

# 利用FFT方法分析自旋目标RCS变化周期\*

张 渊, 张爱成

(北京航天飞行控制中心·北京·100094)

**摘 要:**提出了分析自旋稳定目标RCS(雷达反射截面积)变化周期的FFT(快速傅里叶变换)模型,并分段对特定的多个同类型目标做了算例分析,显示出相对其他目标,自旋稳定目标在起旋前频谱能量主要集中在极低频(0.5 Hz以下);在起旋后,除了在极低频部分有集中的能量,在某些频点附近可能会出现相对比较集中的能量。最后给出了该自旋稳定目标RCS变化周期的量化结果和适用性结论。

**关键词:**快速傅里叶变换(FFT);自旋稳定目标;雷达反射截面积(RCS)变化周期

**中图分类号:**TN957.51;V556.6

**文献标识码:**A

**文章编号:**1674-5620(2012)01-0026-04

## Analysis of the RCS Variation Cycle of Spin-Stabilized Objects Using FFT Method

ZHANG Yuan, ZHANG Aicheng

(Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094)

**Abstract:** This paper proposes an FFT (Fast Fourier Transform) model for analysis of the variation cycle of the RCS (Radar Cross Section) of a spin-stabilized object. Segmented analysis of multiple objects of the same type shows that the energy of spin-stabilized objects is concentrated in the low frequency spectrum (below 0.5Hz) before start of spin. After start of spin, energy may also be concentrated around some other frequency points besides concentrated energy in the low frequency spectrum. Quantitative results and applicability conclusions are given for the proposed model.

**Keywords:** Fast Fourier Transform (FFT); Spin-Stabilized Object; Radar Cross Section (RCS) Variation Cycle

## 0 引 言

空间载有有效载荷的飞行器通常需要采用姿态稳定的措施。通过使飞行器绕其纵对称轴旋转实现姿态稳定是其中的一种方式,称为自旋稳定方式。采用自旋稳定方式的飞行器在大气层内飞行的过程中,会受到干扰力矩的扰动,比如旋转载矩不平衡、大气气流等,造成飞行器纵对称轴指向的进动或章动。通过飞行动力学仿真和飞行过程视景仿真确认了该现象的存在,数据和视觉观察表明这种章动通常是低频的。飞行器的这种状态会造成雷达观测视角的变化,引起目标RCS(雷达反射截面积)的变化<sup>[1]</sup>,其中包含姿态扰动造成的附加频谱调制分量<sup>[2]</sup>、周期性变化信息。

雷达测量的目标反射截面积信息是一组时间序

列的电信号,是含有多种频率成分的综合时域信息。根据信号分析学的原理,一个复杂时域信号在给定的条件下,可以分解成若干单一频率的信号。为此,采用FFT(快速傅里叶变化)的方法,对雷达信号进行转换与计算,得出该时域信号在频域中的频谱分布,并从中找出符合实际情况的信息幅度、周期性等特征。

## 1 FFT 算法求解

### 1.1 FFT 计算频谱的公式

傅里叶变换将信号从时域转换为频域,可以进行模拟信号的频谱分析。FFT是DFT(离散傅里叶变换)的一种快速算法。DFT将有限长序列信号从时域转换为频域,可以进行数字信号的频域分析。为了实现DFT在计算机上的快速实现,提出了

\* 收稿日期:2011-10-27;修回日期:2011-11-09

第一作者简介:张渊(1954—),男,学士,研究员,主要研究方向为航天器测量与控制技术;E-mail:ac\_zh2078@126.com

FFT<sup>[2]</sup>。利用 FFT 可以进行频谱中的振幅谱、相位谱以及功率谱分析。

假设一个数据时域序列为

$$x(n) = \begin{cases} x(nT_1), & 0 \leq n \leq N_0 - 1 \\ 0, & N_0 \leq n \leq N \end{cases}$$

则其频域变换如下

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_1) e^{-j(\frac{2\pi}{N})nk}, \quad 0 \leq n \leq N-1$$

频谱  $X(k)$  由实部  $U$  和虚部  $V$  组成

$$X(k) = U(k) + V(k)$$

则频谱中的振幅谱  $A(k)$ 、相位谱  $\varphi(k)$  为

$$A(k) = |X(k)|, \quad \varphi(k) = \arctan \frac{V(k)}{U(k)}$$

其中 频谱某频域中振幅谱  $A(k)$  和  $\varphi(k)$  包含了各目标的 RCS 特征值。

## 1.2 数据与参数选择

进行 FFT 计算,一般要求离散信号长度  $N = 2^r$  ( $r$  为正整数),对有限长度离散信号取  $N_0$  长度,  $2^{r-1} < N_0 < 2^r$ ,对于无限长或者有限长信号,取  $N = 2^r$  项进行分析。

