

基于贝塞尔函数基信号分解的微动群目标特征提取方法

张群 何其芳* 罗迎

(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

(信息感知技术协同创新中心 西安 710077)

摘要: 微动特征提取是群目标分辨的有效手段,以往针对孤立目标的特征提取技术不再适用。针对此该文提出了一种基于信号分解的微动群目标特征提取方法。首先通过分析微动信号的正弦调频(SFM)形式,推导了 SFM 信号相位项在 k -分辨率贝塞尔函数基上的分解结果;然后根据回波分解结果中微动频率与函数基的一一对应关系进行频率粗略估计,并针对误差产生原因给出了精确的微动频率估计方法;最后在离散信号相位解模糊的基础上,完成各子目标的微动频率提取。仿真实验验证了算法的有效性,且与正弦调频傅里叶变换(SFMFT)算法和平均幅度差函数(AMDF)算法相比具有更高精度。

关键词: 微多普勒; 群目标; 贝塞尔函数基; 特征提取; 参数估计

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)12-3056-07

DOI: 10.11999/JEIT161036

Micro-Doppler Feature Extraction of Group Targets Using Signal Decomposition Based on Bessel Function Basis

ZHANG Qun HE Qifang LUO Ying

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

(Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding, Xi'an 710077, China)

Abstract: Micro-Doppler (m-D) feature extraction is significant for group target discrimination, while the methods for single target are invalid. An m-D feature extraction method of group targets is proposed based on signal orthogonal decomposition. First, the Sinusoidal Frequency-Modulated (SFM) form of m-D signals and the decomposition result of the phase term on k -resolution Bessel basis is deduced. The m-D frequency is coarsely estimated by the one-to-one relationship between frequencies and basis functions. Then an algorithm is introduced to reduce the error and thus a finer estimation is obtained. Finally, the m-D frequency of each target is extracted by discrete echoes without phase shift ambiguity. Simulation experiments validate the effectiveness, and show that the proposed method outperforms the Sinusoidal Frequency Modulation Fourier Transform (SFMFT)-based method and Average Magnitude Difference Function (AMDF)-based method in estimation precision.

Key words: Micro-Doppler (m-D); Group targets; Bessel function basis; Feature extraction; Parameter estimation

1 引言

当多个目标位于雷达天线同一波束范围内,目标回波信号在时频域相互叠加构成群目标^[1,2]。群目标特征提取旨在利用目标的不同参数和特征实现群目标分辨与识别^[3]。微多普勒效应(micro-Doppler effect, m-D effect)反映了目标的精细运动特征^[4,5],不同目标的微多普勒特征往往各不相同。对于地面驻停车辆群,可通过提取发动机的振动微多普勒特

征分辨汽车与坦克,还可根据发动机转速来区分不同发动机类型;对于中段弹道导弹群目标,可通过提取目标进动微多普勒特征进行真弹头的识别。因此,基于微多普勒效应的目标特征提取是实现群目标分辨识别的有效途径之一。

近年来,国内外学者对微多普勒特征提取技术进行了大量的研究。一类主要的方法基于联合时频分布(Joint Time-Frequency Distribution, JTFD)展开,此类方法不需要建立参数化模型,在计算微动回波 JTFD 的基础上寻找周期性特征进行特征提取^[6-8]。然而,不同 JTFD 方法在时频分辨率、鲁棒性和计算复杂度等方面各具优劣,同时此类方法往往参数估计精度不足。为此,文献[9]提出一种基

收稿日期: 2016-10-08; 改回日期: 2016-11-08; 网络出版: 2016-12-02

*通信作者: 何其芳 qifanghe@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61471386, 61571457)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61471386, 61571457)

于分段 FFT 的瞬时频率估计算法, 该算法的估计精度有所提高, 但 FFT 分段长度对不同信号的估计精度存在影响。文献[10]提出一种基于时变自回归 (Time-Varying Auto-Regressive, TVAR) 模型的参数估计方法, 该方法能够准确地估计微动参数并提取目标几何尺寸。平均幅度差函数 (Average Magnitude Difference Function, AMDF) 法是一种参数化估计方法, 对噪声不敏感且易于实现^[11,12]。然而, 以上微动特征提取技术的研究对象均为孤立目标, 对于群目标不再适用。

