

# 海杂波的混沌动态特性

CHAOTIC DYNAMICS OF SEA CLUTTER

(加拿大) Simon Haykin  
Sadasivan Puthusserypady

祝明波 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

---

海杂波的混沌动态特性  
CHAOTIC DYNAMICS  
OF SEA CLUTTER

---

(加拿大) Simon Haykin  
Sadasivan Puthusserypady  
祝明波 译

国防工业出版社

·北京·

## 译者前言

海杂波,即来自海洋表面的雷达反射回波,对海洋背景中舰船等目标的探测性能具有十分重要的影响。

为了深入揭示海杂波的特性,长期以来国际雷达界对海杂波的数学模型进行了广泛的理论和实验研究。由于其看似随机的波形,习惯上海杂波常被视为某一随机过程,如经典的对数正态分布、Weibull分布、K分布和复合K分布等。遗憾的是,这些模型在实际应用中都有其特定的局限性。因此迄今为止,对海杂波特性的研究及应用尚不尽人意。

《海杂波的混沌动态特性》,原著名为 *Chaotic Dynamics of Sea Clutter*, 是国际上第一部采用混沌动力学的有关成果来研究海面电磁反射特性的专著,由加拿大 McMaster 大学的知名学者 Simon Haykin 与 Sadasivan Puthusserypady 合著,并由国际著名学术出版公司 John Wiley & Sons, Inc. 于 1999 年出版。该书所涉及的研究内容对于今后开展海杂波特性研究将具有开创性的深远影响。

本书内容系统完整,既涉及混沌动力学方面的基本概念和最新理论研究成果,又包含了对于大量外场实验数据和计算机仿真数据的分析处理,从理论和实验两个方面充分论证并验证了海杂波的混沌动态特性。此外,书中还给出了用于证明一个时间序列是否混沌的严格过程的基本做法,这样一来,书中给出的关于海杂波的混沌动态特性的实验结果就可以被看作一种范例分析。

目前,国内尚无此类采用混沌理论研究海杂波特性的专著和

译著出版,因此衷心希望本书的出版能及时填补这一空白,进而大大推动国内采用混沌等先进数学工具研究海杂波建模及海杂波背景中雷达目标探测等学科领域的发展。

本书可供雷达专业以及研究海杂波特性的工程技术人员用作参考,也可供研究实验时间序列混沌本质的研究人员参考。

本书的出版得到了译者所在单位——海军航空工程学院的资助,本书在翻译过程中也得到了单位同事们的关心和支持,在编辑出版阶段更是得到了国防工业出版社的帮助,没有大家的支持与帮助,本书的出版是不可想象的,在此一并表示衷心感谢。

由于译者水平有限,书中难免会又疏漏和不妥之处,恳求广大读者批评指正。

祝明波

2007年1月

## 前 言

来自海洋表面的雷达反射回波,通常被称为海杂波,习惯上常被视为某一随机过程的样本函数,这在很大程度上并非因为海杂波的内在特性如此,而是由于其看似随机的波形。1997年12月份的CHAOS期刊(美国物理学会出版)发表了一篇由本书的两位作者合写的题为“海杂波的混沌动态特性”的文章。在该文中,我们给出了详细的实验结果,这些结果首次以最令人信服的方式表明海杂波确实是混沌的。本书即为该论文的扩充。

本书第一作者对于海杂波的混沌动态特性的兴趣可以追溯到20世纪80年代后期。尤其是, Henry Leung 还在其指导下完成了博士论文。在论文中, Henry 通过以下两项工作断言了海杂波的混沌动态特性: (1) 证明了海杂波的相关维数为分数, (2) 给出了关于利用径向基函数(RBF)网络对海杂波进行动态重构的初步结果。这些早期结果鼓舞了第一作者,使其在整个20世纪90年代更深入地去探索海杂波的混沌动态特性,并最终导致了本书的合著出版。

