

# 变区间分组检验相乘积累进动周期估计

魏玺章,姚辉伟,丁小峰,黎 湘

(国防科技大学电子科学与工程学院空间电子信息技术研究所,湖南长沙 410073)

**摘 要:** 该文首先分析了弹道中段进动锥体目标 RCS 序列的统计特性及其周期性特点,指出目标本身 RCS 起伏产生的虚假周期是影响传统进动周期估计方法性能的主要因素.基于非参数统计理论,本文提出了一种变区间分组检验相乘积累的 RCS 序列进动周期估计方法,仿真结果表明,该方法不仅能够有效克服虚假周期影响,并能明显改善进动周期估计精度.

**关键词:** 弹道导弹;进动;周期估计;非参数统计

**中图分类号:** TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 01-0135-06

## Estimation of Precession Period Based on Nonparametric Statistics

WEI Xi-zhang, YAO Hui-wei, DING Xiao-feng, LI Xiang

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** This paper is for the identification from the RCS sequence of the midcourse missile. First, we analyzed the statistic and periodic characteristic of the RCS sequence, and pointed out the false period caused by the target's fluctuant RCS was the main factor that influence the traditional method of estimation of the period. Then a new method to estimate the precession cycle based on nonparametric statistics theory is proposed. The simulation result shows that the method can solve the false period problem effectively by accumulating the results of the variational interval Kruskal-Wallis test and improve the performance of the estimation.

**Key words:** ballistic missile; precession period; nonparametric statistics

### 1 引言

弹道导弹中段相对于助推段、再入段具有飞行时间较长、空间环境相对简单等特点,是攻防对抗的重要阶段,中段目标特性的研究对发展弹道导弹防御系统有着重要的意义<sup>[1~6]</sup>.由于宽带雷达受作用距离的限制,目前我国对弹道中段目标的探测仍把窄带雷达作为主要的传感器之一,因此努力挖掘窄带雷达的目标识别潜力具有重要意义.利用窄带雷达数据反演目标特性的难点在于窄带雷达受带宽和有限频段的限制,不能获得目标的全息.本文主要研究基于窄带雷达 RCS (Radar Cross Section) 序列的弹道中段目标进动周期特性反演问题.

弹头在中段的运动可以分解为弹头质心沿弹道的轨道运动和弹头围绕过质心直线的规则转动——进动,进动特性是由弹头自旋定向时受到扰动产生的,同弹头的轨道特性、电磁散射特性一样,是弹头的固有属性,可以作为弹头类目标识别的重要特征量.美国曾专门开展 Firefly 飞行试验研究进动特性<sup>[7]</sup>,但并未透露技术细节.文献[8]中利用傅里叶变换和时频分析提取幅度最大的频率分量作为进动频率的估计,此种方法的缺点在于,当

进动角较大时,目标本身的 RCS 起伏可能产生虚假周期分量,该虚假周期分量的幅度有时会远大于真实进动周期分量的幅度;文献[9]利用循环自相关和循环平均幅度差函数相结合的方法估计进动频率,由于自相关与平均幅度差函数本身都存在倍频分频问题,两者结合仅仅改变了各分量的绝对大小,相对大小并没有改变,因此仍然存在错估的问题;文献[10]利用方差分析法估计了卫星目标 RCS 序列的周期,该方法同样存在倍频分频问题,且敏感于 RCS 整体的升降趋势;文献[11]利用弹头全极化散射特性估计了进动频率,但其未考虑噪声及测量误差的影响,也未见其有进一步研究成果.

本文首先分析了的进动目标 RCS 序列的统计特性及其独特的周期性特点,指出目标本身 RCS 起伏产生的虚假周期是影响传统进动周期估计方法性能的主要因素.然后基于非参数统计理论,利用周期序列关于周期的对称性(或相关性)——对 RCS 序列进行变区间分组检验相乘积累,提出一种具有普适意义的基于目标 RCS 序列的运动周期估计新方法,并给出了该方法的详细流程.仿真结果表明,该方法不仅能够有效克服虚假周期的影响,并能明显改善进动周期的估计精度.