针对微动群目标, 文献[13]提出一种基于时频滤波和 Viterbi 算法的微动信号分离方法。文献[14]通过对 APY-6SAR 数据的分析, 指出微动信号为正弦调频 (Sinusoidal Frequency-Modulated, SFM) 形式, 基于此, 一类在正交基函数上进行 SFM 信号分解投影, 并通过变换域信号进行微动特征提取的方法发展起来。文献[15]通过将微动信号相位项的调制信息正交投影在三角函数基上, 提出了一种基于正弦调频傅里叶变换 (Sinusoidal Frequency Modulation Fourier Transform, SFMFT) 的微动群目标参数估计方法。该方法通过 SFMFT 计算可得到微动信号频谱, 然而, 频谱中除真实频率谱线外还存在干扰项谱线。与 SFMFT 采用的三角函数基不同, 傅里叶-贝塞尔变换 (Fourier-Bessel Transform, FBT) 将信号投影在贝塞尔函数上, 免除了干扰项, 使得线性调频信号能够很好地在贝塞尔函数域上完成分离^[16-18]。基于这种考虑, 本文结合 k -分辨率贝塞尔函数基的性质, 通过研究微动信号的 SFM 形式, 在分析 SFM 信号相位项在贝塞尔函数基上分解结果的基础上, 提出了一种微动群目标参数估计算法。

2 贝塞尔函数性质分析

经典的信号表示方法通常将信号投影在正交基上, 这类方法一般能够较好地反映信号在时域难以表现的特征, 如小波变换、Fourier 变换等。为清楚地阐释贝塞尔函数与信号的关系以及相关计算的物理意义, 现将部分贝塞尔函数性质分析如下。

2.1 准周期性

已知 $J_0(J_{0,m}t)$ 为第 1 类零阶贝塞尔函数, $J_{0,m}$ 为零阶贝塞尔函数的第 m 项正根。当 $m \rightarrow \infty$ 时, 第 m 项与第 $m+1$ 项的贝塞尔函数正根满足式(1)所示性质。

$$\lim_{m \rightarrow \infty} (J_{0,m+1} - J_{0,m}) = \pi \quad (1)$$

通过数值计算发现, 当 $m \geq 7$ 时相邻两项正根之差与 π 的差值小于 10^{-3} 。因此, 可近似地将任意第 m 项贝塞尔函数正根以首项正根与 $m-1$ 倍的周

期 π 之和进行表示, 即

$$J_{0,m} \approx J_{0,1} + (m-1)\pi \quad (2)$$

2.2 幅值特性

设在时域区间 $(0, T)$ 上存在 SFM 信号 $s(t) = \exp[j\cos(2\pi ft)]$, 由贝塞尔函数的定积分性质^[19], 当满足 $J_{0,m} < 2\pi fT$ 时, 将信号 $s(t)$ 与贝塞尔函数 $J_0(J_{0,m}t/T)$ 做式(3)所示积分投影:

$$\begin{aligned} & \int_0^T j \ln[s(t)] J_0(J_{0,m}t/T) dt \\ &= - \left[(2\pi f)^2 - (J_{0,m}/T)^2 \right]^{-1/2} \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可知, 该信号在贝塞尔函数基上的投影的幅值大小仅随项数 m 改变。当 $J_{0,m}/T \rightarrow 2\pi f$ 时幅值取得最小值, 则该最小值项数 m 与频率 f 存在一一对应关系。因此, 若信号投影在第 m' 项贝塞尔函数时取得最小值, 表明与之对应的 SFM 信号理论调制频率为 $f_{m'} = J_{0,m'}/2\pi T$ 。

2.3 贝塞尔函数基分辨率

有限时域 SFM 信号与贝塞尔函数基进行投影, 等价于将信号的频率调制成分依次分解在各项贝塞尔函数基上。由于贝塞尔函数与理论调制频率一一对应, 若将相邻两项贝塞尔函数基进行 $k (k > 1)$ 等分, 以等分后的函数基 $J_0(J_{0,m}t/kT)$ 进行信号分解, 则第 m' 项函数 $J_{0,m'}$ 对应的理论调制频率为

$$f_{m'} = \frac{J_{0,m'}}{2\pi kT} \quad (4)$$

将 $J_0(J_{0,m}t/kT)$ 称为 k -分辨率贝塞尔函数基, 由式(4)可知, 若信号与 k -分辨率函数基进行投影, 其投影幅值最小值项数的对应频率成分将更为精细。因此, 以最小幅值项理论频率作为真实调制频率的估计 $\hat{f} = f_{m'}$, 所得结果也更为精确。