本书可供雷达专业以及研究海杂波特性的工程技术人员参考。也可作为研究实验时间序列混沌本质的研究人员的参考书。书中给出了用于证明一个时间序列是否混沌的严格过程的基本做法。这样一来,这里给出的关于海杂波的混沌动态特性的实验结果就可以被看作是一种范例分析。本书还包含了有关混沌理论的一个概述,以便使其在内容上基本独立。

作者感谢加拿大自然科学与工程研究委员会(NSERC)、渥太华国防研究中心(DREO)和运输发展中心(TDC)提供的经费支

持;感谢同事 Vytas Kezys 和 Brian Currie 在收集用于实验研究的雷达数据的过程中给予的巨大帮助;感谢 California 大学(位于 San Diego)的 Henry D. I. Abarbanel, DREO(位于 Ontario)的 Tasos Drosopoulos, Sicom(位于 Ontario)的 Tim Nohara 及 McMaster 大学的 Brian Currie 和 Vytas Kezys,他们对本书提出了许多宝贵的建议。同时感谢 McMaster 大学 Thode 图书馆的 Brigitte Maier 在查找参考资料时给予的帮助。以及在本书的诸多计算中所使用的软件工具 RRCHAOS 的开发者荷兰 Delft 大学和 cspX 的开发者加利福尼亚 Del Mar 的应用混沌小组。

Simon Haykin  
Sadasivan Puthusserypady  
Hamilton, Ontario  
1999 年 6 月

# 目 录

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| <b>第 1 章 概述</b> .....            | 1  |
| 1.1 引言 .....                     | 1  |
| 1.2 本书的目的 .....                  | 4  |
| <b>第 2 章 海杂波</b> .....           | 6  |
| 2.1 引言 .....                     | 6  |
| 2.2 低入射余角下的海杂波 .....             | 8  |
| 2.3 复合 $K$ 分布 .....              | 9  |
| <b>第 3 章 雷达和数据库</b> .....        | 12 |
| 3.1 引言.....                      | 12 |
| 3.2 IPIX 雷达 .....                | 12 |
| 3.3 外场实验.....                    | 16 |
| <b>第 4 章 实际时间序列的混沌动态特性</b> ..... | 21 |
| 4.1 引言.....                      | 21 |
| 4.2 基本定义.....                    | 24 |
| 4.3 实验时间序列混沌动态特性的评估准则.....       | 40 |
| <b>第 5 章 雷达数据的预处理</b> .....      | 42 |
| 5.1 引言.....                      | 42 |
| 5.2 幅度和相位校正(I-Q 校准) .....        | 42 |
| 5.3 滤波.....                      | 46 |
| 5.3.1 三点平滑.....                  | 47 |
| 5.3.2 FIR 滤波 .....               | 48 |
| 5.4 对信号预处理的结果.....               | 51 |
| 5.5 对滤波数据连续性和可微性的检验.....         | 52 |

|            |                  |           |
|------------|------------------|-----------|
| 5.6        | 连续性              | 53        |
| 5.6.1      | 定义               | 53        |
| 5.6.2      | 连续性的检验           | 54        |
| 5.7        | 可微性              | 55        |
| 5.7.1      | 定义               | 55        |
| 5.7.2      | 可微性的检验           | 56        |
| 5.8        | 连续性和可微性检验结果      | 58        |
| <b>第6章</b> | <b>平稳性和非线性检验</b> | <b>60</b> |
| 6.1        | 引言               | 60        |
| 6.2        | 平稳性检验            | 60        |
| 6.3        | 非线性检验            | 64        |
| 6.3.1      | WSF方法            | 64        |
| 6.3.2      | SIPD方法           | 65        |
| 6.3.3      | SCD方法            | 65        |
| 6.4        | 非线性检验的结果         | 66        |
| <b>第7章</b> | <b>混沌过程简介</b>    | <b>71</b> |
| 7.1        | 引言               | 71        |
| 7.2        | 对初始条件的敏感依赖性      | 72        |
| 7.3        | 非线性动态系统          | 78        |
| 7.4        | 什么是相空间           | 80        |
| 7.5        | 为什么采用混沌方法        | 80        |
| <b>第8章</b> | <b>嵌入空间重构</b>    | <b>82</b> |
| 8.1        | 引言               | 82        |
| 8.2        | 测量和状态表示          | 82        |
| 8.3        | 相空间重构            | 94        |
| 8.4        | 嵌入参数的估计          | 96        |
| 8.4.1      | 嵌入延迟             | 96        |
| 8.4.2      | 整体嵌入维数           | 98        |
| 8.4.3      | 局部嵌入维数           | 100       |
| 8.5        | 嵌入参数估计结果         | 102       |