## 2 进动目标 RCS 序列的特点分析

弹道导弹弹头再入时一般要求弹头的指向与再入速度方向一致,因此弹道导弹释放弹头时,通常利用自旋保持空间定向以满足再入要求.根据刚体姿态动力学的知识,弹头自旋时难免受到横向干扰从而产生进动.

如图 1 所示,假设半锥角为  $\alpha$  ( $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ ),侧面散射均匀的锥体目标轴线  $oo_1$  绕进动轴  $z$  轴以角速度  $\omega$  进动,进动周期为

$T = 2\pi/\omega$ ,进动角为  $\theta$  ( $0 < \theta \leq \pi/2$ ),同时绕自身轴线以角速度  $\Omega$  自旋.弹头目标对地基雷达为远场目标,雷达发射信号近似为与  $yo_z$  平面平行的平行波,设雷达波与进动轴夹角为  $\gamma$ ,实际上,弹头沿弹道的质心运动使得  $\gamma$  是时间  $t$  的函数,而横向干扰的不均衡使得  $\theta$  也是随时间作微小的变化,以锥体轴线位于  $xoz$  平面内开始计时,姿态角  $\beta$  随时间变化规律为:

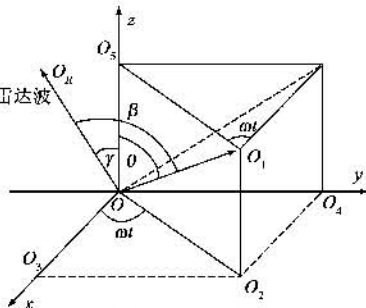


图1 进动锥体目标的姿态角

$$\beta(t) = \arccos(\cos\theta(t)\cos\gamma(t) - \sin\theta(t)\sin\gamma(t)\sin\omega t) \quad (1)$$

由于中段环境稳定且干扰较小,故可假定进动角保持不变,在短的观测时间内,平均视线角的变化也可以忽略.式(1)可简化为<sup>[5]</sup>

$$\beta(t) = \arccos(\cos\theta\cos\gamma - \sin\theta\sin\gamma\sin\omega t) \quad (2)$$

由式(2)可以看出,姿态角  $\beta(t)$  作为连续函数以  $T$  作周期性变化.设雷达采样时一个周期  $T$  内可采  $n_0$  个点,由于周期  $T$  并不一定是采样间隔  $T_s$  的整数倍,则  $(n_0 - 1) \cdot T_s < T < n_0 T_s$ ,使得相邻周期对应位置采样点的采样值不同,即  $\beta(t + T) \neq \beta(t + n_0 T_s)$ ;令  $\Delta t = |T - n_0 T_s|$ ,而  $T_s$  也不一定是  $\Delta t$  的整数倍,则存在整数  $N$  ( $N$  与  $\Delta t$ 、 $T_s$  有关),使得相邻小于等于  $N$  个周期对应位置采样点的采样值都不同.

设进动角  $\theta = 8^\circ$ ,平均视线角  $\gamma = 75^\circ$ , $T = 5.555s$ , $T_s = 0.05s$ , $t = 0$  时  $\beta(t) = 75^\circ$ ,得到的一段姿态角序列,则目标一个进动周期内的雷达采样点数为  $n_0 = 112$ .将  $10T$  时间内的每  $n_0 = 112$  个采样分为一组,图 2(a)为各组 1~30 点采样对应姿态角的对比图,图 2(b)为各组 25~31 点采样对应姿态角的对比图.

图 2 显示在各进动周期的同一位置姿态角的采样值并不相同,且变化幅度不等,说明雷达视线角的变化率不均匀,其中姿态角在极大值和极小值附近雷达视

线角的变化较慢,此时各组采样误差较小;而在平均视线角附近的变化较快,从而此时各组采样误差也较大.误差幅度的大小取决于该时刻雷达视线角的变化率以及目标本身 RCS 在该视线角附近的起伏程度.雷达视线角变化率越快,误差就越大;目标本身 RCS 的起伏越剧烈,这种误差效应就越显著.

