

空间进动目标微动参数估计方法

关永胜^{*①②} 左群声^③ 刘宏伟^① 杜兰^① 李彦兵^①

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国家级重点实验室 西安 710071)

^②(西安电子科技大学通信工程学院 西安 710071)

^③(中国电子科技集团公司 北京 100846)

摘要: 该文提出了基于窄带雷达估计空间进动目标微动参数的新方法。该方法首先依据进动目标回波信号的微多普勒特性,应用傅里叶变换对目标的进动参数进行粗估计;然后根据回波信号的时频谱特性,通过相干积累的方法得到目标的高分辨率 3 维分布。最后,利用图像熵的概念在特定范围内对微动参数进行搜索,获得了较高的估计精度。使用仿真数据验证了算法的性能,证明了参数估计的高精度。

关键词: 雷达目标识别; 参数估计; 空间进动目标; 进动; 图像熵

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)10-2427-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00117

Micro-motion Parameters Estimation of Space Precession Targets

Guan Yong-sheng^{①②} Zuo Qun-sheng^③ Liu Hong-wei^① Du Lan^① Li Yan-bing^①

^①(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^③(China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100846, China)

Abstract: A new method is proposed to estimate micro-motion parameters of space precession targets. Based on the micro-Doppler characteristic of a precession target, the Fourier transformation is applied to estimate precession parameters roughly. Then based on the time-frequency spectrum characteristic of the echo signal, coherent accumulation is applied to obtain a 3-D high resolution distribution of the target. The estimation accuracy of the parameters is refined by calculating the whole image entropy. Simulations results confirm the effectiveness of our proposed method.

Key words: Radar target recognition; Parameter estimation; Spatial precession targets; Precession; Image entropy

1 引言

空间锥体真假目标识别一直是雷达界研究的重点^[1]。目前,对空间锥体目标的识别主要存在以下几种方式:运动特征识别、成像识别和极化识别^[2]。近一段时间,随着对目标微动效应研究的深入,应用微动特征识别目标引起了研究人员的广泛关注^[3-6]。文献[5]指出进动是空间锥体目标的重要特征,有望为真假目标识别难题提供新的解决手段。因此进动参数(锥旋频率、自旋频率和进动角)的精确估计对于空间锥体目标识别具有重要意义。

目前应用窄带雷达估计进动目标微动参数的方法主要问题是需要预知目标结构的先验信息。文献

[7]采用锥体目标雷达散射截面(RCS)关于姿态角的近似解析公式得到了 RCS 调制的极值和 RCS 姿态角序列的关系,进而估计目标的进动参数,但该方法需通过高分辨 2 维成像的方法估计出目标的结构参数。文献[8]提出了估计进动参数的方法,但该方法同样需要预知目标尺寸等先验信息。

因此,在窄带雷达体制下,克服现有算法的限制并有效地提取进动目标微动参数是本文的重点。文中首先推导了进动目标回波相位随时间变化的规律,利用傅里叶变换对目标的进动参数进行粗估计;然后在目标微动参数空间进行搜索,利用相干积累的方法对目标的 2 维时频谱密度函数进行重构得到目标的高分辨率 3 维分布,进而应用计算图像熵的方法求解进动目标的进动参数,提高了估计精度。该方法不需要预知目标的结构参数以及不依赖于单个散射点,具有较强的应用性。

2011-02-17 收到, 2011-06-03 改回

长江学者和创新团队发展计划(IRT0954)和国家自然科学基金(60772140, 60901067)资助课题

*通信作者: 关永胜 ysguan1213@163.com

2 进动目标特性分析

给定进动模型如图1所示, 设目标在空间的姿态用图1直角坐标系来表示。目标在坐标系 (X, Y, Z) 内绕其自身对称轴 OZ 自旋的同时绕矢量 OC 锥旋, OZ 与 OC 相交于点 O 且夹角为 Θ_c 。 ζ 为雷达到目标坐标系原点的单位矢量, 雷达视线的方向角和俯仰角分别为 α 和 β 。 ω_r 为自旋角频率, ω_c 为锥旋角频率, 进动角为 Θ_c 。根据刚体动力学, 目标的飞行方向与进动轴 OC 一致。

