: 人民教育出版社, 1978
- [8] 复旦大学数学系主编. 数学物理方程(第二版). 上海: 上海科学技术出版社, 1978
- [9] 文舸一. 测试不变方程法及其应用. 电子学报, 1995, 23(3): 73 ~ 77
- [10] Jovan O. Jevtic, Robert Lee. A Theoretical and Numerical Analysis of Measured Equation of Invariance. IEEE Trans on AP. 1994, 42(8): 1097 ~ 1105
- [11] 赵阳, 王蕴仪. 超大规模集成电路互连算法研究. 中国科学(E 辑). 1998, 28(2): 125 ~ 129
- [12] Cao Wei, Roger F. Harrington, Joseph R. Mautz, et al. Multiconductor Transmission Lines in Multilayer Dielectric Media. IEEE Trans on MTT. 1984, 32(4): 439 ~ 450