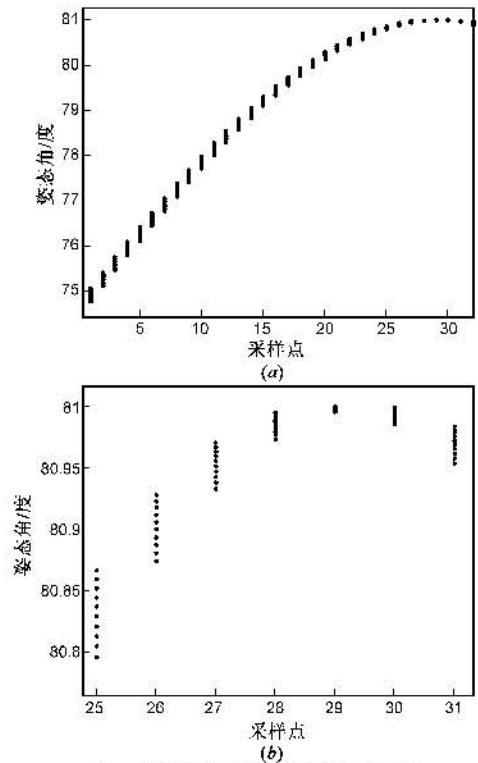
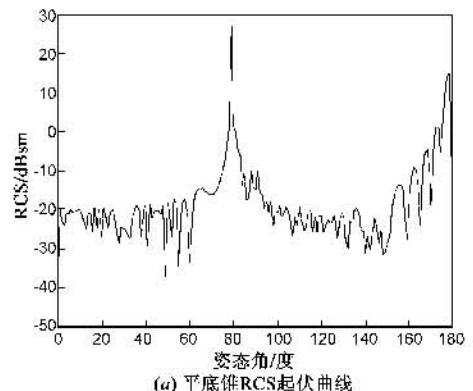
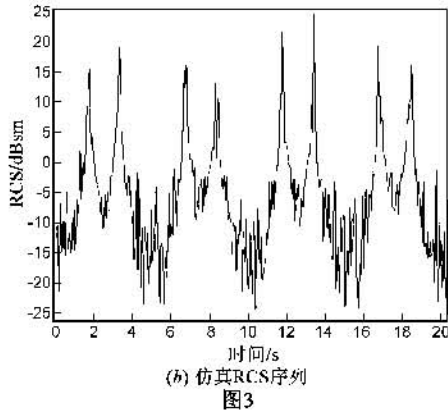


图2 各组采样点对应姿态角对比图

图 3(a)为通过 RCS 计算软件得到的目标本身 RCS 起伏曲线,图 3(b)为通过样条拟合得到的进动目标的 RCS 序列,参数设置如下,进动角  $\theta = 8^\circ$ ,平均视线角  $\gamma = 76^\circ$ ,进动周期  $T = 5s$ ,采样间隔  $T_s = 0.05s$ , $SNR = 5$  dB, $t = 0$  时  $\beta(t) = 76^\circ$ .可以看出,仿真得到 RCS 序列在平均视线角时段附近起伏相对剧烈,而在极大极小视线角附近相对平滑,正是上述误差效应的体现.



(a) 平底锥RCS起伏曲线



### 3 变区间分组检验相乘积累周期估计方法

从目标的 RCS 序列中提取出周期信息,一般采用频谱分析的方法分析其包含的频率分量,取其最大分量,即频谱的主要成分作为序列周期的一个估计.由上节的分析可知,姿态角序列受进动的调制具有近似余弦函数的形状,其频谱的成分将集中在进动频率附近.然而雷达获取的回波数据是目标的 RCS 序列,它是在姿态角序列的基础上再由目标本身 RCS 起伏调制而成.目标本身 RCS 起伏破坏了原有的能量集中,除进动频率处的成分外,其它频率处也将会出现能量较大的成分,且何处能量最大与目标的进动状态及本身 RCS 起伏有关.如图 4 所示两种进动状态下目标 RCS 序列的频谱,除进动角不同外,其它参数设置与图 3 相同.

