

弹道中段目标 RCS 周期特性及其估计方法

冯德军, 刘进, 丹梅

(国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要: 分析了弹头目标的 RCS 周期特性, 指出了传统频域分析方法的不足, 提出了一种新的 RCS 周期估计方法。通过合成循环平均幅度差函数(CAMDF)和循环自相关函数(CAUTOC), 有效克服了传统频域估计方法的不足, 且具有优良的抗噪性能。仿真实验结果表明该方法能明显改善 RCS 周期估计的精确性和稳定性。

关键词: 弹道中段; 雷达目标散射截面; 周期估计; 平均幅度差函数; 自相关函数

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2008)01-0362-04

0 引言

如何从中段目标群中识别真假是导弹防御系统的关键技术之一。作为弹道中段目标识别的主要传感器, 雷达在真假目标识别中发挥着核心作用, 它不仅能获取目标的散射特性, 还能获取目标的运动特性, 基于运动特性的雷达目标识别也被认为是识别真假目标的最有效途径之一^[1-5]。

弹头在中段具有自旋、章动等特有的运动方式, 而诱饵的运动特性与弹头存在显著差异: 无姿态控制的碎片一般存在翻滚运动, 其周期与弹头章动周期有较大的差别; 如果采取加大转动惯量等姿态稳定方式控制诱饵姿态, 由于质量上的差异, 诱饵的章动频率也与弹头存在明显不同。因此, 弹头 RCS 序列周期性是判决真假目标的可靠特征量。但由于受到多种因素的影响, RCS 曲线表现出明显的非平稳性。尤其在低信噪比条件下, RCS 测量本身存在一定的误差, 这使得 RCS 的周期估计变得更为困难, 因此, 寻找稳健的 RCS 周期估计方法十分重要。文献[4]提出了 RCS 周期提取的频域方法, 即通过傅氏变换来获取 RCS 周期。这种方法存在以下不足: ①由于受多种运动合成的影响, 弹道中段目标的 RCS 呈现明显的非平稳特性, 该方法常会出现误判; ②该方法实质是一种谱估计方法, 其精度取决于数据长度, 要达到较高的精度必须要有较长的观测数据, 这对于防御系统目标识别的实时要求是难以容

忍的; ③抗噪性能较差, 当存在测量误差时, 其估计精度的鲁棒性无法保证。本文根据弹道中段目标 RCS 的特点, 提出了一种新的 RCS 周期估计方法, 该方法不但能大大提高周期估计的精度, 还能缩短对数据长度的要求, 而且具有良好的抗噪性能。

1 RCS 周期估计新方法

序列周期估计中采用较多的方法是自相关函数法和平均幅度差函数法。设收到的信号序列 $x(n)$ 由周期信号 $s(n)$ 和噪声 $w(n)$ 组成, 信号自相关函数为

$$\begin{aligned}\phi(k) &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-k} x(n)x(n+k) \\ &= \phi_{ss}(k) + 2\phi_{sw}(k) + \phi_{ww}(k)\end{aligned}\quad (1)$$

式中 $\phi_{ss}(k)$ 为 $s(n)$ 的自相关函数, $\phi_{ww}(k)$ 为噪声的自相关函数, $\phi_{sw}(k)$ 为 $s(n)$ 与 $w(n)$ 的自相关函数。若 $s(n)$ 与 $w(n)$ 不相关, 则有 $\phi_{sw}(k) = 0$; 若 $w(n)$ 互不相关, 则有

$$\phi_{ss}(k) = \begin{cases} \phi_{ss}(k) + \phi_{ww}(k) & (k = 0) \\ \phi_{ss}(k) & (k \neq 0) \end{cases} \quad (2)$$

设当 $k = k_0$ 自相关函数取得最大值, 则信号的周期估计为 $T = k_0/f_s$, f_s 为样本的采样频率。该方法运算简单, 但缺点也明显: 常会导致半倍和双倍误差, 而且, 当 k 值较大时, 求和项变少, $\phi(k)$ 峰值随着时间的增加而逐渐下降, 导致提取周期错误, 这一点在序列较短时表现得尤其突出。平均幅度差函数 AMDF 是另一种应用较多的方法, 其定义为^[6]

$$D_1(k) = \frac{1}{N} \sum_n |x(n+k) - x(n)| \quad (3)$$

式中 $x(n)$ 为样本序列, 实际观测中只能获得一段数据, 这相当于采用加窗处理, 上式变为

$$D_2(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-k} |x_w(n+k) - x_w(n)| \\ k = 1, 2, \dots, N-1 \quad (4)$$

