

复杂目标角闪烁序列的混沌特性

王 谷, 方 宁, 苗俊刚

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 角闪烁是寻的制导的主要跟踪误差源. 国内外诸多学者对角闪烁进行了大量的理论和实验研究, 主要探讨角闪烁与 RCS 的统计依赖关系, 其一认为角闪烁与 RCS 有较强的负相关性, 另一种看法是它们之间不相关, 但又非独立. 这种对角闪烁本质的认识尚处于探索中, 本文从混沌动力学角度, 分析角闪烁序列的非线性, 并以混沌特征判据对角闪烁序列进行分析, 提出复杂目标角闪烁序列具有混沌特性.

关键词: 雷达目标; 角闪烁偏差; 混沌

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 07-1502-04

The Chaos Feature of Glint Series for Complex Targets

WANG Gu, FANG Ning, MIAO Jun2gang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Glint error is one of the primary error sources in the homing guidance of radar tracking on extended targets. Many scholars have done much theoretic and experimental research on glint, mainly discussed on the statistical dependence between glint and RCS. One opinion supports that the relation between glint and RCS has a negative relativity, the other one is that there is no relativity, but not independent. This understanding on the nature of glint is still explored. In this paper, we analyze the nonlinearity of the glint series, study the glint series based on the criterions of chaos feature, and then conclude that the glint series have chaos feature for complex targets.

Key words: radar target; glint error; chaos

1 引言

在雷达测量中, 目标角闪烁序列被认为是一种影响雷达正常工作的噪声, 即角噪声, 其形成原因是扩展目标各个反射单元回波之间的相互作用, 当寻的雷达运动时, 目标角闪烁使雷达天线抖动, 产生跟踪误差, 并且离目标越近, 角误差越大, 能直接导致寻的的导弹脱靶. 对这一问题, 国内外学者主要针对角闪烁和 RCS 之间的统计依赖关系进行了大量的理论和实验研究, 其一认为两者间具有较强的负相关性^[1,2], 其二认为两者不相关, 但又非独立^[3-5].

本文从混沌动力学角度, 分析了角闪烁序列的非线性, 并以混沌特征判据对角闪烁序列进行分析, 最后提出复杂目标角闪烁序列具有混沌特性, 对角闪烁的抑制具有重要现实意义.

2 复杂目标角闪烁的非线性特性

雷达和扩展目标相互运动过程中, 目标视在中心随其与雷达相对姿态角的变化形成角闪烁序列, 本文以目

标运动仿真在 GRECO 系统^[6]中建立起角闪烁序列模型, 从而分析其特性.

在 GRECO 中, 可将每个像素看作是一个散射中心, 当复杂目标在屏幕上显示后, 屏幕上所有像素点组成的多散射中心模型即代表该复杂目标, 通过文献[6, 7]中叙述的方法可获得每个散射中心的回波场强和位置信息, 然后利用相位梯度法求取复杂目标的角闪烁线偏差.

角闪烁模型可分为确定性模型和统计模型两种. 统计型模型通常是通过实测数据获得目标角闪烁及其统计特性. 文献[3]系统阐述了角闪烁统计模型. 确定性模型是指在目标坐标系中计算出目标的角闪烁值. 计算方法包括相位梯度法^[8]和波印廷矢量法^[9].

在光学区内, 目标散射体的远区散射场可模型化为多个散射中心回波的矢量和. 如图 1 所示. 图中目标由 N 个统计独立的散射中心组成. 当观察距离 $R_m r_n$ 和 $R_m K$ 时, 在入射场 E^i 作用下, N 个散射中心在雷达接受点的总散射场为

$$\hat{E}^s = \sum_{n=1}^N E_n^s \exp[-j(2kr_n - D_n)] \quad (1)$$

式中 $r_n = \sqrt{(x_{\text{radar}} - x_n)^2 + (y_{\text{radar}} - y_n)^2 + (z_{\text{radar}} - z_n)^2}$ 是第 n 个散射中心至观察点处之距离, E_n^s 和 D_n 表示第 n 个散射中心在入射波照射下的散射强度和初相. 对统计型建模而言, E_n^s 和 D_n 可由雷达测量数据中获得.