对连续信号  $x(t)$  进行谱分析,实际上是对长度为  $N = 2^r$  的离散信号  $x(nT_1)$ ,  $n=0,1,2,\dots,N-1$ ,进行谱分析。

假设  $x_a(t)$  的截止频率为  $f_c$ ,频域内取样间隔为  $f_1$ ,则参数的选取原则为:时域取样间隔设定为  $T \leq 1/2f_c$ ;频域取样间隔限定为  $T_m \leq 1/f_1$ ,  $T_m$  为  $x_a(t)$  的时间记录长度;若  $f_c$  和  $f_1$  给定后,则  $N$  必须满足  $N > 2f_c/f_1$  [3]。

按照上述参数选取规则,根据目标每次数据的采集,频域内取样间隔  $f_1$  为 0.1~0.2 Hz,数据长度  $N > 200$ ,实际使用长度大于 1 000。根据对目标 RCS 实际数据分析需求,同时对 10 Hz 以上的频谱进行分析,没有发现明显的特性谱线,频域内截止频率  $f_c$  取为 10 Hz。通过数据处理结果分析,频谱不会产生泄露。

## 2 算例分析

对于大部分窄带测量雷达来说,跟踪弧段内的测量可以获得目标 RCS 幅度变化的时间序列,以此作为处理的原始数据<sup>[4]</sup>。

2011 年,某型飞行器进行了 3 次外场飞行。测试时利用同一部雷达分 3 次分别对 3 个目标进行了测量,测量约束条件是目标的尺寸与外形、质量与材

质、飞行轨迹、飞程序、相对雷达的观测几何关系相同;雷达的发射功率、频率和极化方式相同;气象条件大致相同。3 次测量在多目标状态下实施,每次目标群中含有姿态自旋稳定的目标和姿态自由状态的目标。利用这些实测数据进行了分析。

为了简化问题,利用时域均值等方法排除了 RCS 值明显偏小的目标,只分析姿态自旋稳定目标和与其 RCS 值相当的自由姿态目标。

### 2.1 自旋稳定目标启旋前的频线

使用目标独立飞行至姿态启旋前 50 s 的数据进行 FFT 的变换。3 次计算结果显示,能量集中在 0~0.5 Hz 频域范围,振幅为 2 dB 左右;0.5 Hz 后频谱比较“干净”,见图 1。

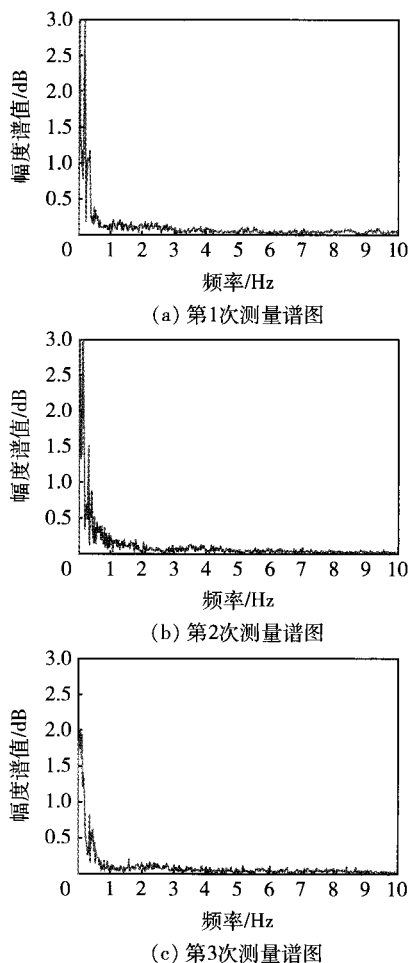


图 1 自旋稳定目标起旋前 FFT 谱图

Fig. 1 FFT spectrum of a spin-stabilized object before spin: (a) first test; (b) second test; (c) third test

从得到的目标时域 RCS 测量结果显示, RCS 的极差值较小,呈现缓慢的起伏;姿态角偏差分离后大于分离前,在很小的范围摆动,摆动长周期约

10 s, 短周期 2~4 s, 姿态没有翻滚。根据先验知识, 已知此时目标无自主姿态控制, 且其空气动力外形设计是静稳定性的, 目标此时段的姿态有扰动, 这种扰动在气动力的作用下会趋向一个小量, 使姿态达到一定的稳定性<sup>[5]</sup>。图 1 中这种 0~0.5 Hz 的谱线主要反映的是, 目标利用静稳定性气动外形克服目标与连接物体分离时造成姿态扰动的情况下, 雷达 RCS 信号中包含的附加频谱调制分量的频率极低。