其中 $x_w(n) = x(n)w(n)$, $w(n)$ 为窗函数。在大多数的情况下 $w(n)$ 为方窗。若 $k = k_0$ 时 D_2 取得最小值, 则采样序列的周期初步估计为 $T = k_0/f_i$ 。一般而言, AMDF 的估计精度较 AUTOC 略好, 但该方法面临的问题与后者相同: 当 k 值增大时, 求和差值项逐渐减少, AMDF 将出现多个谷点, 造成周期估计方法失效。为解决这个问题, 文献[7]提出了采用多阈值方法, 进行所提取周期的有效性检验, 但由于阈值与误判难以达到理想的均衡, 效果不太理想。文献[8]提出了采用平滑方法纠正误判, 该法增加了算法时间及复杂度, 且其对连续的误判也无能为力, 依然难避免周期的误判问题。

由于 RCS 周期估计的特殊性, 在周期估计中着重要的是避免误判发生及如何实现短序列的高精度周期估计。考虑到 RCS 序列虽是非平稳的, 但是准平稳的周期信号, 因此可以采用类似谱估计中的自回归-滑动模型方法—将 RCS 序列进行周期“延拓”, 这样可以有效解决随 k 值增大的求和项减少问题。具体来说, 采用类似循环卷积的方法定义循环自相关函数 (CAUTOC) 和循环平均幅度差函数 (CAMDF)

$$\phi_c(k) = \sum_{n=1}^N x(n) \cdot x(\text{mod}(n+k), N) \\ k = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

$$D_c(k) = \sum_{n=1}^N |x(\text{mod}(n+k, N)) - x(n)| \\ k = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

上式两式中均省略了均值系数 $1/N$, 因为它不影响函数特性, 式中 $\text{mod}(n+k, N)$ 表示对 $n+k$ 进行模为 N 的取余操作。可以看出以上定义对所有 k 均有效利用了全部求和项。由定义可知 CAUTOC 和 CAMDF 具有以下性质

性质 1 在定义域内, $\phi_c(k)$ 和 $D_c(k)$ 均关于 $k = N/2$ (设定 N 为偶) 对称, 即

$$\phi_c(k) = \phi_c(N-k), D_c(k) = D_c(N-k)。$$

根据以上性质, 在实际计算中只需计算 $k \in [1, N/2]$ 内的函数, 这节约了一半的计算量。另外, 若 $x(n)$ 是周期为 T 的严格周期信号, 不难证明 CAUTOC 和 CAMDF 具有以下性质 (证明过程略)

性质 2 $\phi_c(aT) > \phi_c(aT+b), D_c(aT) < D_c(aT+b)$, 其中 $aT+b < N/2, a = 1, 2, \dots$

利用性质 2, 采用 CAUTOC 和 CAMDF 均可得到 $x(n)$ 的周期估计。通过以上改进, 有效解决了短序列的周期估计问题, 但还没有完全克服周期估计中的分频和倍频误判。虽然 CAUTO 和 CAMF 均可单独地进行周期估计, 但如果将两者组合, 信号的周期性将能体现得更为充分, 可更好地抑制虚假周期形成的峰、谷点, 且将有更好的稳健性。定义 CAUTOC 与 CAMDF 的组合函数如下:

$$F_{cc}(k) = \frac{\phi_c(k)}{D_c(k)} \\ = \frac{\sum_{n=1}^N x(n) \cdot x(\text{mod}(n+k), N)}{\sum_{n=1}^N |x(\text{mod}(n+k, N)) - x(n)|} \\ k = 1, 2, \dots, N/2 \quad (7)$$