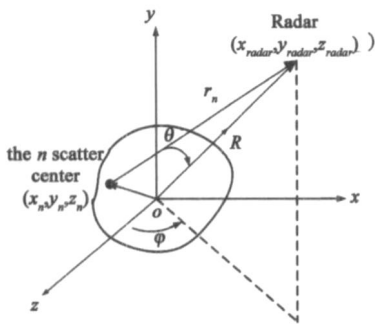


图1 复杂目标模型示意图

入射场 E^i 与雷达测量所获得之散射场 E^s 写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} E_1^s \\ E_2^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^i \\ E_2^i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $[Q]$ 为目标多散射中心的等效散射矩阵, 1, 2 表示垂直或平行极化,

$$[Q] = e^{iU_1} \begin{bmatrix} \sqrt{R_{11}} & \sqrt{R_{12}} e^{i(U_{12} - U_{11})} \\ \sqrt{R_{21}} e^{i(U_{21} - U_{11})} & \sqrt{R_{22}} e^{i(U_{22} - U_{11})} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $\sqrt{R_{1,2}}$, $U_{1,2}$ 为不同极化时之散射场强和相位, 可由观察雷达数据中提取.

式(2)表明在当入射波为球面波时, 散射波波前为像散波, 该像散波之曲率矩阵为 $[Q]$, 此散射波面的两个曲率半径为:

$$\frac{1}{Q_{1,2}} = \frac{1}{2} [Q_{11} + Q_{22} \pm \sqrt{(Q_{11} - Q_{22})^2 + 4Q_{22}^2}] \quad (4)$$

对确定性模型, 在复杂目标几何建模已知条件下, 利用可视化 GRECO 法, 可给出任意极化入射波照射下, 理想导体目标的散射场为:

$$\begin{cases} E_L^s = \sum_{n=1}^N (\hat{e}_{nL}^+ \# E_n^s + \hat{e}_{nL}^- \# E_n^d) \\ E_+^s = \sum_{n=1}^N (\hat{e}_{n+}^+ \# E_n^s + \hat{e}_{n+}^- \# E_n^d) \end{cases} \quad (5)$$

式中 E_n^s 与 E_n^d 分别为目标多散射中心第 n 个面和第 n 个棱边的散射场, 总散射场为这些散射中心的矢量和.

在收发同极化情况下, 金属目标总后向散射场为

$$E^s = \sum_{n=1}^N (\hat{e}_n^+ \# E_n^s + \hat{e}_n^- \# E_n^d) \quad (6)$$

求得确定性模型情况下的 E^s 后, 利用式(2)、(4)可解得该模型条件下目标等效散射矩阵 $[Q]$ 和散射波前的曲率半径.

综上所述, 在入射平面波(或球面波)照射下, 复杂目标散射波面呈象散波状, 其波面相位 \angle 为

$$\angle \approx \frac{2P}{K} \left\{ R + \frac{1}{2} [b]^T Q(R) [b] \right\} \quad (7)$$

式中 $[b]^T = [R \hat{H} + R \hat{U}]$, $[\hat{R}, \hat{H}, \hat{U}]$ 为球坐标单位矢, $Q(R)$ 为观察点处目标散射波面之曲率矩阵.

利用相位梯度法, 复杂目标角闪烁偏差 e_H, e_U 为

$$\begin{cases} e_H = \frac{R(\angle)_H}{(\angle)_R} \\ e_U = \frac{R(\angle)_U}{(\angle)_R} \end{cases} \quad (8)$$

式(7)和(8)表明相位函数 \angle 和角闪烁不仅与 R 相关, 也与观察点处像散波面附近的波面参数 $[b]$ 相关, 且呈曲面二次型关系, 这种非线性关系是研究角闪烁偏差具有混沌特性的基本条件.

3 混沌特性的判断准则

混沌是非线性科学的主要内容之一, 在诸多研究领域, 实验获得的一些/无规则0变化的时间序列, 往往被认为是随机的. 复杂目标角闪烁序列从表象上看属不规则运动, 但对姿态角具有敏感性, 其某些特征依赖于初始条件, 有异于随机过程的概念, 由此可利用混沌理论对角闪烁序列进行分析, 考察角闪烁序列是一个不规则的、低维数的运动而不是一个由于随机性导致的不规则运动.

判断角闪烁序列具有混沌特性的准则可归纳为:

- (1) 产生角闪烁序列的过程呈非线性关系;
- (2) 产生角闪烁序列的过程的吸引子相关维数具有分形特性, 且相关维数随嵌入维数的增加趋于一定值;
- (3) 系统动态过程对初始条件敏感, 即该过程令 Lyapunov 指数中至少一个为正, 且最大的 Lyapunov 指数确定该序列的可预测范围.

对准则(1), 在本文第一节已有证明, 对准则(2)、(3), 可以通过对角闪烁序列嵌入维数和延迟时间的确定, 进行相空间重构, 在高维相空间中恢复混沌吸引子, 由重构空间的关联维数和最大 Lyapunov 指数来确定角闪烁序列的混沌特性, 角闪烁混沌特性的判断流程如图2所示.