3 参数估计相关分析

当 SFM 信号调制指数超过一定范围时, 离散 SFM 信号的参数估计受相位模糊的影响^[15], 本文所提算法也同样存在这一问题。为获得更加精确的估计频率, 同时避免由相位模糊造成的估计错误, 现对估计误差以及相位模糊产生的原因进行分析, 并在此基础上给出相应修正方法。

3.1 估计误差分析

由第 2 节性质分析可知, 将回波信号在 k -分辨率贝塞尔函数基上进行投影, 并以最小幅值项理论频率作为估计频率将得到较为精确的估计值。设相邻两理论频率 f_m 和 f_{m+1} 的差值为 Δf_m , 通常若真实频率恰好为 f_m 和 f_{m+1} 的平均值, 取得最大估计误差 $\Delta f_m/2$ 。然而, 这种情况仅适于单频分量完全投影

在单根谱线(如 FFT 谱)或单项级数上,对于贝塞尔函数基,幅值特性使得理论频率 f_m 在与其相邻的若干项基上的投影不为零,这使得估计误差大于 $\Delta f_m/2$,下面以式(5)~式(7)的推导过程说明这一情况。设 $T = 1\text{ s}$,若信号与第 m 项和第 $m+1$ 项贝塞尔函数基的投影幅值相等:

$$\int_0^1 \text{jln}[s(t)]J_0(J_{0,m}t)dt = \int_0^1 \text{jln}[s(t)]J_0(J_{0,m+1}t)dt \quad (5)$$

则有

$$\frac{1}{\sqrt{(2\pi f)^2 - J_{0,m}^2}} = \frac{1}{\sqrt{J_{0,m+1}^2 - (2\pi f)^2}} \quad (6)$$

由基本不等式性质,解得

$$f = \sqrt{\frac{J_{0,m}^2 + J_{0,m+1}^2}{2 \cdot 4\pi^2}} > \frac{J_{0,m} + J_{0,m+1}}{2\pi} = \frac{1}{2}(f_m + f_{m+1}) \quad (7)$$

可见,当真实频率最接近 f_m 时估计值并非一定为 f_m ,此时估计误差大于 $\Delta f_m/2$ 。若计算出估计值与真实值的频偏,并以估计值与频偏之差作为修正值,则误差将始终在 $\Delta f_m/2$ 范围之内。若估计值 $\hat{f} = f_m$,取频率 $f_i \in [f_{m-1}, f_{m+1}]$ 并计算其误差,计算最大正误差与负误差的平均值即为频偏 f_{cen} 。由贝塞尔函数的准周期性,衡量频率的相邻贝塞尔函数“坐标”近似等间隔,则频偏 f_{cen} 近似为常数,可采用式(8)所示数值计算的方法获得

$$f_{\text{cen}} = \frac{1}{2} \left[\max \left\{ f_i - \frac{J_{0,m'}}{2\pi kT} \right\} + \min \left\{ f_i - \frac{J_{0,m'}}{2\pi kT} \right\} \right] \quad (8)$$

其中, m' 为 f_i 对应的理论投影幅值最小项数, $m' = m-1, m, m+1$ 。因此,修正后的估计频率为 $\hat{f}_r = \hat{f} - f_{\text{cen}}$ 。

3.2 相位模糊分析

信号可测量的相位取值在区间 $(-\pi, \pi)$ 上,因此当信号相移大于 2π 时将产生相位模糊现象,此时实际相移与测量值相差 2π 的整数倍。对于 SFM 信号,调制指数 $A_m > \pi$ 时产生相位模糊,若两相邻采样点的相位差不超过 π ,可通过如式(9)函数进行修正:

$$\text{phar}(t) = \begin{cases} \text{pha}(n) - 2\pi, & \text{pha}(n) - \text{pha}(n-1) > \pi \\ \text{pha}(n) + 2\pi, & \text{pha}(n-1) - \text{pha}(n) > \pi \\ \text{pha}(n), & |\text{pha}(n) - \text{pha}(n-1)| < \pi \end{cases} \quad (9)$$