根据性质 2, 不难证明, 对于任意的 $k \neq T$, 必有 $F_{cc}(T) > F_{cc}(k)$, 因此, 可得到周期序列的估计值为:

$$\bar{T} = [\max_k F_{cc}(k)]/f_i, \quad k = 1, 2, \dots, N/2 \quad (8)$$

由式(8)可看出, 求出组合函数峰值点的位置即可方便地估计出序列周期。这一方法的优点在于它综合利用了 CAUTOC 与 CAMDF 函数, 使得峰值点更为突出, 可以更好地避免周期误判。为便于理解, 对章动频率为 2Hz 的某弹头的 RCS 序列 (序列长度为 5s, 采样频率 10Hz), 分别采用 AUTOC、AMDF 及提出的方法得到如图 1 所示曲线。

由图可清晰地看出, AUTOC 和 AMDF 存在同样的问题: 随着时间的增加导致求和项的减少, 总体趋势是递减的, 出现众多的峰点和谷点, 这些峰谷点常会导致误判发生。采用本文提出的方法后, 避免了 AUTOC 和 AMDF 的递减趋势, 虚假峰谷点得到了有效抑制, 而且主峰值得到了加强, 因此采用该方法估计 RCS 周期将更有优势。

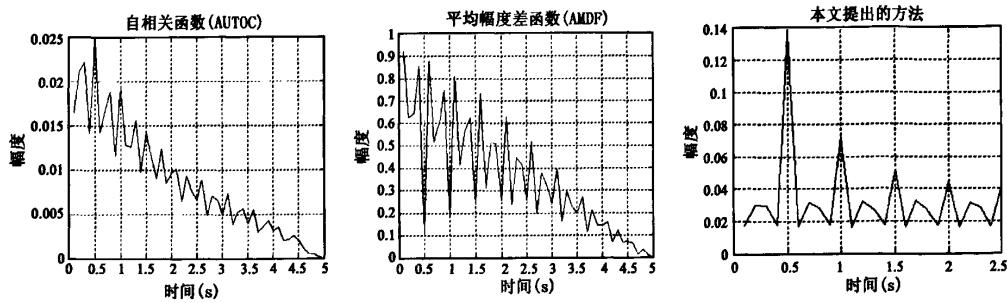


图 1 AUTOC、AMDF 及提出的方法

Fig.1 AUTOC、AMDF and the method proposed

3 仿真实验与分析

动态 RCS 序列仿真生成方法参见文献[5]。考虑到 RCS 测量中会有测量误差, 令 $RCS_m = RCS_i(1 + \Delta_{err})$, 式中 RCS_i 为真实 RCS 值, RCS_m 为测

量值, Δ_{err} 为测量误差。不妨设各次测量是独立的, Δ_{err} 服从均值为 μ , 方差为 σ^2 的高斯分布。当取 $\mu = 0, \sigma^2 = 0.25$ 时, 得到的两类目标一段 RCS 序列如图 2 所示。(参数设置: 章动频率 $\nu = 2.2\text{Hz}$, 章动角 $\theta = 10^\circ$)。