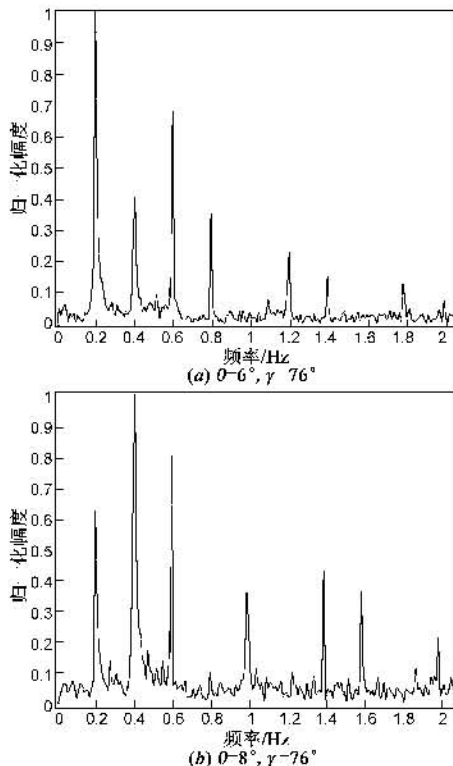


图4 目标不同进动状态下RCS序列频谱

仿真中,目标的进动周期  $T = 5\text{s}$ ,即 RCS 序列的进动分量将出现在  $f = 0.2\text{Hz}$  处,如图 4(a) 中所示主要成分即为进动分量,其它峰值即是由目标本身 RCS 起伏引起的虚假周期;而在图 4(b) 中,由于进动角的增大,目标本身 RCS 在姿态角范围内的起伏随之变大,使得频谱主要成分出现在  $f = 0.4\text{Hz}$  处,此时虚假周期超过进动周期成为频谱的主要成分.由于目标 RCS 起伏出现在进动周期之内,因此虚假周期一般会小于进动周期.

目标本身 RCS 在姿态角范围内的起伏反映在频域表现为虚假周期分量的出现,该分量的大小及出现的位置均与 RCS 序列的时域周期没有必然联系.然而无论目标本身 RCS 在姿态角范围内的起伏如何变化,其在时域各周期内具有相同的起伏形状.将一个周期长度内的 RCS 采样作为一组样本,则各周期的样本必然具有相同的分布特征.本文基于非参数统计理论,提出变区间分组检验相乘积累的周期估计方法.其主要思想是将各组样本分布的相似程度作为周期长度的一个估计,再通过改变分组区间对同一分组长度的检验结果相乘积累,以消除虚假周期的影响,其流程图如图 5 所示.

图5 变区间分组检验相乘积累流程图

#### 3.1 序列分组赋秩, Kruskal-Wallis 检验

流程图中对 RCS 序列  $[x_1, x_2, \dots, x_n]$  以长度  $l$  分组赋秩的方法如下:

$$x_{ij} = x_{i+(j-1)l} \quad (3)$$

式中,  $j = 1, 2, \dots, r$ ;  $i = 1, 2, \dots, l$ ;  $r = [n/l]$  为不超过  $n/l$  的最大整数.给序列  $[x_1, x_2, \dots, x_n]$  中最小的赋秩 1, 给第二小的赋秩 2, 如果有相等的数据, 则赋给平均秩.令  $R(x_{ij})$  为赋给  $x_{ij}$  的秩, 令  $R_j$  为赋给第  $j$  组的秩和, 即

$$R_j = \sum_{r=1}^l R(x_{ij}) \quad j = 1, 2, \dots, r \quad (4)$$

按上述方法对序列分组赋秩之后, 各组数据是否具有相同的分布可以由 Kruskal-Wallis 检验来判断<sup>[13]</sup>, Kruskal-Wallis 检验的具体方法如下.

$H_0$ : 各组的分布相同;

$H_1$ : 至少有一组比其它至少一组具有偏大的观测值.

检验统计量定义为

$$T = \frac{1}{S^2} \left( \sum_{i=1}^r \frac{R_i^2}{l} - \frac{n(n+1)^2}{4} \right) \quad (5)$$

式中,  $S^2 = \frac{1}{n-1} \left( \sum_{i,j} R(x_{ij})^2 - \frac{n(n+1)^2}{4} \right)$ . 一般情况下,

统计量  $T$  的精确分布相当难求. 因此, 自由度为  $r-1$  的  $\chi^2$  分布将作为  $T$  的零分布逼近. 如果  $T$  大于它零分布的  $1-\alpha$  分位数, 则以水平  $\alpha$  拒绝  $H_0$ . 定义自由度为  $r-1$  的  $\chi^2$  分布随机变量超过  $T$  观测值的概率为  $P$ , 显然, 每组数据分布越相同  $P$  值越大.