其中 $\text{pha}(n) = \text{Im}[\ln s(n)]$, $\text{phar}(n)$ 为相位测量值与实际信号相移之差。然而,并非所有相位模糊信号均可由式(9)进行相位解模糊处理,当调频指数超过上限 $A_m = f_s/2f$ 时信号将超出相位解模糊的可修正范围,以上修正方法将不再适用。

4 微动群目标回波分析与估计算法

本节分别以自旋群目标和振动群目标为例,推导微动群目标回波的 SFM 形式,并在回波 SFM 形式的分析基础上,以多分量 SFM 信号为模型给出微动群目标的参数估计算法。

4.1 微动群目标回波分析

4.1.1 自旋群目标 假设某目标群包含 p 个自旋子目标。通常情况下,考虑到同一目标自旋频率在相对较短的脉冲积累时间内保持不变^[20],设目标 i ($i = 1, 2, \dots, p$) 的自旋角速度为常向量 $\boldsymbol{\omega}_i = (\omega_{xi} \ \omega_{yi} \ \omega_{zi})^T$,令 $\Omega_i = \|\boldsymbol{\omega}_i\|$,则自旋角速度的单位向量为 $\boldsymbol{\omega}'_i = \boldsymbol{\omega}_i/\Omega_i = (\omega'_{xi} \ \omega'_{yi} \ \omega'_{zi})^T$ 。目标 i 上包含 q_i 个散射点,在起始时刻散射点 j ($j = 1, 2, \dots, q_i$) 的坐标为 $\mathbf{r}_{i,j} = (r_{xij} \ r_{yij} \ r_{zij})^T$,则经基带变换及平动补偿后得到的目标回波为

$$s_b(t) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} \sigma_{i,j} \exp \left\{ \text{j}2\pi f_c \left[\frac{2\mathbf{r}_{i,j}(t)}{c} \right] \right\} = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} \sigma_{i,j} \exp[\text{j}\boldsymbol{\Phi}_{i,j}(t)] \quad (10)$$

其中, f_c 为发射信号载频, $\sigma_{i,j}$ 为目标 i 上散射点 j 的散射系数, $\mathbf{r}_{i,j}(t)$ 为 t 时刻 LOS 方向上该散射点与目标参考点的距离, $\boldsymbol{\Phi}_{i,j}(t)$ 为相位项。目标自旋运动可由自旋矩阵 \mathbf{R}_s 表示,文献[21]对自旋目标进行建模分析并推导得到的自旋矩阵为

$$\mathbf{R}_s(t) = \mathbf{I} + \widehat{\boldsymbol{\omega}}'_i \sin \Omega_i t + \widehat{\boldsymbol{\omega}}'^2_i (1 - \cos \Omega_i t) \quad (11)$$

其中, $\widehat{\boldsymbol{\omega}}'_i$ 为以 ω'_{xi} , ω'_{yi} 和 ω'_{zi} 为元素的斜对称矩阵。设 \mathbf{n} 为目标群位于雷达远场时 LOS 方向的单位向量,则散射点 j 由自旋引起的径向距离变化为

$$\mathbf{r}_{i,j}(t) = (\mathbf{R}_s \mathbf{r}_{i,j})^T \mathbf{n} \quad (12)$$

联立式(10)至式(12),对相位项求导得到的微动频率为

$$f_{\text{m-D}} = \frac{2}{\lambda} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} [A \sin(\Omega_i t) + B \cos(\Omega_i t)] \quad (13)$$

其中, $A = \Omega_i (\widehat{\boldsymbol{\omega}}'^2_i \mathbf{r}_{i,j})^T \mathbf{n}$, $B = \Omega_i (\widehat{\boldsymbol{\omega}}'_i \mathbf{r}_{i,j})^T \mathbf{n}$ 。由以上分析可知,自旋群目标微多普勒频率按正弦规律变化,其回波信号表现为多分量 SFM 信号的叠加。