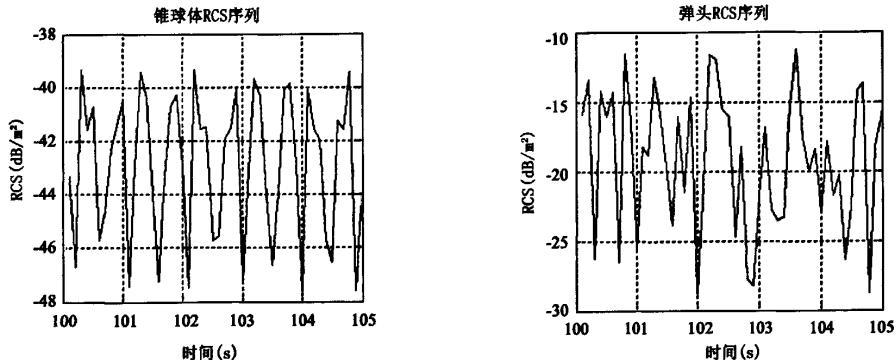


图 2 存在测量误差的 RCS 序列

Fig.2 RCS sequence with measurement error

在获得的 RCS 序列中取其中 20s 进行 RCS 的周期估计, 周期估计时间窗长 2s, 分别采用 AUTOC 方

法、AMDF 方法、傅氏变换方法及本文提出的方法进行 RCS 周期估计, 获得估计结果如图 3 所示。

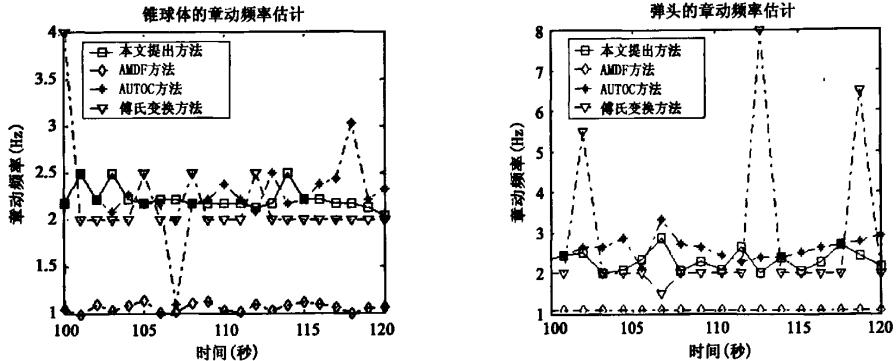


图 3 两类目标章动频率估计

Fig.3 Nutation frequency estimation of two targets

由图 3 明显看出,AMDF 方法出现了严重的分频误判,导致周期估计的失效,傅氏变换方法受到时长的限制,精度只能达到 0.5Hz,而且受到序列非平稳特性的影响,常会出现奇异值。相比之下,AUTOC 方法性能相对稳定,但在仿真中发现这种方法相对

其它方法更易于出现倍频误判,其估计精度也和本文提出的方法有一定的差距。为进一步比较各种方法的性能,其它参数同前,图 4 给出了四种算法对测量误差的敏感程度及对序列时间长度的要求。

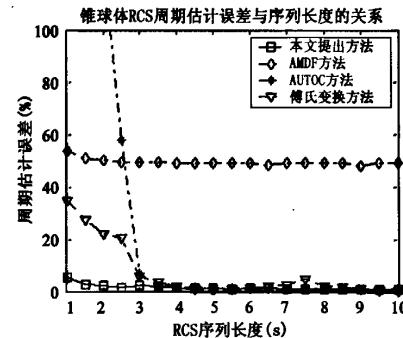
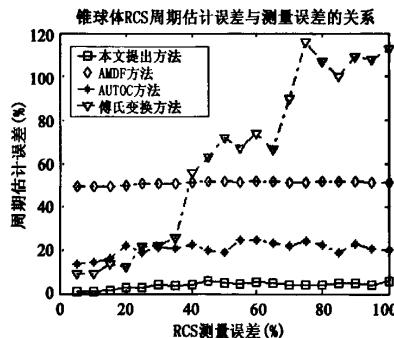


图 4 不同周期估计算法对测量误差及序列长度的敏感程度

Fig.4 Sensitivity of various periodicity estimation algorithms to measurement error and length of sequence

图 4 反映了新方法的优良性能:它几乎不受测量误差的影响,而且在序列较短时表现了良好的稳健性。而其它方法则表现迥异:AMDF 方法主要受分频误判的影响,估计效果差;AUTOC 方法具有较优的抗噪性能,但在序列较短时的倍频误判较严重,在序列较长时性能才相对稳定;频域估计方法更易受到 RCS 测量误差的影响,而且对数据长度有较高的要求。综合比较,所提出的方法具有最理想的估计精度和稳定性。多次仿真表明:只要 RCS 序列长度大于两个 RCS 周期以上,该组合函数方法就具有比其它方法更优的精度和稳健性,在很大程度上改善了周期估计中的倍频和半频误判。

4 结束语

中段目标的运动特性是目标标识的重要特征量。本文针对频域法周期估计的不足,提出了一种采用 CAUTOC 和 CAMDF 组合的 RCS 周期估计方法,仿真实验表明该方法具有较优的抗噪性能和较低的长度要求,十分适用于中段非合作目标的 RCS 周期估计,可以作为中段特征提取的可靠方法。此外,由于原理相通,这一方法也可用于其它序列的周期估计。

参考文献:

- [1] Andrew M, Sessler, John M, Cornwall, Bob Dietz. Countermeasures—A Technical Evaluation of the Operational Effectiveness of the

Planned US National Missile Defense System [R]. MA, Cambridge, 2000: 39~48.