## 2.2 自旋稳定目标启旋后的频线

被测试的目标设计自旋转速为 2~3 r/s。利用目标启旋后 100~210 s 长度的数据, 经 FFT 分析计算, 结果显示, 自旋稳定目标在起旋后, 0~0.5 Hz 频域范围的谱线振幅降低到 0.6~1.4 dB, 白噪声增加, 在目标上升至约 100 km 时, 在 2.4、4.8、9.8 Hz 左右出现了能量比较集中的谱线, 目标下降至 70 km 高度左右, 3 个明显的谱线逐渐消失。目标再入后, 姿态角偏差和摆动有所增大, 摆动长周期约 10 s, 短周期 0.1~4 s。分析产生上述现象的原因是, 由于目标带有对称的平板状稳定装置, 在旋转情况下, 信号反射面积有变化且呈一定的周期性, 从而增加了调制分量; 加之下降时气动力的扰动加大, 分散了信号的能量, 造成 0~0.5 Hz 频域范围的谱线振幅降低, 出现噪声和新的明显的谱线, 2.4、4.8、9.8 Hz 左右的谱线有可能是目标旋转产生的倍频调制。另外, 根据仿真计算, 目标克服章动会逐渐消耗能量, 自旋会逐渐停止。自旋稳定目标启旋后 3 个样本的 FFT 频谱如图 2 所示。

## 2.3 自由姿态飞行的目标频线

除了对以上自旋稳定目标进行 FFT 分析, 还计算了同等条件下 RCS 值较为接近、同上述目标有一一对应关系的自由姿态飞行目标。时间范围覆盖了前述 3 个目标的飞行时段, 频谱如图 3 所示。能量集中在 0~0.5 Hz 频域范围, 0.5~10 Hz 的频谱展示是 0.5~1 dB 振幅的白噪声, 没有类似图 2 中的几处明显的谱线。

根据先验知识, 该类目标为姿态无控的自由飞行物体, 气动外形及质心与压心的关系不保证飞行姿态的稳定性<sup>[6]</sup>。测量得到的该类目标 RCS 信号极差值、方差值均较大, 变化周期不稳定且较短, 视觉观察到目标呈较慢的自由翻滚状态。有关研究指出, 目标 RCS 值在其与雷达的位置以及观测角变化时会有较大的闪烁<sup>[7]</sup>。综上所述, 认为在 0~

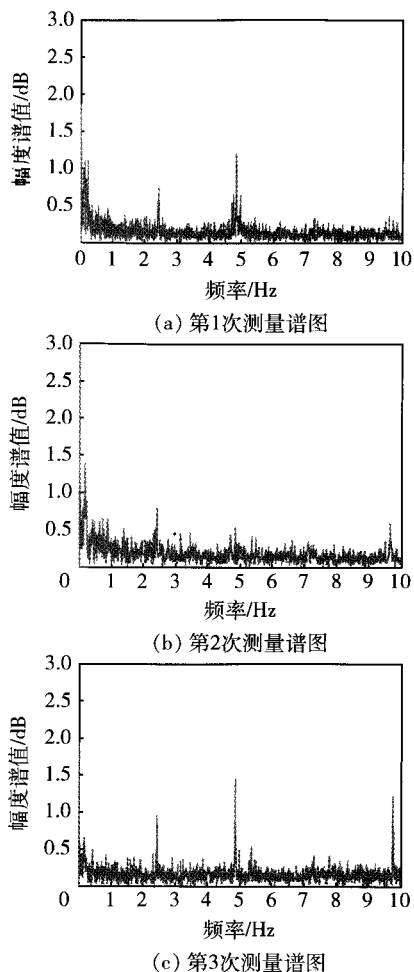


图 2 自旋稳定目标起旋后 FFT 谱图

Fig. 2 FFT spectrum of a spin-stabilized object after spin: (a) first test; (b) second test; (c) third test

0.5 Hz 范围比较集中的能量反映的是目标在较慢的自由翻滚状态下, 目标与雷达的位置以及观测角变化时 RCS 的慢速闪烁, 呈稳定状态; 0.5 Hz 以上频域范围的分散能量反映的是目标与雷达的位置以及观测角变化时 RCS 的快速闪烁, 呈噪声状态。