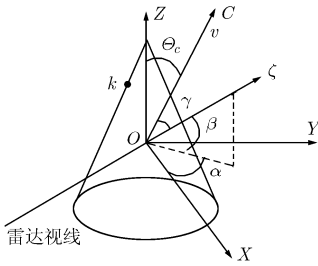


图1 目标进动示意图

在时刻 τ , 雷达接收到目标上点 k 的单个距离单元横向回波的基带信号为

$$s_k(\tau) = A_k \exp(-j4\pi R_k(\tau)/\lambda) \quad (1)$$

式中 A_k 为散射强度, λ 为发射波长, τ 为横向采样时间, $R_k(\tau)$ 为散射点 k 与雷达之间的瞬时斜距距离。如图1所示, 点目标的距离函数可以写为

$$R_k(\tau) = R_0 + v\tau \cos(\gamma) + r_k(\tau) \quad (2)$$

式中 γ 为目标飞行速度与雷达视线的夹角, R_0 为雷达距目标中心 O 的初始距离, 为一常量, v 为目标的飞行速度。根据锥体目标的进动模型有

$$\begin{aligned} r_k(\tau) \approx & a_1 \cos(\omega_c \tau) \cos(\omega_r \tau) + a_2 \sin(\omega_c \tau) \sin(\omega_r \tau) \\ & + a_3 \cos(\omega_c \tau) \sin(\omega_r \tau) + a_4 \sin(\omega_c \tau) \cos(\omega_r \tau) \\ & + a_5 \sin(\omega_c \tau) + a_6 \sin(\omega_r \tau) + a_7 \cos(\omega_r \tau) \\ & + a_8 \cos(\omega_c \tau) + a_9 \\ = & b_1 \cos(\omega_c \tau - \omega_r \tau) + b_2 \cos(\omega_c \tau + \omega_r \tau) \\ & + b_3 \sin(\omega_c \tau + \omega_r \tau) + b_4 \sin(\omega_c \tau - \omega_r \tau) \\ & + b_5 \sin(\omega_c \tau) + b_6 \sin(\omega_r \tau) \\ & + b_7 \cos(\omega_r \tau) + b_8 \cos(\omega_c \tau) + b_9 \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} a_1 &= X_0 \cos(\alpha) \cos(\beta) + Y_0 \cos^2(\Theta_c) \sin(\alpha) \cos(\beta) \\ &\quad - Y_0 \sin(\Theta_c) \cos(\Theta_c) \sin(\beta) \\ a_2 &= -X_0 \cos(\Theta_c) \cos(\alpha) \cos(\beta) - Y_0 \cos(\Theta_c) \sin(\alpha) \\ &\quad \cdot \cos(\beta) + Y_0 \sin(\Theta_c) \sin(\beta) \\ a_3 &= -Y_0 \cos(\alpha) \cos(\beta) + X_0 \cos^2(\Theta_c) \sin(\alpha) \cos(\beta) \\ &\quad - X_0 \sin(\Theta_c) \cos(\Theta_c) \sin(\beta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_4 &= -Y_0 \cos(\Theta_c) \cos(\alpha) \cos(\beta) + X_0 \cos(\Theta_c) \sin(\alpha) \\ &\quad \cdot \cos(\beta) - X_0 \sin(\Theta_c) \sin(\beta) \end{aligned}$$

$$a_5 = Z_0 \sin(\Theta_c) \cos(\alpha) \cos(\beta)$$

$$\begin{aligned} a_6 &= X_0 \sin^2(\Theta_c) \sin(\alpha) \cos(\beta) + X_0 \sin(\Theta_c) \\ &\quad \cdot \cos(\Theta_c) \sin(\beta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_7 &= Y_0 \sin^2(\Theta_c) \sin(\alpha) \cos(\beta) + Y_0 \sin(\Theta_c) \\ &\quad \cdot \cos(\Theta_c) \sin(\beta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_8 &= -Z_0 \sin(\Theta_c) \cos(\Theta_c) \sin(\alpha) \cos(\beta) \\ &\quad + Z_0 \sin^2(\Theta_c) \sin(\beta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_9 &= Z_0 \sin(\Theta_c) \cos(\Theta_c) \sin(\alpha) \cos(\beta) \\ &\quad + Z_0 \cos^2(\Theta_c) \sin(\beta) \end{aligned}$$