### 3.2 变区间分组及相乘积累对检验结果的影响

与频谱方法把所有数据作为一个整体来进行成分分析相比, 本文方法是先将数据分成等长度的组, 通过检验各组的统计分布特性是否相同来判断分组长度是否为序列周期长度, 并通过改变分组的区间进行多次检验. 周期的相关性使得以周期长度进行分组的检验结果几乎不受分组区间改变的影响; 而以非周期长度分组时, 由于各组之间的相关性较弱, 改变分组区间对检验结果的影响十分显著, 甚至可能得到截然相反的结果. 本文中检验结果为各组数据分布相同的概率  $P$ . 于是可以通过将同长度的各种分法的检验结果  $P$  相乘积累, 以消除虚假周期的影响.

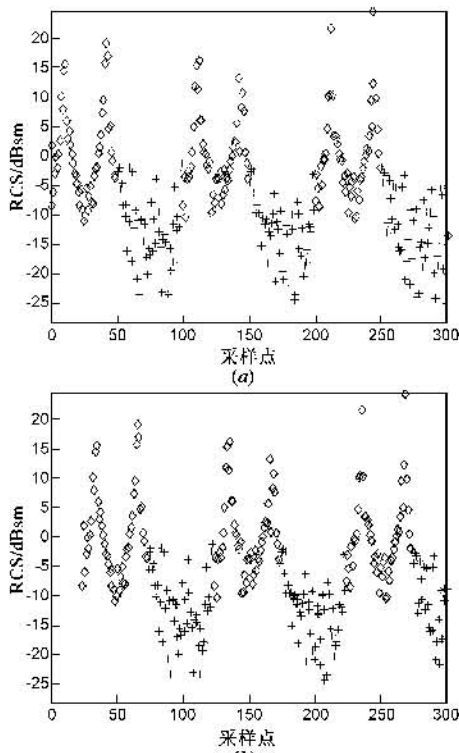


图6 从不同起始位置以50点长度分组

对图3中仿真 RCS 序列进行分析, 如图6(a)所示将序列以50点长度分组, 采用 kruskal-wallis 检验, 各组数据分布相同的概率  $p = 0.9885 \approx 1$ , 此时可以认为进动周期长度为50点, 由采样频率  $f_s = 1/T_s = 20\text{Hz}$  可得, 进动周期为  $2.5\text{s}$  (即进动频率为  $0.4\text{Hz}$ ), 由前节分析知, 此频率为虚假频率; 而不改变分组长度, 仅改变起始位置 (即改变分组区间), 如图6(b)所示从第25点开

始以50点长度分组, 此时采用 kruskal-wallis 检验各组数据分布相同的概率为  $0.0000$ , 即50点长度不是序列的周期. 将两次以相同长度不同区间分组的检验结果相乘积累, 即可消除虚假周期的影响. 如图7所示以序列周期100点长度分组, 改变分组区间, 各组数据分布相同的概率仍都接近于1, 因此相乘积累并不会明显减小其分布相同程度的概率. 如图9所示, 在周期长度附近分组的检验结果基本集中在  $p = 1$  附近, 其它位置的检验结果要么比较分散, 要么概率  $p$  的值都很小. 图10为每个长度分组改变区间30次检验相乘积累的结果, 与图8单次的结果相比, 不仅消除了虚假周期的影响, 还大大提高了分辨率.

