

基于瞬时频率估计的进动锥体目标微多普勒频率提取方法

曹文杰 张磊 杜兰* 刘宏伟

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文针对进动锥体目标的微动特性提取,建立等效散射点模型下的微多普勒频率与目标运动参数关系。结合进动调制的微多普勒频率近似正弦变化规律的特点,提出基于瞬时频率估计和随机抽样一致性(RANSAC)的进动目标微多普勒频率提取方法。该方法将回波信号分为若干段,每一段的回波信号近似为若干线性调频(LFM)信号分量之和,通过调频 Relax 算法估计各信号分量的瞬时频率,并通过随机抽样一致性算法估计散射点的微多普勒曲线。基于仿真数据和电磁计算数据的实验验证了该方法的有效性及其稳健性。

关键词: 目标识别; 进动目标; 微多普勒频率; 线性调频信号; 随机抽样一致性

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)05-1091-06

DOI: 10.11999/JEIT140985

Micro-Doppler Frequency Extraction for Cone-shaped Target with Precession Based on Instantaneous Frequency Estimation

Cao Wen-jie Zhang Lei Du Lan Liu Hong-wei

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

Abstract: Based on the equivalent scatter point model, the relationship between the micro-Doppler frequencies and the motion parameters of the cone-shaped target with precession is established. Due to the approximately sinusoidal form of the micro-Doppler frequency modulation induced by the precession, an approach to extract the micro-Doppler frequency of the target with precession based on the instantaneous frequency estimation and the RANdom SAmple Consensus (RANSAC) is proposed. In this method, the target echo signal is first divided into several segments. Then each segment of the echo signal approximates to the sum of several components of the Linear Frequency Modulation (LFM) signal, and an algorithm based on the extended Relax method is used to estimate the instantaneous frequency of the each LFM signal. Thus the micro-Doppler curve of each equivalent scatter point is estimated by the RANSAC algorithm. In the simulation experiments, the performance of the proposed method is evaluated via the simulation data and electromagnetic computation simulation data.

Key words: Target recognition; Target with precession; Micro-Doppler frequency; Linear Frequency Modulation (LFM) signal; RANdom SAmple Consensus (RANSAC)

1 引言

弹头等锥体目标在大气层外飞行时,为了保持姿态的稳定性,在绕自身对称轴自旋的同时还会绕空间某一定向轴进行锥旋,这种运动形式被称为进动。文献[1]最早将进动定义为微动的一种,并且将由微动产生的雷达回波的多普勒调制命名为微多普勒效应。由于微多普勒特性反映目标的电磁散射特性、几何结构和运动特性^[2],微多普勒特征已经成为弹道导弹目标分类识别的重要特征^[3-5]。而从雷达回波中准确提取微多普勒频率是微动参数估计和特

征提取的关键,一些基于微多普勒的运动与结构参数估计方法也随之产生,如文献[6-8]。

现有的瞬时多普勒频率估计方法大致可以分为非参数化方法和参数化方法两类。非参数化方法不需要任何参数化模型或者参数化方程,一般首先计算信号的时频分布,然后通过跟踪时频分布图中的峰值来得到频率随时间的变化。文献[9]提出一种在时频分布(Time Frequency Distribution, TFD)的基础上,利用多目标跟踪(Multiple Target Tracking, MTT)技术分离空间锥体目标各等效散射中心微多普勒频率变化曲线的方法。针对 TFD 方法通常存在时频分辨率偏低和噪声敏感等不足,国内外学者提出了一系列基于参数化模型的瞬时多普勒频率估计方法。参数化方法需要利用信号的先验信息建立一