## 3 结 论

在相同测量环境下, 对同型号某种自旋稳定姿态目标和自由姿态目标的多次结果数据, 利用 FFT 方法做了信号频域方面的分析, 得到结论如下所述。

1) 该自旋稳定姿态目标在独立飞行后, 姿态启旋前, 能量集中在 0~0.5 Hz 频域范围, 与自由姿态飞行的目标没有明显差别; 两者在 0.5 Hz 以上的频域信号幅度方面有明显差别, 前者频谱噪声较小。

2) 该自旋稳定姿态目标姿态启旋后, 能量有所分散, 频谱噪声增高, 但振幅低于自由姿态飞行的目

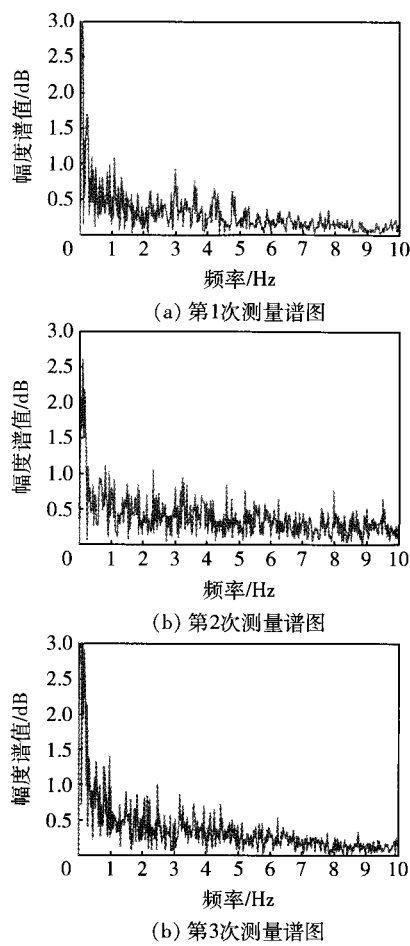


图 3 自由姿态目标 FFT 谱图

Fig. 3 FFT spectrum of a free attitude object: (a) first test; (b) second test; (c) third test

标;在 0.5、2.4、4.8、9.8 Hz 左右出现了能量比较集中的谱线,且该特征稳定。

3)FFT 方法可以得到目标 RCS 信号在频域中的特征,为分析目标 RCS 信号的周期性提供了直接的手段,频域信息经过其他方法提取后,可以成为目标自动识别的特征量。

FFT 方法适用于不同飞行目标的频域分析,但是测试对象与条件不同,其频谱特征会有很大的不同,需要根据飞行器外形、飞行方案、测量条件具体分析,才能准确把握各类目标 RCS 变化周期方面的特征。

参考文献

[ 1 ] 王爽,郭军海,张艳. 基于动态贝叶斯网络的弹头目标融合识别方法[J]. 飞行器测控学报, 2011,30 (2):70 - 74 (Wang Shuang,Guo Junhai, Zhang Yan. Fused Warhead Recognition Based on Dynamic Bayesian Network Model[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2011,30 (2):70 - 74)

[ 2 ] 皇甫堪,陈建文. 现代数字信号处理教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003:175 - 180 (Huangfu Kan, Chen Jianwen. Modern Digital Signal Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2003:175 - 180)

[ 3 ] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2003:35 - 40 (Chen Peiqing. Digital Signal Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003:35 - 40)

[ 4 ] 苏东林,曾国奇,刘焱. 运动目标 RCS 分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2006,32(12):1414 - 1417 (Su Donglin, Zeng Guoqi, Liu Yan. RCS Study of Moving Radar Targets[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006,32(12):1414 - 1417)

[ 5 ] 金胜,高梅国,王洋. 基于 RCS 的空间目标识别技术[J]. 现代雷达, 2010, 32(6):59 - 62(Jin Sheng, Gao Meiguo, Wang Yang. Technology of Space Target Recognition Based on RCS [J]. Modern Radar, 2010,32(6): 59 - 62)

[ 6 ] 余超志. 导弹概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982 (Yu Chaozhi. Missilery Conspectus[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982)

[ 7 ] 熊海林,冯煜芳. 模拟弹头雷达回波闪烁的方法研究[J]. 科技研究, 2008(8): 77 - 80 (Xiong Hailin, Feng Yufang. Research of the Method for Simulating Warhead Radar Echo Flashing[J]. Journal of Research and Technology, 2008(8): 77 - 80)

## 雷达散射截面 ( RCS ) 分析培训课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 (Radar Cross Section, 简称 RCS) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 也是电磁理论研究的重要课题, 使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起, 系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授, 边操作边讲解, 直观易学。

### HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程, 其中: 《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程, 帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用; 《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面, 包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义, 实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程, 专家讲授, 从零讲起, 直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

### 更多培训课程:

- HFSS 培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- CST 培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- 天线设计培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>