$$b_1 = (a_1 + a_2)/2, \quad b_2 = (a_1 - a_2)/2$$

$$b_3 = (1/2)(a_3 + a_4)/2, \quad b_4 = (a_4 - a_3)/2, \quad b_5 = a_5$$

$$b_6 = a_6, \quad b_7 = a_7, \quad b_8 = a_8, \quad b_9 = a_9$$

由于空间锥体目标进动角不大, 因此有 $b_1 \approx 0$, $b_4 \approx 0$ 。式中 (X_0, Y_0, Z_0) 为点 k 在坐标系 (X, Y, Z) 内的初始位置。若目标的平动分量得到了很好的补偿, 式(2)距离函数变化只有进动分量 $r_k(\tau)$, 则平动补偿后的信号为

$$s_k(\tau) = A_k \exp(-j4\pi r_k(\tau)/\lambda) \quad (4)$$

微多普勒为

$$f_{mD,k}(\tau) = -\frac{2d(r_k(\tau))/d\tau}{\lambda} \quad (5)$$

在高频近似的情况下, 目标呈现光学区散射特性, 目标散射特性可以由散射点中心模型近似。若散射点数目为 K , 回波可以表示为

$$s(\tau) = \sum_{k=1}^K A_k \exp(-j4\pi r_k(\tau)/\lambda) \quad (6)$$

3 微动参数提取方法

3.1 进动参数的初值估计方法

对于空间锥体进动目标而言, 观察式(3)和式(5)可知, 回波信号的微多普勒频率是时间的函数, 该频率的变化曲线是由角频率分别为 ω_r , ω_c 以及 $\omega_c + \omega_r$ 的3种正弦曲线叠加而成。如果能够抽取回波信号的微多普勒频率, 再对该频率进行谱分析, 则可以抽取 ω_r , ω_c , $\omega_c + \omega_r$ 。因此如何抽取回波信号的微多普勒频率是面临的首要问题。为便于分析, 本文运用短时傅里叶变换对信号进行时频分析, 式(4)做短时傅里叶变换有

$$\begin{aligned} S_k(\tau, f) &= \int_{-\Delta\tau}^{\Delta\tau} A_k \exp\left[-j\frac{4\pi r_k(\tau + \tau')}{\lambda}\right] \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi f(\tau' + \tau)) d\tau' \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $w(\tau) = \begin{cases} 1, & -\Delta\tau \leq \tau \leq \Delta\tau \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ 为时间窗函数。式

中由于窗函数的宽度相对很小，可将 $r_k(\tau + \tau')$ 一阶泰勒展开为 $r_k(\tau + \tau') = r_k(\tau) + r'_k(\tau)\tau'$ ，代入式(7)，则可得信号的时频表达式为

$$S_k(\tau, f) = 2\Delta\tau A_k \exp(-jKr_k(\tau)) \exp(-j2\pi f\tau) \cdot \text{sinc}[2\pi\Delta\tau(f - f_{mD,k}(\tau))] \quad (8)$$

式中 $K = 4\pi f_c / \lambda$ 。对于空间锥体目标而言，由于散射点的位置不同，如下不等式成立： $f_{mD,m}(\tau) \neq f_{mD,n}(\tau) (m, n = 1, \dots, N; m \neq n)$ 。回波信号的谱图可以表示为

$$|S(\tau, f)|^2 = \sum_{k=1}^N |S_k(\tau, f)|^2 + 2 \sum_{m,n=1; m \neq n}^N |S_m(\tau, f)| |S_n(\tau, f)| \cdot \cos(Kr_m(\tau) - Kr_n(\tau)) \quad (9)$$

根据文献[9]，信号的瞬时频率为时频分布的一阶矩：

$$f(\tau) = \frac{\int f |S(\tau, f)|^2 df}{\int |S(\tau, f)|^2 df} \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)，有

$$f(\tau) = \frac{1}{|A|^2} \left(4\Delta\tau^2 A_k^2 \sum_{k=1}^N f_{mD,k}(\tau) \right) \quad (11)$$