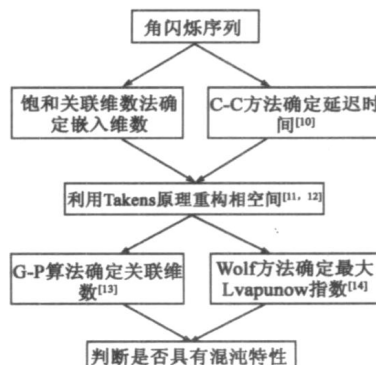


图2 角闪烁序列混沌特性判断过程

为判断角闪烁序列的混沌特性, 必须首先重构相空间, 将实验或理论求得的等间隔的 g_{int} 序列扩展到高维相空间中. 而重构相空间的关键在于嵌入空间维数 m 和时间延迟 S 的选择. 文献[12]指出, 嵌入维数较所研究物理量的维数大, 通常取 $m \geq 2d + 1$ (d 是动力系统的维数), 便可保证吸引子的正确恢复.

其次, 为重构相空间, 必须给出合适的采样间隔, 即确定 S 值. S 值过小, 相空间的轨迹趋于一直线; 反之 S 值过大, 会使数据点集中于相空间的一个小区域内, 不能从重构的相空间图中得到吸引子的局部结构. 本文采用文献[15]中的方法, 取重构的分量间的互信息函数出现第一个极小值时的 S 值作为延迟时间.

m 和 S 确定后, 即可以文献[11, 12]Takens 原理重构相空间, 求得角闪烁序列的关联维数和 Lyapunov 指数, 进而判断 g_{int} 序列的混沌特性.

4 实例

以两种飞机模型(飞机模型 I 和飞机模型 II) 和某种型号导弹模型为例, 对其在五组姿态下的角闪烁序列进行研究, 测试条件为 VV 极化, 频率取 10GHz, 俯仰角 θ , 偏航角从 θ_y 180, 间隔 0.1 变化, 侧滚角分别取 0, 2.5, 4.5, 7.5, 9, 得到每一个模型在五组不同侧滚角条件下的目标角闪烁序列(图 3(a)、4(a)、5(a)). 目标角闪烁序列的嵌入维数 m 和延迟时间 S 给出后, 通过相空间重构, 可以得到模型角闪烁序列的三维相空间图(图 3(b)、4(b)、5(b)), 关联维数(表 1) 和最大 Lyapunov 指数(表 2).

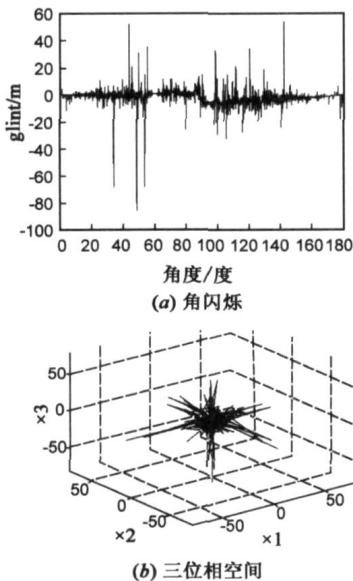


图3 飞机模型I的角闪烁序列及三维相空间($m=7, \tau=3$)

由图 3(b)、4(b)、5(b)可以看出, 相空间的轨迹在一定的空间范围内, 吸引子是奇异吸引子, 在一定程度

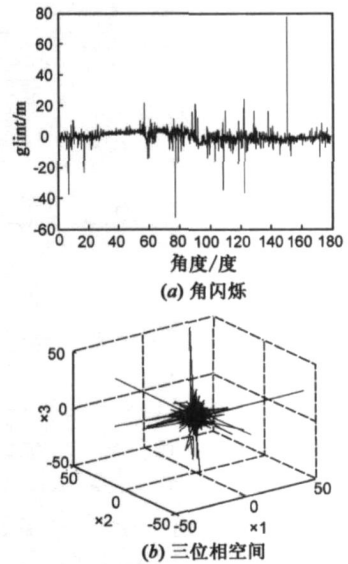


图4 飞机模型II的角闪烁序列及三维相空间($m=15, \tau=3$)

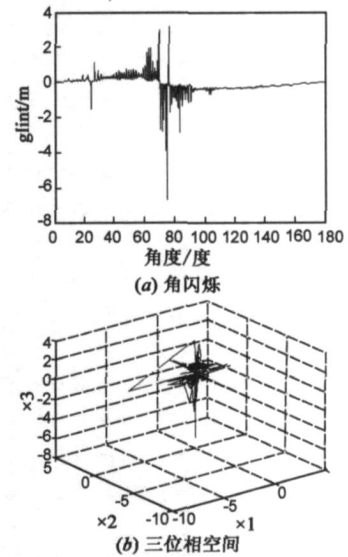


图5 某导弹模型的角闪烁序列及三维相空间($m=3, \tau=7$)

上说明了角闪烁序列是混沌序列; 而且, 从表 1、2 可以看出, 吸引子的关联维数是分维数, 其值表明了吸引子的几何特征及集于吸引子上的轨道演化情况, 与此同时, 最大 Lyapunov 指数均大于零, 表明系统对初始条件具有敏感性, 其值定量地描述了奇怪吸引子的混沌运动状态, 进而说明了角闪烁序列具有混沌特性.