2014-07-23 收到, 2014-12-09 改回

国家自然科学基金(61271024, 61322103, 61301280)和全国优秀博士学位论文作者专项资金(FANEDD-201156)资助课题

*通信作者: 杜兰 dulan@mail.xidian.edu.cn

个多参数模型来描述信号，然后利用数据对模型进行拟合估计模型参数。文献[10]利用时变自回归模型估计非平稳信号的瞬时多普勒频率，该方法首先用 p 阶时变自回归模型来表示信号分量的瞬时频率变化，利用回波数据拟合获得模型时变参数，然后根据信号功率谱密度极点位置实现对多信号分量的瞬时多普勒频率估计。实际应用中，参数化模型通常存在模型阶数选择以及参数耦合等问题，进动目标微动参数的估计是较为困难的。本文针对表面光滑的锥体目标，提出了一种基于瞬时频率估计的微多普勒频率提取方法，不直接对微动特性预先建模，而将回波分段后信号近似为若干散射点对应的线性调频信号分量的叠加，通过估计出各个线性调频信号的瞬时频率，然后利用随机抽样一致性进行模型拟合获得不同散射点的微多普勒频率曲线。

本文的结构如下：第 2 节建立了锥体目标的等效散射点模型，在此基础上对目标进动时各散射点瞬时微多普勒频率的变化情况进行了推导；第 3 节利用多分量线性调频信号对分段后的回波信号进行近似，用调频 Relax 算法对每一个线性调频信号分量的瞬时频率做参数估计，对估计出来的瞬时频率用随机抽样一致性算法进行区分，得到目标微多普勒频率的估计曲线。第 4 节采用仿真数据与电磁计算数据进行了仿真实验；实验结果验证了本方法的有效性和稳健性；第 5 节总结了全文。

2 锥体目标微多普勒分析

2.1 等效散射点模型

锥体目标的示意图如下，其中 H 为锥体目标高度， h 为质心到底面的距离， r 为底面圆半径， γ 为半锥角， ϑ 为雷达视线(radar Line Of Sight, rLOS)与锥体对称轴夹角。

对于无尾翼的光滑锥体目标，一般认为有 3 个散射点在起作用，分别是锥顶 P_3 以及底部边缘上的两点 P_1, P_2 ，其中 P_1, P_2 为雷达视线与目标对称轴所确定的平面与底面边缘的交点^[11]。为区别一般散

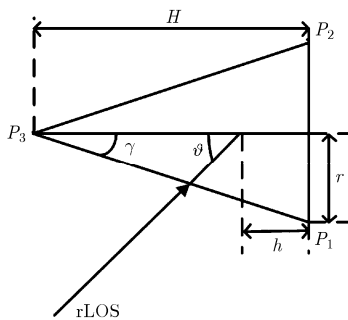


图 1 锥体目标的示意图

射点概念，称 P_1, P_2 为等效散射点，此时的目标模型为等效散射点模型。

在锥体目标飞行过程中，由于存在遮挡效应，使得一些散射点无法被雷达波照射到，散射点的遮挡效应由姿态角 ϑ 与锥体目标的半锥角 γ 共同决定。当 ϑ 从 0 到 π 变化时， P_1, P_2, P_3 的遮挡情况如表 1 所示。

表 1 不同姿态角下各散射点遮挡情况

ϑ	$[0, \gamma)$	$[\gamma, \pi/2]$	$(\pi/2, \pi - \gamma)$	$[\pi - \gamma, \pi]$
P_1	N	N	N	N
P_2	N	Y	N	N
P_3	N	N	N	Y

注：Y 表示遮挡，N 表示不遮挡

从表 1 可以看出，点 P_1 总是不被遮挡，点 P_2 在 $\gamma \leq \vartheta \leq \pi/2$ 时被遮挡，而点 P_3 在 $\pi - \gamma \leq \vartheta \leq \pi$ 时被遮挡。