应用式(11)计算目标的瞬时频率等于目标各散射点微多普勒频率的线性叠加，通过对 $f(\tau)$ 进行谱分析，可以得到 $\omega_r, \omega_c, \omega_c + \omega_r$ 。根据 $\omega_c + \omega_r > \omega_r > \omega_c$ 的先验知识，确定目标的自旋频率与锥旋频率的初始值，记为 $\hat{\omega}_{r1}, \hat{\omega}_{c1}$ 。此时估计目标进动频率与锥旋频率的精度受积累时间及时频分布分辨率的影响。为了提高估计精度，必须进行精估计。

3.2 进动参数的最优值估计方法

应用 3.1 节估计的初值，结合雷达参数以及目标观测时间确定最大估计误差为 $\Delta\omega_c$ 与 $\Delta\omega_r$ ，从区间 $[\hat{\omega}_{c1} - \Delta\omega_c, \hat{\omega}_{c1} + \Delta\omega_c], [\hat{\omega}_{r1} - \Delta\omega_r, \hat{\omega}_{r1} + \Delta\omega_r]$ 以及 $[\theta_{c1}, \theta_{c2}]$ 中搜索各参数，实现精估计。 $[\theta_{c1}, \theta_{c2}]$ 可以借助其他方法获得或在目标进动角度的可能范围内(进动角一般在十几度以内)搜索。令 $\hat{\omega}_c \in [\hat{\omega}_{c1} - \Delta\omega_c, \hat{\omega}_{c1} + \Delta\omega_c], \hat{\omega}_r \in [\hat{\omega}_{r1} - \Delta\omega_r, \hat{\omega}_{r1} + \Delta\omega_r]$ 以及 $\hat{\theta}_c \in [\theta_{c1}, \theta_{c2}]$ ，对于目标上任一点 (X, Y, Z) ，根据式(3)与式(11)可以得到该点距离与微多普勒频率的估计值为 $\hat{r}(\tau)$ 与 \hat{f} 。将式(8)乘以相位补偿因子 $\exp\left(j4\pi \frac{\hat{r}(\tau)}{\lambda}\right) \exp(j2\pi \hat{f}\tau)$ ，然后按时间进行累加可以得到该点的散射强度为

$$P(X, Y, Z) = \int S_k(\tau, \hat{f}) \exp\left(j4\pi \frac{\hat{r}(\tau)}{\lambda}\right) \exp(j2\pi \hat{f}\tau) d\tau = 2\Delta\tau A_k \int \text{sinc}[2\pi\Delta\tau(\hat{f} - f_{mD}(\tau))] d\tau \quad (12)$$

观察式(12)可知，该方法利用了时频谱的幅度分布与相位分布，是一种相干积累的过程。因此，对于点 (X_0, Y_0, Z_0) 而言，如果搜索的参数与真实值相符，那么积分路径与目标进动引起的时频曲线重合，式(12)中多个分量随时间相干积累，则 $P(X, Y, Z)$ 将该点的能量聚集于一点，图像对比度将达到最大值；若估计值 $(\hat{\omega}_c, \hat{\omega}_r, \hat{\theta}_c)$ 与真实值不相符，式(12)中各相位分量不同，会出现相互抵消的现象，因而信号的能量不能正确聚焦，图像的对比度不高。文中引入图像熵的概念来衡量能量的聚焦程度。目标参数估计值的定义如下：

$$\left. \begin{aligned} (\hat{\omega}_c, \hat{\omega}_r, \hat{\theta}_c) &= \arg \left\{ \min_{\hat{\omega}_c, \hat{\omega}_r, \hat{\theta}_c} \left\{ H(\hat{\omega}_c, \hat{\omega}_r, \hat{\theta}_c) \right\} \right\} \\ \text{s.t. } H(\hat{\omega}_c, \hat{\omega}_r, \hat{\theta}_c) &= - \sum_x \sum_y \sum_z |P(x, y, z)| \ln |P(x, y, z)| \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

观察式(13)可知，式(13)的搜索空间是在 3.1 节粗估计的基础之上根据估计精度确定的。经过 3.1 节的粗估计，搜索空间大大变小，计算复杂度随之降低，可以应用遍历搜索。