|             |                       |            |
|-------------|-----------------------|------------|
| 8.6         | 海杂波、潮汐和相关噪声的比较        | 104        |
| <b>第9章</b>  | <b>混沌不变量的估计</b>       | <b>107</b> |
| 9.1         | 引言                    | 107        |
| 9.2         | 相关维数的估计               | 107        |
| 9.2.1       | 相关维数的最大似然估计           | 110        |
| 9.2.2       | 实例研究结果                | 112        |
| 9.3         | Lyapunov 指数           | 117        |
| 9.3.1       | Lyapunov 指数的估计        | 118        |
| 9.3.2       | 实例研究结果                | 119        |
| 9.4         | 可预测范围(HP)             | 129        |
| 9.5         | Lyapunov 维数           | 133        |
| 9.6         | Kolmogorov 熵          | 134        |
| 9.6.1       | 如何估计 Kolmogorov 熵     | 135        |
| 9.6.2       | Kolmogorov 熵的最大似然估计   | 137        |
| 9.6.3       | 实例研究结果                | 138        |
| <b>第10章</b> | <b>模拟海杂波数据的混沌特性研究</b> | <b>144</b> |
| 10.1        | 引言                    | 144        |
| 10.2        | 模拟模型概述                | 144        |
| 10.2.1      | 海面动态特性                | 144        |
| 10.2.2      | 海面散射                  | 148        |
| 10.2.3      | 雷达模型                  | 151        |
| 10.3        | 比较条件和标准               | 152        |
| 10.3.1      | 比较标准                  | 152        |
| 10.3.2      | 确定测量条件和模拟参数           | 152        |
| 10.3.3      | 测量和模拟结果的比较            | 153        |
| 10.4        | 混沌评定结果                | 153        |
| <b>第11章</b> | <b>实验结果和结论概要</b>      | <b>160</b> |
| 11.1        | 可供支持的物理证据             | 162        |
| 11.2        | 动态重构                  | 162        |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 附录 1 缩写词表 .....                    | 164 |
| 附录 2 对 Lorenz 数据进行混沌不变量分析的结果 ..... | 166 |
| 参考文献 .....                         | 170 |

# 第1章 概述

## 1.1 引言

经典物理学最核心的部分是这样一个假设,即整个宇宙是严格确定的。自从牛顿阐述了他的三个运动定律以来,下述观点就被认为是理所当然的:由于任何物理系统都可由一组数量有限的确定性方程加以描述,因此它们(无论有多么复杂)肯定是确定的。几个世纪以来,物理学家们坚信:为了以任意精度了解某个系统在将来任意时间点上的状态,就需要对该系统在先前某个时刻的状态进行精确的测量。测量越精确,则预测越好。直到20世纪初物理学家们开始意识到世界并非完全确定时,情况才开始改变。量子力学的革命迫使他们接受这样的事实:自然界中的某些事件是随机发生的,并且在我们究竟能多精确地确定某个事物的状态方面存在基本局限。就像这一发现本身一样奇怪,牛顿定律在宏观尺度上依然成立,因此,至少日常的物理世界看起来依然不受不确定性的影响,但并非长期如此。物理学家们还发现甚至一个只服从牛顿定律的简单系统也能表现出非确定性运动。