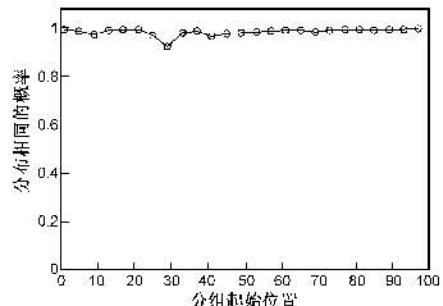


图7 以100点长度分组25次检验结果

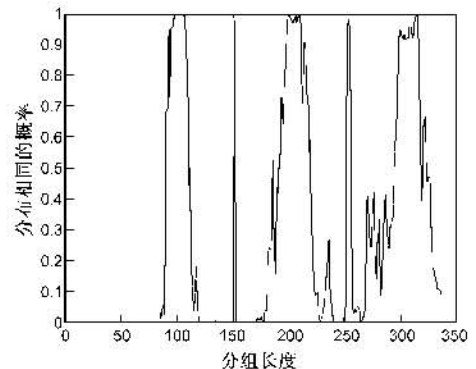


图8 各长度单次分组检验结果

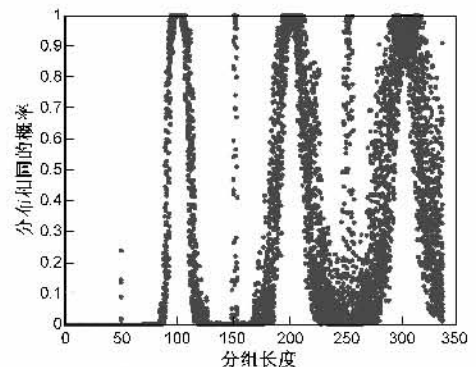


图9 各长度30次分组检验结果

## 4 仿真试验

利用 RCS 预估软件计算出高  $H = 3\text{m}$ , 半锥角  $\alpha = 11^\circ$  侧面散射均匀的锥体弹头的全姿态静态 RCS 数

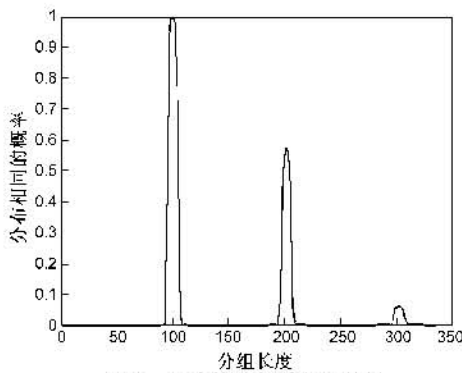


图10 30次检验相乘积累结果

据,根据弹道中段进动目标的姿态角公式,通过  $B$  样条拟合得到中段进动目标的 RCS 序列. 设进动周期  $T = 5\text{s}$ , 雷达采样频率  $20\text{Hz}$ , RCS 测量的非相干误差统计量服从高斯分布<sup>[12]</sup>, 即 RCS 测量值为  $RCS_m = RCS_t(1 + \Delta\text{err})$ , 式中  $RCS_t$  为目标 RCS 真实值,  $\Delta\text{err} \sim N(0, \sigma^2)$  为非相干测量误差,  $\sigma$  反比于两倍信噪比的平方根. 采用频谱分析方法与采用本文方法进行进动周期估计在不同进动角及信噪比下的估计结果如表所示.

表1 本文方法估计结果

进动参数 \ SNR (dB)	SNR (dB)				
	0	5	10	15	20
$\gamma = 76^\circ, \theta = 4^\circ$	5.025	5.000	5.000	5.000	5.000
$\gamma = 76^\circ, \theta = 6^\circ$	5.025	5.025	5.025	5.000	5.000
$\gamma = 76^\circ, \theta = 8^\circ$	5.050	5.075	5.000	5.025	5.000
$\gamma = 76^\circ, \theta = 10^\circ$	10.250	5.050	5.000	5.000	5.000
$\gamma = 78^\circ, \theta = 4^\circ$	5.050	4.950	5.025	5.000	5.000
$\gamma = 78^\circ, \theta = 6^\circ$	5.150	5.010	5.250	5.050	5.050
$\gamma = 78^\circ, \theta = 8^\circ$	15.350	5.075	5.025	5.025	4.975
$\gamma = 78^\circ, \theta = 10^\circ$	2.550	15.250	15.525	10.500	10.250