2.2 进动模型

建立目标进动模型如图 2 所示。以锥旋轴为 Z 轴建立参考坐标系 $OXYZ$ ，其中 O 为锥体目标质心。雷达视线 rLOS 在 YOZ 平面内，与锥旋轴的夹角(平均视线角)为 β ；目标进动，除绕自身对称轴以角速度 ω_s 旋转外，还绕锥旋轴以角速度 ω_c 做锥旋运动，锥旋轴与目标对称轴的夹角为 θ 。在目标运动过程中建立新坐标系 $Ox_n Y_n Z_n$ ， Z_n 轴为锥体对称轴， X_n 轴垂直于雷达视线与锥体对称轴所确定的平面， Y_n 轴由右手定则确定。设目标高度为 H ，质心距底面距离为 h ，底面圆半径为 r ，则 3 个散射点在新坐标系下的位置矢量分别为 $P_1 = (0, -r, -h)^T$ ， $P_2 = (0, r, -h)^T$ 和 $P_3 = (0, 0, H - h)^T$ 。

雷达视线在参考坐标系 $OXYZ$ 的单位矢量为：

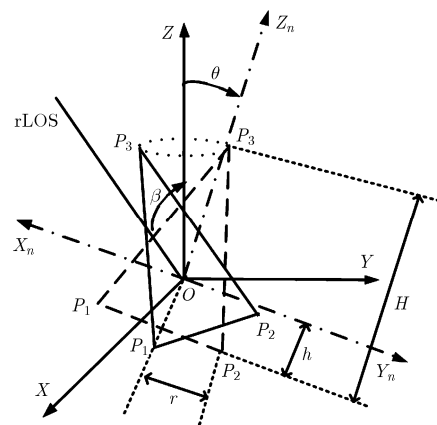


图 2 进动模型

$\mathbf{n} = [0 \ \sin \beta \ -\cos \beta]^T$ ，初始时刻锥体对称轴方向的单位矢量为： $\mathbf{z}_0 = [0 \ \sin \theta \ \cos \theta]^T$ ，在任意时刻 t ，锥体对称轴方向的单位矢量为

$$\mathbf{Z}_n(t) = \mathbf{M}(t)\mathbf{z}_0 \quad (1)$$

其中， $\mathbf{M}(t)$ 表示目标的进动矩阵。由于光滑锥体目标为旋转对称体，因此其自旋运动并不影响电磁波的散射特性，本文将忽略自旋运动而仅考虑锥旋运动。由文献[12,13]，可知锥旋旋转矩阵为

$$\mathbf{M}(t) = \begin{bmatrix} \cos(\omega_c t) & -\sin(\omega_c t) & 0 \\ \sin(\omega_c t) & \cos(\omega_c t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.3 各散射点瞬时微多普勒频率变化分析

在任意时刻 t ，锥体目标对称轴方向与雷达视线夹角 $\varepsilon(t)$ 的余弦为

$$\cos(\varepsilon(t)) = \langle \mathbf{Z}_n(t), \mathbf{n} \rangle \quad (3)$$

其中， $\langle \mathbf{Z}_n(t), \mathbf{n} \rangle$ 表示矢量 $\mathbf{Z}_n(t)$ 与矢量 \mathbf{n} 的点乘。

由 2.2 节可知，雷达视线始终在新坐标系中的 $Y_n O Z_n$ 平面内，雷达视线在新坐标系 $O X_n Y_n Z_n$ 中的单位矢量为： $\mathbf{n}'(t) = [0 \ \sin(\varepsilon(t)) \ \cos(\varepsilon(t))]^T$ 。

由式(3)可得锥体目标对称轴方向与雷达视线夹角 $\varepsilon(t)$ 的正弦为

$$\begin{aligned} \sin(\varepsilon(t)) &= (1 - \cos^2(\varepsilon(t)))^{1/2} \\ &= \left[1 - (-\cos \theta \cos \beta + \sin \theta \sin \beta \cos(\omega_c t))^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

本文对式(4)引入近似：

$$\begin{aligned} \sin(\varepsilon(t)) &= \left[1 - (-\cos \theta \cos \beta + \sin \theta \sin \beta \cos(\omega_c t))^2 \right]^{1/2} \\ &\approx \left[1 - \cos^2 \theta \cos^2 \beta + 2 \sin \theta \cos \theta \sin \beta \cos \beta \cos(\omega_c t) \right]^{1/2} \\ &= (1 - \cos^2 \theta \cos^2 \beta)^{1/2} \\ &\quad \cdot \left[1 + \frac{2 \sin \theta \cos \theta \sin \beta \cos \beta \cos(\omega_c t)}{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \beta} \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (5)$$