在完全由确定性定律决定的系统中出现不确定性运动,这一点起初相当令人烦恼。这种系统的行为被称作混沌的(Chaotic)。称这样的不确定性系统是混沌的完全不同于说它们是随机的,从一开始就指出这一点非常重要。

混沌现象能产生不规则的和复杂的结构。混沌意味着时间上的不可预测性,而复杂性则意味着空间上的不规则性。由于在理论数学上的发现以及功能强大的计算机的广泛可用性,使得混沌

理论和分形几何得以惊人地发展。

海杂波,即来自海面的雷达反射回波,很久以来就被作为随机过程来建模,这可追溯到 Goldstein[1951]的早期著作。这样做的主要原因之一在于海杂波波形的看似随机的行为。以经典的观点,追溯至 Boltzmann,自然界中遇到的一个物理过程的不规则行为被认为是由于该系统中大量自由度的相互作用导致的。这通常导致如下结论,即复杂行为源于某个具有大量独立参数的复杂系统的特性,因此成为随机建模的理由。与此相反,混沌学和非线性动态学理论方面的最新进展表明,很多只具有相对来说很少自由度的非线性和确定性动态系统在其动态演化过程中却表现出随机的、复杂的、不规则的行为 [Abarbanel, 1996; Abarbanel et al., 1993; Baker and Gollub, 1996; Lorenz, 1963; Mandelbrot, 1983; Moon, 1992; Ott, 1993; Peitgen et al., 1992; Schuster, 1988]。这反过来又开辟了一种研究物理过程复杂行为的强有力的、别致的方式。根据这种方式,它们可被当作简单的、非线性的和确定的动态系统来建模。此处,简单一词意味着一个具有少数自由度的系统。这使我们想起对一个物理过程进行数学建模的一个基本问题就是将描述这一过程所需的自由度的数目减至最少 [Abarbanel, 1996; Abarbanel et al., 1993; Baker and Gollub, 1996; Lorenz, 1963; Mandelbrot, 1983; Moon, 1992; Ott, 1993; Schuster, 1988]。

随着用于处理由非线性动态系统产生的时间序列的功能强大分析方法的出现,目前,可用一组不寻常的描述性测度来研究海杂波。实际上,近来的实验结果表明,可能存在一种决定海杂波行为的低维动态吸引子 [Haykin, 1992, 1995]。通过研究分形相关维 ( $D_2$ ), Haykin 和 Leung 首先断言了海杂波的混沌动态特性 [Haykin and Leung, 1989, 1992; Leung and Haykin, 1990]。他们使用 Grassberger - Procaccia [1983a & b] 算法 (GPA) 来估计 ( $D_2$ ), 根据公布的结果,其值介于 6 和 9 之间 [Haykin and Leung, 1989, 1992; Leung and Haykin, 1990]。1992 年,他们通过计算海杂波的最大 Lyapunov 指数进一步证明了其混沌动态特性。计算时他们

利用了 Wolf 的方法 [Wolf et al., 1985], 结果表明最大的 Lyapunov 指数确实为正。后来, Haykin 和 Li 针对海杂波的动态特性重建了一个低维混沌吸引子, 并将海杂波的这一特性用于被海杂波所淹没的雷达目标回波的增强探测 [Haykin and Li, 1995; Li, 1995; Li and Haykin, 1993, 1995]。Palmer 等人的研究 [1995] 也表明海杂波可被当作一种低维的吸引子来建模。