表 1 模型角闪烁序列的关联维数

	飞机模型 I	飞机模型 II	某导弹模型
姿态 1	2.734	3.333	1.667
姿态 2	2.758	4.449	1.856
姿态 3	3.334	3.388	1.501
姿态 4	3.418	2.539	1.405
姿态 5	2.476	1.411	1.307

表 2 模型角闪烁序列的最大 Lyapunov 指数

	飞机模型 \hat{N}	飞机模型 \hat{O}	某导弹模型
姿态 1	0.0752	0.1110	0.0941
姿态 2	0.0979	0.0886	0.0834
姿态 3	0.0913	0.0827	0.2145
姿态 4	0.1270	0.1044	0.1499
姿态 5	0.0516	0.0573	0.3033

5 结论

角闪烁偏差是寻的制导中跟踪误差产生的主要来源之一, 本文根据复杂目标角闪烁的非线性特性, 从混沌动力学角度, 以混沌特征判据对角闪烁序列进行分析, 通过最大 Lyapunov 指数和关联维数的计算, 通过实例验证了复杂目标角闪烁序列具有混沌特性. 该结论可以给角闪烁偏差的抑制研究提供一个新的视角.

参考文献:

- [1] Sinn R J, Graf E R. The reduction of radar glint by diversity techniques[J]. IEE Trans. on AP, 1971, 19(4): 462~ 468.
- [2] 巢增明. 导引头解闪烁抑制方法流探究[D]. 航天工业部 207 所, 1986. (in Chinese)
Chao Zengming. An Approach to Suppression of Target Glint of Homing Seekers[D]. Institute No. 207 of the Second Academy, MAS, 1986. (in Chinese)
- [3] Ostrovityanov R V, Basalov F A. Statistical Theory of Extended Radar Targets[M]. Translated from the Russian (Barton W F, Barton D K), Artech House, 1985.
- [4] Standhu G S, Saylor A V. A real-time statistical radar target model[J]. IEEE Trans. on AFS, 1985, 21(4): 490~ 507.
- [5] Jain A K. Generating statistical correlated glint and RCS for empirically based RF target mode[J]. IEEE Southeaston, 1981: 873~ 875.
- [6] 秦德华. 全频段复杂目标电磁散射计算方法研究与应用软件[D]. 北京航空航天大学, 2004
Qin dehua. All-Band Electromagnetic Scattering Computation for Complex Targets: Method Studies and Application Software [D]. BUAA, 2004. (in Chinese)
- [7] Ning Huansheng, Fang Ning, Wang Baofa. Visual computing method of radar glint for complex target[J]. Chinese Journal of

Electronics, 2006, 15(2): 356- 358.

- [8] 黄培康. 雷达目标特征信号[M]. 北京: 宇航出版社, 1993
- [9] Ostrovityanov R V. On the problem of angle noise[J]. Radiotekhnika I Elektronika 11, 1966, (4): 592- 601
- [10] 吕金虎, 陆安, 陈士华. 混沌时间序列分析及其应[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001
- [11] Albano A M, Muench J, Schwartz C. Singulavalue decomposition and the Grassberger - Procaccia algorithm[J]. Phys. Rev. A, 1988, 38: 3017- 3026
- [12] Takens F. Determining strange attractors in turbulence[J]. Lecture notes in Math, 1981, 898: 361- 381
- [13] Grassberger P, Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors[J]. Physical D, 1983, 9: 187- 190
- [14] A Wolf, J B Swift, Swinney H L, Vastano J A. Determining Lyapunov exponents from a time series[J]. Physica D, 1985: 285- 317
- [15] Fraser A M, Swinney H L. Independent coordinates for strange attractors from mutual information [J]. Phys. Rev. A 1986, 33: 1134- 1140

作者简介:



王 谷 男, 1979 年出生, 现为北京航空航天大学电子信息工程学院博士生, 主要研究方向为雷达目标散射特性、角闪烁特性、等离子体隐身.

E-mail: wanggu@ee.buaa.edu.cn



方 宁 女, 1979 年出生, 北京航空航天大学电子信息工程学院博士后, 2002 年本科毕业于北京航空航天大学电子工程系, 2002 年 9 月-2007 年 6 月, 北京航空航天大学磁场与微波技术专业直读博士. 主要从事雷达目标散射特性、角闪烁特性、等离子体散射特性研究.

E-mail: fangn31@163.com