在式(5)第 2 个等式中，由于进动角一般不超过 10° ，所以忽略了 $\sin^2 \theta \sin^2 \beta \cos^2(\omega_c t)$ 的影响。当 $\frac{2 \sin \theta \cos \theta \sin \beta \cos \beta \cos(\omega_c t)}{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \beta}$ 足够小时，将式(5)第 3 个等式中的第 2 个根式用泰勒级数展开后取一次项，得到

$$\begin{aligned} \sin(\varepsilon(t)) &\approx \sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \beta} \\ &\quad + \frac{\sin \theta \cos \theta \sin \beta \cos \beta}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \beta}} \cos(\omega_c t) \end{aligned} \quad (6)$$

任意时刻 t ，散射点 P_i 在雷达视线上的投影可以表示为

$$r_i(t) = \langle \mathbf{n}'(t), \mathbf{P}_i \rangle \quad (7)$$

其中， $\langle \mathbf{n}'(t), \mathbf{P}_i \rangle$ 表示雷达视线在新坐标系 $O X_n Y_n Z_n$ 中的单位矢量 $\mathbf{n}'(t)$ 与点 P_i 的位置矢量 \mathbf{P}_i 的点乘。

散射点 P_i 的微多普勒频率为

$$fd_i(t) = \frac{2}{\lambda} \frac{dr_i(t)}{dt} \quad (8)$$

通过式(8)可得 P_1, P_2 和 P_3 3 个散射点的瞬时微多普勒频率公式，其中 λ 为雷达波长。

$$\begin{aligned} fd_1(t) &= \frac{2}{\lambda} \omega_c \left\{ h \sin \theta \sin \beta + r \frac{\sin \theta \cos \theta \sin \beta \cos \beta}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \beta}} \right\} \\ &\quad \cdot \sin(\omega_c t) \\ fd_2(t) &= \frac{2}{\lambda} \omega_c \left\{ h \sin \theta \sin \beta - r \frac{\sin \theta \cos \theta \sin \beta \cos \beta}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \beta}} \right\} \\ &\quad \cdot \sin(\omega_c t) \\ fd_3(t) &= -\frac{2}{\lambda} (H - h) \omega_c \sin \theta \sin \beta \sin(\omega_c t) \end{aligned} \quad (9)$$

3 微多普勒提取

由上节的理论推导可以看出，各散射点的瞬时微多普勒频率随时间是按正弦规律变化，但是在很短的时间内，可以认为瞬时多普勒频率随时间线性变化，如图 3 所示，图中的虚正弦曲线表示的是瞬时多普勒频率随时间呈现正弦规律变化，但是在较短的时间内，正弦曲线可以用图中的实直线来逼近。即可以把回波信号分为若干段，将每一段的回波信号近似为几个线性调频信号分量的叠加，通过估计这几个线性调频信号的瞬时频率这一参数，再对这些估计值进行区分，就可以得到目标的微多普勒频率。

对回波信号分段，一种可以采用均匀分段的方式，即每一段回波信号的数据长度相同；一种可以采用自适应分段的方式，开始选择比较大的数据个数，根据估计出来的每个线性调频信号分量的调频

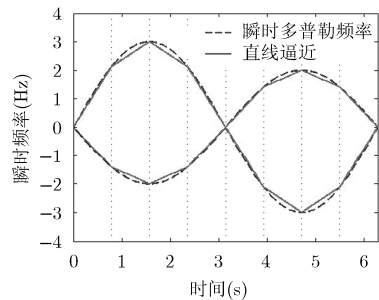


图 3 一阶逼近示意图

率、瞬时频率以及复幅度重构信号,计算重构误差,如果重构误差大于某一阈值,则减小数据个数,重复上面的过程,直到重构误差小于等于这一阈值,自适应分段可以认为是基于相同的重构误差对回波信号进行分段。与均匀分段的不同之处在于每一段回波信号的数据长度会有所不同,但是需要设置一个重构信号误差的阈值,使得重构误差小于这一阈值时结束数据长度的搜索,所需的计算量会比均匀分段大。