3.3 算法实现步骤

基于 3.1 节与 3.2 节的分析，本文提出空间进动目标微动特征提取的方法如下：

(1) 对回波信号进行平动补偿，应用短时傅里叶变换计算回波信号的时频分布，记为 $S(\tau, f)$ ；

(2) 计算回波信号的瞬时频率，并通过傅里叶变换计算其频谱。抽取目标的 3 个极大峰值，根据 $\omega_c + \omega_r > \omega_r > \omega_c$ 确定目标的自旋频率以及锥旋频率。将该值作为初始估计值，记为 $\hat{\omega}_{r1}, \hat{\omega}_{c1}$ 。设定目标的参数搜索空间为 $[\hat{\omega}_{c1} - \Delta\omega_c, \hat{\omega}_{c1} + \Delta\omega_c], [\hat{\omega}_{r1} - \Delta\omega_r, \hat{\omega}_{r1} + \Delta\omega_r], [\theta_{c1}, \theta_{c2}]$ 。其中 $\Delta\omega_c = 2\pi/T, \Delta\omega_r = 2\pi/T, T$ 为信号积累时间。

(3) 根据式(12)计算不同参数下各散射点 (X, Y, Z) 的散射点强度，计算图像熵，根据式(13)确定最优估计参数： $\hat{\omega}_r, \hat{\omega}_c, \hat{\theta}_c$ 。

3.4 算法分析

式(12)具有全新的物理意义，它基于目标稳定进动的情况下，信号的回波相位随散射点的位置按特定规律变化这一事实，应用时频谱进行相干积累对目标散射点的信号进行聚焦。式(13)利用图像熵准则对参数进行精估计。对于该方法有以下分析与

结论: (1)该方法不依赖于目标结构的先验知识,各参数估计值的估计精度仅依赖于搜索空间的精度,与其他参数的估计精度无关;(2)计算图像的熵值时考虑到了目标所有可能存在的散射点,因而使得该方法更加的稳健;(3)该方法分别应用粗估计以及精估计对目标的进动参数进行估计,3.1节的粗估计方法估计精度低,但是该方法具有计算速度快的优点;3.2节的方法估计精度取决于搜索的步长,但是该方法计算量与搜索空间的范围密切相关,因此二者联合应用平衡了计算速度与计算精度。

4 仿真计算及结果分析

仿真中,雷达工作在 X 波段,中心频率为 10 GHz,发射线性调频信号,带宽为 1 MHz。脉冲重复频率为 1000 Hz,波束驻留时间为 2 s。目标散射点模型如图 2 所示,散射点位于: (0,0,1.7) m, (-0.5,0,-0.3) m, (0.5,0,-0.3) m, (0,-0.5,-0.3) m, (0,0.5,-0.3) m。初始相位在 $[0,2\pi]$ 范围内服从均匀分布。

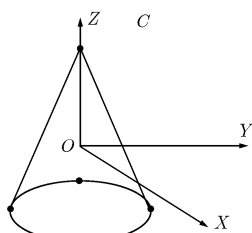


图2 目标散射点模型

4.1 算法流程仿真结果分析

为测试算法的性能,本节对算法的各步仿真结果进行详细的分析。目标的微动参数为:自旋角频率为 5.2π rad/s,锥旋角频率为 3.2π rad/s,进动角为 10° 。

图3为回波的时频分布。图4给出了目标微动参数的初始估计值。从图4可以看出,信号的微多

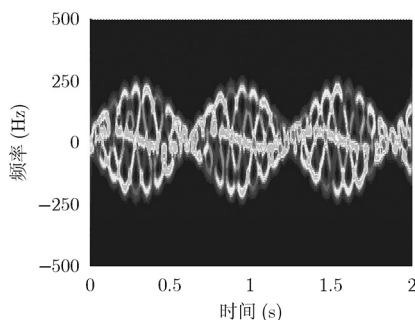


图3 时频分布图

普勒由3个频率分量构成,分别为1.5 Hz, 2.5 Hz以及4 Hz。与之对应的 $\hat{\omega}_{c1}$, $\hat{\omega}_{r1}$, 以及 $\hat{\omega}_{c1} + \hat{\omega}_{r1}$ 分别为 9.42 rad/s, 15.71 rad/s, 25.13 rad/s。因此得到目标锥旋角频率与自旋角频率的初始估计值分别为 9.42 rad/s 与 15.71 rad/s。