- [2] 陈建文,李士国. 基于目标运动分辨技术提取导弹目标运动特征[J]. 现代雷达, 2003, 25(6): 5~7. [CHEN Jian-wei, LI Shi-guo. Missile motion feature extraction based on target motion resolution [J]. Modern radar, 2003, 25(6): 5~7 (in Chinese).]
- [3] Hussain M A, HRR. length and velocity decision regions for rapid target identification [C]. Denver, SPIE 3810, 1999: 40~51.
- [4] 罗宏. 动态雷达目标的建模与识别研究 [D]. 博士学位论文, 北京: 航天科工集团第二研究院, 2000. [LUO Hong. Studies on the modeling and recognition of moving radar targets [D]. Beijing: Dissertation of the Second Research Academy of China Aerospace Science & Industry Corporation, 2000.]
- [5] 冯德军. 弹道中段雷达目标识别与评估 [D]. 博士学位论文, 长沙: 国防科技大学研究生院, 2006. [FENG De-jun. Study on radar target recognition and its evaluation in ballistic midcourse [D]. Changsha, Dissertation of NUDT, 2006.]
- [6] Ross M, Shaffer H, et al. Average magnitude difference function pitch extractor [J]. IEEE Trans. on ASSP, 1974, 22(5): 353~362.
- [7] Wolfgang Hess. Pitch Determination of Speech Signals [M]. New York: Springer-Verlag, 1983.
- [8] Thomas W Parsons. Voice and Speech Processing [M]. New York: McGraw-Hill, 1986.



作者简介: 冯德军 (1972-), 男, 博士, 国防科技大学电子科学与工程学院讲师, 主要研究方向为导弹攻防对抗中的雷达信号处理与目标识别。

通信地址: 长沙国防科技大学四院一所仿真室 (410073)

电话: (0731)4575793 转 603

E-mail: fdj117@sina.com

(下转第 379 页)

Influence of the Parachute Elastic Behavior on the Canopy Payload

YU Li¹, LI Shui-sheng², MING Xiao¹

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

2. Aerospace Life-Support Industries, LTD, Xiangfan 441003, China)

Abstract: The parachute payload analysis is one of important contents in the parachute investigation. The parachute elastic behavior and canopy payload was considered together for the first time in this paper. The mechanism of production and influence factor for the canopy payload was discussed during the parachute working process in theory at first. Basis on this, the canopy and connecting rope of the differential elastic material were adopted. The opening process of the flat-circle parachute was experimental investigated in the steady wind tunnel. Not only the transient relation between the canopy payload and the canopy shape was got, but also the important conclusion that canopy payload is influenced by the elastic behavior was discovered. The experimental results shows that elastic increased, the parachute instability during the working progress will be intensified, and the canopy breathe behavior will be very clear. The canopy payload peak also be increased and the vibration frequency also be quick up. At the mean time, the inflation process will delay, the inflation time will prolong. This investigation is helpful for the payload analysis of the parachute.

Key words: Parachute; Elastic behavior; Canopy payload; Experimental investigation

PGS Periodicity of Pulse Train in Microsecond and Its Function. Akio Ito

TENG, D. A., LIU, K., DANILOV, S.

FENG De-jun, LIU Jin, DAI Mei
 (2013) *Journal of Chinese Linguistics* 41(2), 233–258

Abstract: After RCS periodicity signature of warhead analyzed, the weaknesses of estimation algorithms in frequency domain are pointed out and a new algorithm is proposed, which combines circle autocorrelation (CAUTOC) with circle average magnitude difference function (CAMDF). The new algorithm conquers the defect of conventional methods, especially in which it is more robust in low SNR environment. Simulation result shows that proposed method has gained greatly higher accuracy and stability than the former methods.

Key words: Midcourse; BCS; Periodicity estimation; AMDE; AUTOC

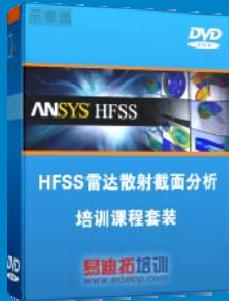
雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

易迪拓培训(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/>