3.1 线性调频信号参数估计

对于多分量线性调频信号的参数估计,文献[14,15]提出自适应 chirplet 分解的方法,文献[16,17]提出调频信号参数估计算法——调频 Relax。本文是通过调频 Relax 算法来估计每一段回波信号的各个线性调频信号分量的瞬时频率。

用 M 个线性调频信号分量的和对分段后的回波信号进行近似,可以表示为

$$S(t) \approx \sum_{i=1}^M \alpha_i \exp\left\{j2\pi\left(f_{0_i}t + \frac{1}{2}m_i t^2\right)\right\} \quad (10)$$

其中, $S(t)$ 表示分段后的回波信号, α_i 表示第 i 个线性调频信号分量的复幅度, f_{0_i} 表示第 i 个线性调频信号分量的瞬时频率, m_i 表示第 i 个线性调频信号分量的调频率。

通过调频 Relax 算法,可以得到每一段回波信号的各个线性调频信号分量的复幅度、瞬时频率和调频率的估计值,本文只利用瞬时频率这个参数,把每一段观测时间的初始时刻作为横坐标,把估计出来的瞬时频率作为纵坐标,这样可以得到若干个离散的点,同一时刻的几个点表示的是这一时刻目标上可视散射点的瞬时微多普勒频率。

3.2 随机抽样一致性算法

随机抽样一致性算法(RANdOm SAmpLe Consensus, RANSAC)^[18]可以从一组包含“局外点”的观测数据集中,通过迭代方式估计数学模型的参数,而这个数学模型是由先验信息得到的。针对锥体目标的微多普勒频率随时间呈现正弦规律变化,本文建立的模型为 $y = a \cdot \sin(2\pi \cdot bx)$, 观测数据集即为上节得到的若干离散的点。随机抽样一致性算法的具体步骤可查阅文献[18],随机抽样一致性算法是一种迭代估计算法,这里仅给出其迭代上限的计算公式: $k = \frac{\lg(1-p)}{\lg(1-w^n)}$, 式中 p 表示产生有用结果的概率, w 表示每次从数据集中选取一个局内点的概率, n 表示数据集的数目, k 表示迭代次数上限。

用随机抽样一致性算法对上节都得到的离散点进行区分,可以把这些点区分为局内点和局外点。

综上所述,本算法的流程为:

步骤 1 初始化数据长度 N , 设置重构误差阈值 E ;

步骤 2 令 $N_1=N$, 对前 N_1 次回波做能量归一,并将其近似为 M 个线性调频信号的和,用调频 Relax 算法估计这 M 个线性调频信号分量的复幅度、瞬时频率和调频率;

步骤 3 根据步骤 2 得到的估计值去重构信号,计算与前 N_1 次回波的重构误差,如果重构误差大于 E , $N_1 = N_1 - 1$, 转步骤 2; 否则,转步骤 4;

步骤 4 记录此时 N_1 的值和初始频率的 M 个估计值,并将回波信号的前 N_1 次回波清除;再对清除之后的回波重复进行步骤 2 到步骤 4 操作,直到清除之后的回波信号的长度小于设置的初始化数据长度 N ;

步骤 5 将记录的 N_1 和瞬时频率的估计值转换为一个两行的矩阵,第 1 行是由 N_1 对应的时间,第 2 行是相应时间下瞬时频率的估计值,第 1 行表示横坐标,第 2 行表示纵坐标;

步骤 6 用随机抽样一致性算法对步骤 5 中矩阵表示的离散点进行区分,将其分为局内点以及局外点,分别由局内点和局外点分别估计正弦曲线的参数,得到目标的微多普勒频率曲线。