表2 频谱分析方法估计结果

进动参数 \ SNR (dB)	SNR (dB)				
	0	5	10	15	20
$\gamma = 76^\circ, \theta = 4^\circ$	5.050	5.050	5.050	5.050	5.050
$\gamma = 76^\circ, \theta = 6^\circ$	5.050	5.050	5.050	5.050	5.050
$\gamma = 76^\circ, \theta = 8^\circ$	2.525	2.525	2.525	2.525	2.525
$\gamma = 76^\circ, \theta = 10^\circ$	2.525	2.525	2.525	2.525	2.525
$\gamma = 78^\circ, \theta = 4^\circ$	5.050	5.050	5.050	5.050	5.050
$\gamma = 78^\circ, \theta = 6^\circ$	5.050	5.050	5.050	5.050	5.050
$\gamma = 78^\circ, \theta = 8^\circ$	2.525	2.525	2.525	2.525	2.525
$\gamma = 78^\circ, \theta = 10^\circ$	2.525	2.525	2.525	2.525	2.525

表中带框结果为错误估计, 其中频谱分析法错误结果全为倍频估计, 其产生原因已在本文第三节中进

行了分析; 而本文方法的错误估计中以倍周期长度居多, 这与本文采用的统计学方法有关, 因为直观上样本数量越大, 统计分析就越精确.

从频谱分析方法的错误结果的分布情况可以看出, 进动角较大的 RCS 序列更容易出现错误的估计结果, 这是因为随着进动角的增大, 姿态变化范围内目标本身的 RCS 起伏程度增大, 这对姿态角近似余弦函数的形状破坏越严重, 使得虚假周期分量变大的结果; 而本文方法通过变区间检验相乘积累减小了虚假周期的影响, 另外由于采用统计学方法, 其对统计噪声的影响也在错误结果的分布中得到了体现. 由结果可以看出, 当信噪比大于  $5\text{dB}$  时, 该方法在大多数进动参数下能较好地估计出目标的进动周期.

## 5 结束语

本文分析弹道中段锥体目标的进动周期估计, 首先分析了弹道中段进动目标 RCS 序列的特点, 其次, 利用非参数统计理论在时域提取序列的周期, 并提出一种相乘积累消除虚假周期的新方法, 仿真结果证实了该方法的有效性. 需要指出的是本方法具有一定普适意义, 即对其它具有周期性的序列也适用. 另外本文所研究的弹头目标为旋转对称且散射均匀的结构, 复杂目标的进动周期估计方法还有待进一步研究.

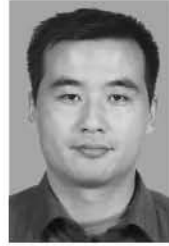
## 参考文献:

- [1] Andrew M Sessler, et al. 卢胜利等译. NMD 与反制 NMD [M]. 北京: 国防大学出版社, 117 - 120.
- [2] Eugene F Knott. Simulation of reentry vehicle motion during laboratory measurements of radar cross section [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1969, 17(2): 242 - 244.
- [3] Mehrhdz D. Radar observations in low earth orbit [J]. Advanced space Research, 1997, 19(2): 203 - 212.
- [4] Sang H Lee. Investigation of the Effects of Target Feature Variations on Ballistic Missile RCS [D]. Department of the Air Force Air University, 2006.
- [5] R Lambour, N Rajan, T Morgan, I Kupiec. Assessment of orbital debris size estimation from radar cross section measurements [J]. Advanced space Research, 2004, 34(5): 1013 - 1020.
- [6] Frank Hanson, Guy Beagher. Discriminating interceptor technology program (DITP) laser radar [A]. Proceedings of SPIE Conference on Laser Radar Technology and Applications IV [C]. Orlando, Florida, April 1999, SPIE Vol. 3707: 372 - 380.
- [7] Schultz K, et al. Range Doppler laser radar for midcourse discrimination: the firefly experiments [A]. Proceedings of the 2nd Annual AIAA SDIO Interceptor Technology Conference [C].

New Mexico, Albuquerque, 1993, 2653 - 2664.