然而, 由不同研究人员发表的关于海杂波数据的混沌特性的结果之间存在着很多不一致之处。例如, Leung and Haykin 根据 GPA 算法的分析给出了一个介于 6 和 9 之间的  $D_2$  值 [Haykin and Leung, 1989, 1992; Leung and Haykin, 1990]。Haykin 和 Li 给出了一个介于 7 和 9 之间的  $D_2$  值 [Haykin and Li, 1995]。Palmer 等人 [1995] 则给出了一个介于 5 和 8 之间的  $D_2$  值。Li [1995] 给出了一个正 Lyapunov 指数, 其后紧跟着一个为零的指数和几个负指数。他还给出了一个大约等于 3 的 Kaplan - Yorke 维数 ( $D_{KY}$ ), 该值远小于估计的  $D_2$  值。理想情况下,  $D_{KY}$  应接近  $D_2$  [Kaplan and York, 1979; Kaplan et al., 1983; Ledrappier, 1981; Russell et al., 1980; Young, 1982, 1983]。这些差异被归因于用来估计  $D_2$  和 Lyapunov 指数的算法的类型。为使估计可靠, 用于估计  $D_2$  的 GPA 算法和用于估计最大 Lyapunov 指数的 Wolf 的算法要求数据具有高信噪比 (SNR) [Eckmann and Ruelle, 1992; Grassberger and Procaccia, 1983a & b; Wolf et al., 1985]。这些算法对收集到的数据中的噪声高度敏感, 若 SNR 低于 20dB 则将产生错误的估计 [Grassberger and Procaccia, 1983a & b; Wolf et al., 1985]。

上述差异和其它可用于估计  $D_2$  和 Lyapunov 谱的更“稳健”算法的存在, 促使本书的第一作者再次回到海杂波的混沌特性这一问题上。在本书报道的实验研究中, 通过使用如下的特定算法解决了所关心的各种问题:

(1) 以三种不同的方式检验时间序列的非线性。

① 使用整形滤波器, 今后称之为 WSF 方法。

② 基于以点间距离增加为判别统计量的替代数据分析 [Schouten et al., 1994a], 今后称之为 SIPD 方法。

③ 基于以  $D_2$  为判别统计量的替代数据分析 [Theiler et al., 1992], 今后称之为 SCD 方法。

(2) 利用 Schouten 等人介绍的最大似然估计原理 [1994a] 的相关维数估计, 今后称之为  $STB_1$  算法。

(3) 利用 Fraser 和 Swinney 介绍的 Shannon 的交互信息准则的归一化嵌入延迟估计 [Fraser, 1989; Fraser and Swinney, 1986], 今后称之为 MI 算法。

(4) 利用 Kennel 等人介绍的伪最近邻方法 [1992] 的整体嵌入维数 ( $d_E$ ) 估计, 今后称之为 GFNN 算法。

(5) 利用 Abarbanel 和 Kennel 介绍的局部伪最近邻方法 [1993] 的局部嵌入维数 ( $d_L$ ) 估计, 今后称之为 LFNN 算法。

(6) 利用 Brown 等人介绍的方法的 Lyapunov 谱估计, 今后称之为 BBA 算法 [Briggs, 1990; Brown et al., 1991; Bryant et al., 1990]。

(7) 利用 Schouten 等人介绍的最大似然原理 [1994b] 的 Kolmogorov 熵估计, 今后称之为  $STB_2$  算法。

这些算法的详细情况将在后面介绍<sup>①</sup>。本书给出的利用上述算法得到的结果, 以一种非常令人信服的方式证明了海杂波的混沌动态特性。这些结果是利用经得起检验的实际雷达数据得到的, 这些雷达数据是从加拿大东海岸进行的一系列实验中收集到的。

## 1.2 本书的目的

在本书中, 我们利用实际数据给出了一份有关海杂波的混沌

---

① 下面两套特定的软件用于算法的实现:

(a) RRCHAOS, 由荷兰 Delft 大学开发, 用于 SIPD、 $STB_1$  和  $STB_2$  算法;

(b) cspX, 由加利福尼亚 Del Mar 的应用混沌小组开发, 用于 MI、GFNN、LFNN 和 BBA 算法。

动态特性的详细报告,其目的在于:

(1) 为混沌时间序列的非线性和平稳性提供系统的检验标准。

(2) 介绍混沌分析所需的用于实际数据准备,同时又不影响时间过程的内在动态特性的预处理技术。

(3) 提供对奇异吸引子的下列不变量进行可靠估计的算法的说明。

- ① 相关维数( $D_2$ )。
- ② 嵌入延迟( $\tau$ )。
- ③ 整体嵌入维数( $d_E$ )。
- ④ 局部嵌入维数( $d_L$ )。
- ⑤ Lyapunov 谱( $\lambda_i$ )。
- ⑥ Lyapunov(Kplan - Yorke)维数( $D_{KY}$ )。
- ⑦ Kolmogorov 熵(KE)。