4 仿真实验

仿真参数设置:雷达发射窄带线性调频信号,载频 10 GHz, 带宽 1 MHz, 脉冲重复频率 1 kHz, 积累时间 2 s, 脉冲宽度 10 μ s。雷达视线 rLOS 与锥旋轴的夹角(平均视线角)为 50°, 锥旋频率 2 Hz, 进动角 10°。锥体目标高度 0.96 m, 质心到底面的距离 0.32 m, 底面圆半径 0.25 m。假设各散射点具有相同的散射强度。

电磁计算参数设置:雷达载频 10 GHz, 雷达视线俯仰角范围是 0° ~ 90° (从锥顶开始是 0°), 采样间隔为 0.02°, 采用水平极化入射方式和水平极化接收方式。电磁计算方法采用的是物理光学(Physical Optics, PO)法。

4.1 仿真数据结果

对回波信号进行自适应分段,将每一段的回波信号近似为两个线性调频信号分量的和,用调频 Relax 算法估计每一段回波信号这两个线性调频信号的瞬时频率,估计结果如图 4(a)所示,对图 4(a)中的离散点用随机抽样一致性算法进行区分,可以把这些离散点区分为局内点以及局外点,以及由局内点和局外点分别确定的正弦曲线,结果如图 4(b)所示。将瞬时多普勒频率的估计曲线以及由式(9)计算的理论曲线画在同一幅图中,结果如图 5 所示。

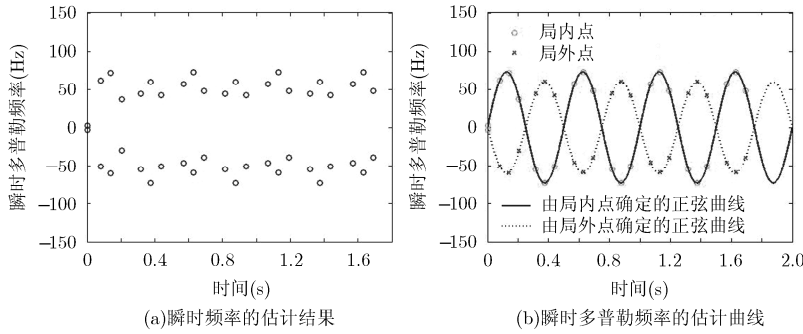


图 4 估计的瞬时多普勒频率

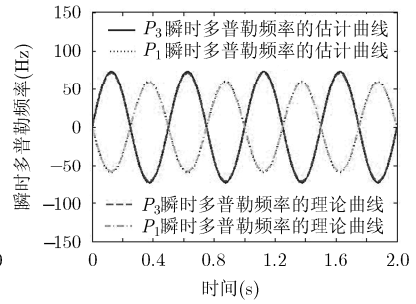


图 5 瞬时多普勒频率理论曲线与估计曲线的对比

从图 5 可以看出，瞬时多普勒频率的估计曲线与理论曲线基本重合，为了更加具体地描述估计结果，现引入式(11)来描述估计的正确率。

$$A = \left(1 - \frac{\sum_k |IF_r(k) - IF_e(k)|}{\sum_k |IF_r(k)|} \right) \times 100\% \quad (11)$$

其中， $IF_e(k)$ 表示瞬时多普勒频率的估计值， $IF_r(k)$ 表示瞬时多普勒频率的理论值。

本文认为与点 P_3 的瞬时多普勒频率理论曲线基本重合的曲线是其瞬时多普勒频率的估计曲线，与点 P_1 的瞬时多普勒频率理论曲线基本重合的曲线是其瞬时多普勒频率的估计曲线，通过式(11)可以得到 P_3 的瞬时多普勒频率的估计正确率为 97.51%， P_1 的瞬时多普勒频率的估计正确率为 97.51%。

其他条件不变，在回波信号中加入不同信噪比的高斯白噪声，仍然用自适应的方式对回波信号进行分段。不同信噪比情况下， P_3 和 P_1 的瞬时多普勒频率的估计正确率如图 6 中实线所示，多目标跟踪方法得到的正确率如图中虚线所示。