- [8] 陈行勇, 黎湘, 郭桂蓉, 姜斌. 微进动弹道导弹目标雷达特征提取[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(4): 663 - 666.  
CHEN Hang-yong, LI Xiang, GUO Gui-rong, JIANG Bin. Radar feature extraction of micro-precession ballistic missile warhead[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(4): 663 - 666. (in Chinese)
- [9] 冯德军. 导弹中段目标雷达识别与评估研究[D]. 湖南长沙: 国防科技大学研究生院, 2006, 4.  
FENG De-jun. Study on Radar Target Recognition and Its Evaluation in Ballistic Midcourse[D]. Changsha, Hunan: Graduate School of National University of Defense Technology, 2006, 4. (in Chinese)
- [10] 黄小红, 姜卫东. 空间目标 RCS 序列周期性判定与提取[J]. 航天电子对抗, 2005, 21(2): 29 - 30.
- [11] 王涛, 周颖, 王雪松, 肖顺平, 郭桂蓉. 雷达目标的章动特性与章动频率估计[J]. 自然科学进展, 2006, 16(3): 344 - 350.
- [12] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [13] W J Conover 著. 崔恒建译. 实用非参数统计分析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 207 - 224.

#### 作者简介:



魏玺章 男. 1976 年 4 月出生于河北吴桥. 1997 年、2002 年在国防科技大学分别获得微波工程专业工学学士、通信与信息系统专业工学博士学位. 其后在国防科技大学电子科学与工程学院空间电子信息技术研究所工作, 现为副教授, 硕士生导师, 从事雷达目标识别、目标特性等领域相关研究工作. E-mail: liweier@sina.com

姚辉伟 男. 1982 年 5 月出生于河南新乡. 2005 年、2007 年在国防科技大学分别获得通信工程专业工学学士、信息与通信工程工学硕士学位. 2008 年至今为国防科技大学博士生, 从事雷达目标识别、目标特性等领域相关研究工作. E-mail: pla0611@163.com

丁小峰 男. 1981 年出生于辽宁丹东. 2004 年、2006 年在国防科技大学分别获得通信工程专业工学学士、通信与信息系统工学硕士学位. 2007 年至今为国防科技大学博士生, 从事雷达目标识别、目标特性等领域相关研究工作.

黎湘 男. 1967 年 9 月出生于湖南浏阳. 教授, 博士生导师. 1989 年在西安电子科技大学获得电子工程专业工学学士学位, 1995 年、1998 年在国防科技大学分别获得通信与信息系统专业工学硕士和博士学位. 已发表学术论文 40 余篇, 目前主要从事精确制导、雷达信息处理、非线性信息处理等领域的研究工作.

(上接第 134 页)

- Jin Chen-hui. Analysis of a block cipher based on chaos[J]. Engineering Science, 2001, 3(6): 75 - 80. (in Chinese)
- [3] 金晨辉, 高海英. 对两个基于混沌的序列密码算法的分析[J]. 电子学报, 2004, 32(7): 1066 - 1070.  
Jin Chen-hui, Gao Hai-ying. Analysis of two stream ciphers based on chaos[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(7): 1066 - 1070. (in Chinese)
- [4] 金晨辉, 杨阳, 祁传达. 对混沌序列密码的相关密钥攻击[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(3): 410 - 414.  
Jin Chen-hui, Yang Yang, Qi Chuan-da. A related-key attack on chaotic stream ciphers[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(3): 410 - 414. (in Chinese)
- [5] 金晨辉, 杨阳. 对自同步混沌密码的分割攻击方法[J]. 电子学报, 2006, 34(7): 1337 - 1341.

- Jin Chen-hui, Yang Yang. A divide-and-conquer attack on self-synchronous chaotic ciphers[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(7): 1337 - 1341. (in Chinese)
- [6] 李树钧. 数字化混沌密码的分析与设计[D]. 陕西西安: 西安交通大学, 2003. 6.  
Li Shu-jun. Analyses and new designs of digital chaotic ciphers [D]. Xi'an, Shanxi: Xi'an Jiaotong University, 2003, 6. (in Chinese)
- [7] 廖旒焕, 高金峰. 广义映射混沌扩频序列及其特性分析[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(7): 1255 - 1257.  
Liao Ni-huan, Gao Jin-feng. The chaotic spreading sequences generated by the extended chaotic map and its performance analysis[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(7): 1255 - 1257. (in Chinese)