(4) 以综合方式举例说明,应如何分析一个实际(实验)时间序列的混沌特性。

此处给出的材料首次以书的形式呈现给大家。最重要的是,它肯定了海杂波的混沌动态特性。此外,本书可作为如何评估一个实验时间序列的混沌动态特性的一个典型。

## 第2章 海杂波

### 2.1 引言

海杂波或海面回波,即来自于被雷达发射信号照射的一片海面的后向散射回波。由于海杂波对来自海面或接近海面的“点”目标(这类目标包括低空掠海飞行的飞机、小型军舰、航海浮标及漂浮在海上的冰块等)的雷达回波的可检测性形成严重制约,因此对海杂波的研究不仅具有理论上的重要性,而且具有实践上的重要性。

本书中,我们仅限于研究海杂波的只对其自身特性起作用的内在动态特性。更明确地说就是,只关注由天线安置在一个固定方向上以低入射余角工作的微波雷达所接收到的海杂波。在这样一种工作方式下,海杂波的时间特性完全取决于海面的运动。选用此特定工作方式是为了完全以一个时间的函数来关注,并且以可能的最简单的方式<sup>①</sup>来关注入射电磁波和海面之间的相互作用。

与雷达后向散射有关的被照射的海面面积(即天线的覆盖区域)由以下三个因素决定:

- (1) 天线方向图波束宽度。
- (2) 天线高出海面的高度。
- (3) 入射电磁波的标称入射余角(相对于海面测量的),通常

---

<sup>①</sup> 在像监视雷达这样的扫描工作方式中,接收到的信号表现为既是时间又是空间的函数这样一种更复杂的形式。



在波束中心(瞄准线上)定义。

如图 2.1 所示,对于一个笔形(锥状)波束,可以按距离将天线的照射区域划分为分辨单元。每一分辨单元的横向分辨率由天线波束宽度决定。距离分辨率,用  $\Delta R$  表示,被定义为两个点目标在距离上能被独立分辨所必须分开的最小距离。距离分辨率由雷达发射脉冲的持续时间  $t_0$  决定

$$\Delta R = \frac{1}{2} ct_0 \quad (2.1)$$

式中: $c$  为传播速率。对于使用脉冲压缩技术的雷达, $t_0$  为脉冲的“有效”持续时间。这样,对于某个特定距离(即离开雷达的距离),后向散射回波就在相关的分辨单元的区域上进行叠加。

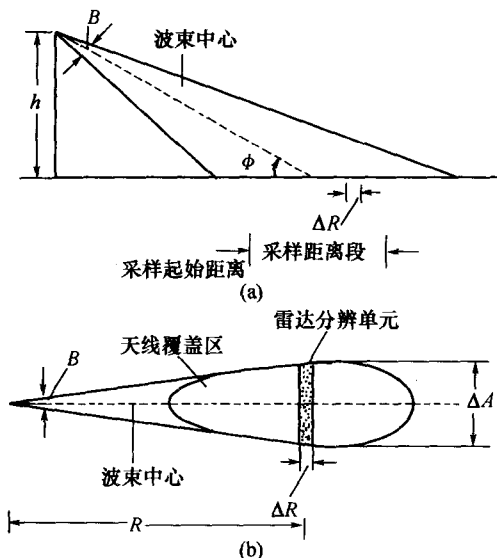


图 2.1 被雷达照射的天线覆盖区和在其上收集数据的采样区的侧视图和俯视图  
(a) 侧视图; (b) 俯视图。

**注意:**如图 2.1 所示,由于天线照射区域(随距离)的扩展,分辨单元在方位向上具有不同的尺寸。