从图 6 可以看出，用本文所提方法能得到比较高的估计正确率。

4.2 电磁计算数据结果

对电磁计算的回波数据，采用均匀分段的方式对其进行分段，其他过程与 4.1 节的实验过程相同，不同信噪比情况下， P_3 和 P_1 的瞬时多普勒频率的估计正确率为如表 2 所示。

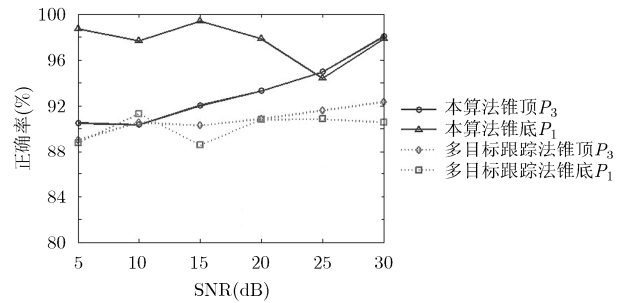


图 6 本文所提方法与多目标跟踪方法的正确率的对比图

从表 2 可以看出，噪声对估计正确率的影响不大。

由实验结果可以看出，本文所提的方法能得到比较高的正确率并且对噪声有一定的稳健性。

5 结束语

本文分析了锥体目标进动时的微多普勒频率，对于微多普勒频率呈现正弦规律变化的形式，本文提出基于瞬时频率估计的微多普勒频率提取方法，该方法首先将回波信号分为若干段，将每一段的回波信号近似为几个线性调频信号分量的和，用调频 Relax 算法估计每一个线性调频信号分量的瞬时频率，再用随机抽样一致性算法区分这些估计值，最终得到目标微多普勒频率的估计曲线。实验结果表明，本文提出的基于瞬时频率估计的微多普勒频率提取方法可以有效地提取锥体目标各等效散射点的微多普勒频率。如何利用提取的微多普勒频率进行目标识别将是下一步的研究方向。

表 2 不同信噪比情况下的估计正确率(%)

	SNR(dB)						
	无噪声	30	25	20	15	10	5
P_3	92.60	92.32	93.44	92.32	94.00	95.54	89.94
P_1	93.06	93.06	93.06	95.62	93.06	92.20	92.72
平均	92.83	92.69	93.25	93.97	93.53	93.87	91.33