图5给出了图像熵随微动参数的变化情况。图5(a)为图像熵随目标锥旋角频率的变化曲线。从图中可见,图像熵在极小值 7.63 处时,锥旋角频率为 10.05 rad/s,与真实值接近。图5(b)为图像熵随目标自旋角频率的变化曲线。从图中可见,当图像熵在极小值 7.63 处时,自旋角频率为 16.34 rad/s,与真实值接近。图5(c)为图像熵随目标进动角的变化曲线。从图中可见,当图像的熵得到极小值为 7.63,与目标的真实的进动角一致。

通过以上分析可以看出,估计值越接近真值,散射点的聚焦性能越好,图像熵越小。同时参数估计的精度取决于搜索空间以及搜索步长。因此,通过式(13)搜索目标的最小熵值,得到该熵值对应于目标微动参数的估计值为 $(\hat{\omega}_c, \hat{\omega}_r, \hat{\theta}_c) = (10.05 \text{ rad/s}, 16.34 \text{ rad/s}, 10^\circ)$ 。

4.2 参数与噪声对算法性能的影响

本节的目的是测试微动参数以及噪声对算法性能的影响。

表1给出了在 SNR=10 dB 时,对于不同微动参数的估计结果。从表1仿真结果可以看出,在 SNR=10 dB 情况下,对于不同的微动参数,应用本文方法均能够精确估计出目标的微动参数。噪声为加性高斯白噪声。

为了检验本文方法对噪声的稳健性,本文在不同信噪比条件下进行了仿真。表2给出了不同信噪比条件下的微动参数估计结果,表3给出了不同信噪比条件下的微动参数估计结果的均方误差(MSE)。噪声为加性高斯白噪声。

分析表2与表3可以看出,信噪比在 25 dB 至 -5 dB 区间内,随着信噪比的减小,参数估计结果

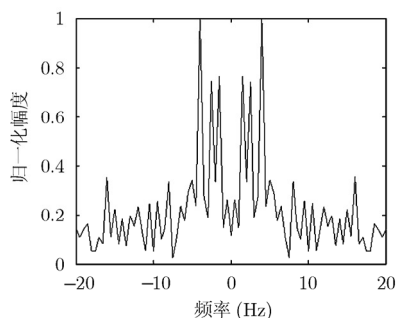


图4 目标微动参数的初始估计值

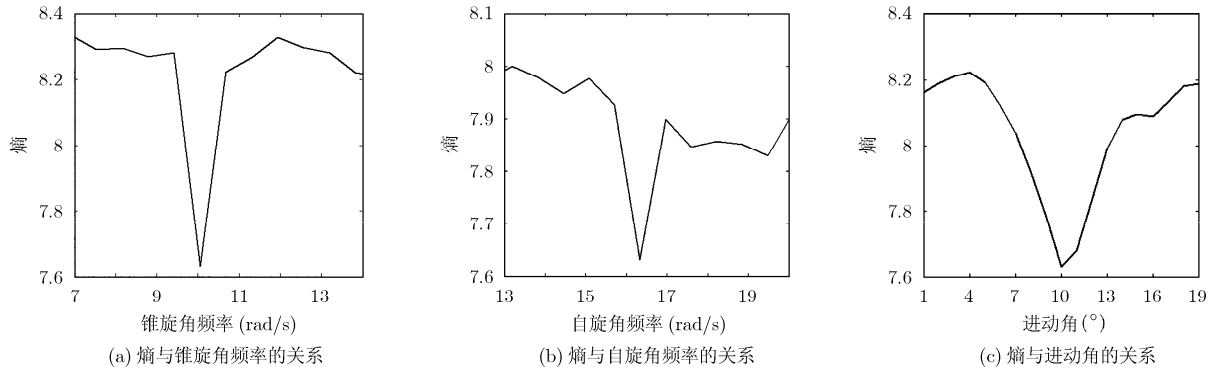


图 5 图像熵随锥旋角频率、自旋角频率以及进动角的变化情况

表 1 不同微动参数的估计结果(SNR=10 dB)

真值(rad/s, rad/s, °)	$[3.2\pi, 5.2\pi, 8]$	$[4.2\pi, 9.2\pi, 10]$	$[6.8\pi, 11.4\pi, 10]$	$[10\pi, 14\pi, 15]$
精估计值(rad/s, rad/s, °)	$[10.05, 16.33, 8]$	$[13.19, 28.90, 10]$	$[31.68, 35.81, 10]$	$[31.41, 43.98, 15]$