参考文献

- [1] Chen V C, Li F, and Wechsler H. Micro-Doppler effect in radar phenomenon, model and simulation study[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 2006, 42(1): 2-21.
- [2] 周万幸. 弹道导弹雷达目标识别技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 1-19.
- [3] 韩勋, 杜兰, 刘宏伟, 等. 基于时频分布的空间锥体目标微动形式分类[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(4): 684-691.
Han Xun, Du Lan, Liu Hong-wei, *et al.* Classification of micro-motion form of space cone-shaped objects based on time-frequency distribution[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(4): 684-691.
- [4] 贾守卿, 江小敏, 夏明耀. 基于微多普勒特征的目标分类[J]. 电波科学学报, 2013, 28(3): 443-447.
Jia Shou-qing, Jiang Xiao-min, and Xia Ming-yao. Target classification by micro-Doppler feature[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2013, 28(3): 443-447.
- [5] 关永胜, 左群声, 刘宏伟. 基于微多普勒特征的空间锥体目标识别[J]. 电波科学学报, 2011, 26(2): 209-215.
Guan Yong-sheng, Zuo Qun-sheng, and Liu Hong-wei. Micro-Doppler signature based cone-shaped target recognition[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2011, 26(2): 209-215.
- [6] 邹小海, 艾晓峰, 李永祯, 等. 基于微多普勒的圆锥弹头进动与结构参数估计[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2413-2419.
Zou Xiao-hai, Ai Xiao-feng, Li Yong-zhen, *et al.* Precession and structure parameter estimation of the cone-shaped warhead based on the micro-Doppler[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(10): 2413-2419.
- [7] 李飞, 纠博, 邵长宇, 等. 目标微动参数估计的曲线跟踪算法[J]. 电波科学学报, 2013, 28(2): 278-284.
Li Fei, Jiu Bo, Shao Chang-yu, *et al.* Curve tracking based parameter estimation of micro-motion[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2013, 28(2): 278-284.
- [8] 王兆云, 张兴敢, 柏业超. 基于微多普勒的锥体目标进动和结构参数估计[J]. 南京大学学报(自然科学), 2014, 50(2): 148-153.
Wang Zhao-yun, Zhang Xing-gan, and Bai Ye-chao. Precession and structural parameter estimation of cone-shaped target based on the micro-Doppler[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2014, 50(2): 148-153.
- [9] 邵长宇, 杜兰, 李飞, 等. 基于多目标跟踪的空间锥体目标微多普勒频率提取方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(12): 2972-2977.
Shao Chang-yu, Du Lan, Li Fei, *et al.* Micro-Doppler extraction from space cone target based on multiple target tracking[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(12): 2972-2977.
- [10] Sharman K C and Friedlander B. Time-varying autoregressive modeling of a class of non-stationary signals[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Glasgow, Scotland, 1984: 227-230.
- [11] 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: 229-234.
- [12] Gao Hong-wei, Xie Liang-gui, Wen Shu-liang, *et al.* Micro-Doppler signature extraction from ballistic target with micro-Motions[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(4): 1969-1982.
- [13] 喻荣梅, 张仕元, 肖健华. 弹道目标移动散射点模型的微多普勒特征研究[J]. 测控技术, 2014, 33(3): 154-156.
Yu Rong-mei, Zhang Shi-yuan, and Xiao Jian-hua. Research on micro-Doppler signature of ballistic target based on moving scattering center model[J]. *Measurement & Control Technology*, 2014, 33(3): 154-156.
- [14] 邹虹, 保铮. 一种有效的基于 chirplet 自适应信号分解算法[J]. 电子学报, 2001, 29(4): 515-517.
Zou Hong and Bao Zheng. An efficient algorithm for adaptive chirplet-based signal decomposition[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(4): 515-517.
- [15] 蔡洪, 何强, 赵春宇. 基于自适应 Chirplet 分解的非均匀转动目标 ISAR 相位聚焦[J]. 光电与控制, 2013, 20(6): 79-84.
Cai Hong, He Qiang, and Zhao Chun-yu. ISAR phase focusing for nonuniform rotating target based on adaptive chirplet decomposition[J]. *Electronics Optics & Control*, 2013, 20(6): 79-84.
- [16] 张群, 马长征, 张守宏. 机动目标三维成像中调频信号超分辨率方法[J]. 应用科学学报, 2000, 18(2): 114-116.
Zhang Qun, Ma Chang-zheng, and Zhang Shou-hong. Superresolution of chirp signals and its applications to three dimensional imaging of maneuvering Targets[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2000, 18(2): 114-116.
- [17] 邢孟道, 保铮, 冯大政. 基于调幅-线性调频信号参数估计的机动目标成像方法[J]. 现代雷达, 2006, 12(6): 44-49.
Xing Meng-dao, Bao Zheng, and Fen Da-zheng. Dynamic ISAR imaging of maneuvering target based on multicomponent AM-LFM signal parameter estimation[J]. *Modern Radar*, 2006, 12(6): 44-49.
- [18] Martin Fischler and Robert Bolles. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24(6): 381-395.
- 曹文杰: 男, 1987 年生, 博士, 研究方向为雷达空间目标识别.
- 张 磊: 男, 1984 年生, 博士, 讲师, 研究方向为 SAR、ISAR 高分辨成像与运动补偿.
- 杜 兰: 女, 1980 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为统计信号处理、雷达信号处理、机器学习及其在雷达目标检测与识别方面的应用.
- 刘宏伟: 男, 1973 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、MIMO 雷达、雷达目标识别、自适应信号处理、认知雷达等.