表 2 不同噪声环境下的微动参数估计结果(参数为 $[3.2\pi(\text{rad/s}), 5.2\pi(\text{rad/s}), 10^\circ]$)

SNR(dB)	25	20	15	10	5	0	-5
$\hat{\omega}_c$ (rad/s)	10.05	10.05	10.05	10.05	10.05	10.05	10.05
$\hat{\omega}_r$ (rad/s)	16.33	16.33	16.33	16.33	16.33	16.33	16.33
$\hat{\theta}$ (°)	10	10	10	10	10	10	10

表 3 不同噪声环境下的微动参数估计结果的 MSE(参数为 $[3.2\pi(\text{rad/s}), 5.2\pi(\text{rad/s}), 10^\circ]$)

MSE	SNR(dB)						
	25	20	15	10	5	0	-5
$\hat{\omega}_c$	0.0050	0.0074	0.0099	0.0134	0.0173	0.0248	0.0397
$\hat{\omega}_r$	0.0045	0.0089	0.0099	0.0139	0.0178	0.0238	0.0387
$\hat{\theta}$	0.0452	0.0904	0.1005	0.1407	0.1808	0.2411	0.3920

的 MSE 也随之变大，但均可以得到较准确的结果。这是由于本文方法应用了时频分析、傅里叶变换以及在时频平面进行相干积分，因而可以得到在强噪声条件下的鲁棒性。同时也可以发现，在不同的信噪比条件下，对于自旋频率与锥旋频率以及进动角的估计均相等，这是由搜索空间的精度所决定。

5 结束语

本文提出一种估计进动目标微动参数的新方法，该方法首先计算目标的回波信号的瞬时频率，应用傅里叶变换获得自旋角频率与锥旋角频率的估计初值，并通过最小图像熵的方法估计微动参数的精确值。该方法不依赖于目标的结构信息。仿真结果证实了该方法具有良好的抗噪声性能。在实际应

用过程中，由于目标可能存在不是稳定运动的情况，还有待于进一步的研究更加复杂运动目标参数估计与识别问题。

参考文献

[1] 黄培康. 反导弹系统中的目标识别技术[J]. 战略防御, 1985, 5: 1-14.

[2] 陈建文, 倪晋麟. 弹道导弹的雷达目标识别技术[C]. 第八届全国雷达学术年会, 合肥, 2002: 185-188.

[3] 朱仁飞, 张群, 罗迎, 等. 含旋转部件目标双基地 ISAR 微动特征提取及成像研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(10): 2359-2364.

Zhu Ren-fei, Zhang Qun, Luo Ying, et al. Study on micro-motion feature extraction and imaging of target with rotating parts in bistatic ISAR [J]. *Journal of Electronics &*

- Information Technology*, 2010, 32(10): 2359-2364.
- [4] Lei P, Wang J, and Sun J. Analysis of radar micro-Doppler signatures from rigid targets in space based on inertial parameters[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(2): 93-102.
- [5] Rihaczek A W and Hershkowitz S J. Radar Resolution and Complex-image Analysis[M]. Boston: Artech House, 1996: 24-155.
- [6] Cai Cheng-jie, Liu Wei-xian, Fu Jeffrey, *et al.* Radar micro-Doppler signature analysis with HHT[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(2): 929-938.
- [7] 陈行勇, 黎湘, 郭桂荣, 等. 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): 643-646.
Cheng Hang-yong, Li Xiang, Guo Gui-rong, *et al.* Radar feature extraction of micro-precession ballistic missile warhead[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(4): 643-646.
- [8] 李康乐, 姜卫东, 黎湘. 弹道目标微动特征分析与提取方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(1): 115-118.
Li Kang-le, Jiang Wei-dong, and Li Xiang. Micro-motion feature analysis and extraction methods for ballistic targets[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(1): 115-118.
- [9] Lovell B C, Williamson R C, and Boashash B. The relationship between instantaneous frequency and time-frequency representations[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(3): 1458-1461.
- 关永胜: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为雷达自动目标识别.
左群声: 男, 1957 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为新体制雷达、雷达系统总体设计与实现等.
刘宏伟: 男, 1971 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、雷达自动目标识别等.