4.1.2 振动群目标 在相同雷达体制信号下进行振动群目标微多普勒效应分析。假设某振动目标群包含 p 个子目标,目标 i ($i = 1, 2, \dots, p$) 上存在 q_i 个散射点且均以相同频率 f_i 进行周期性振动。散射点 j ($j = 1, 2, \dots, q_i$) 的振幅为 $A_{i,j}$, $\alpha_{i,j}$ 和 $\beta_{i,j}$ 分别为振动轴与雷达所形成的方位角和仰角。当目标群位于雷达远场时,振动定向轴的方位角和仰角可近似为

α 和 β ，则 t 时刻散射点 j 到该目标参考点的距离为

$$r_{i,j} = A_{i,j} \sin(2\pi f_i t) \mathbf{n} \quad (14)$$

其中 $\mathbf{n} = (\cos \alpha \cos \beta \ \sin \alpha \cos \beta \ \sin \beta)^T$ 。回波信号经基带变换及平动补偿后得到的信号形式与式(10)相同，对相位项关于时间 t 求导，得到回波的微多普勒频率为

$$f_{m-D} = \frac{4\pi \mathbf{n}}{\lambda} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} A_{i,j} f_i \cos(2\pi f_i t) \quad (15)$$

由式(15)可知，振动群目标的微多普勒频率同样按正弦规律变化。综上所述，自旋群目标和振动群目标的微动回波信号均为 SFM 形式，表现为具有不同调制指数和调制频率的多分量 SFM 信号的叠加，这与文献[14]的分析相符。

4.2 参数估计算法

下面以微动群目标离散回波信号为模型给出具体的参数估计算法。由 4.1 节分析可知，由自旋和振动引起的微动回波信号为 SFM 形式，则以序列长为 N_s 的多分量 SFM 离散信号建立微动群目标回波信号模型。

$$s(n) = \sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^{N_s} R_i \exp\{j[a_i \sin(2\pi f_i n) + b_i \cos(2\pi f_i n)]\} \quad (16)$$

在 Nyquist 采样定理中，采样频率限定了信号的最大可表征频率。由于贝塞尔函数与频率成分一一对应，因此采样频率即确定了最大 k -分辨率贝塞尔函数项 $M = kN_s$ 。以前 M 项贝塞尔函数基进行信号分解投影：

$$\begin{aligned} j t_s \sum_{n=1}^{N_s} \ln s(n) J_0 \left(\frac{J_{0,m}}{kN_s} n \right) \\ \approx j \sum_{i=1}^N \text{Term}_{1,i} + \sum_{i=1}^N \text{Term}_{2,i} \end{aligned} \quad (17)$$

式中信号分解结果为虚部项与实部项之和。仅考察实部项：

$$\text{Term}_{2,i} = - \frac{a_i + b_i}{\sqrt{(2\pi f_i)^2 - (J_{0,m} n / kN_s)^2}} \quad (18)$$

实部项在第 m_i 项处取得最小值。采用项数 m_i 依次进行频率估计，则每一子目标的估计频率为

$$\hat{f}_i = \frac{J_{0,m_i}}{2\pi k N_s t_s} \quad (19)$$

其中，

$$m_i = \min_m \text{Re} \left\{ j t_s \sum_{n=1}^{N_s} \ln s(n) J_0 \left(\frac{J_{0,m}}{kN_s} n \right) \right\} \quad (20)$$

接下来根据式(8)以第 i 分量的项数 m_i 计算估计频偏 $f_{\text{cen},i}$ ，则修正后第 i 个子目标的估计频率为

$$\hat{f}_{r,i} = \frac{J_{0,m_i}}{2\pi k N_s t_s} - f_{\text{cen},i} \quad (21)$$

综上所述，基于贝塞尔函数基信号分解的微动群目标参数估计算法流程为：

步骤 1 选取能够达到估计结果精度要求的 k -分辨率贝塞尔函数基 $\left\{ J_0 \left(J_{0,m} n / kN_s \right) \right\}$ ；

步骤 2 判断回波信号是否存在相位模糊。若存在，则对回波信号进行相位解模糊处理；

步骤 3 计算回波信号与贝塞尔函数基的投影，取最小幅值对应项数 m_i ，计算初始估计频率 \hat{f}_i ；

步骤 4 根据项数 m_i 计算估计频偏 $f_{\text{cen},i}$ ，并根据初始估计频率 \hat{f}_i 及 $f_{\text{cen},i}$ 计算修正后的估计频率 $\hat{f}_{r,i}$ ；

步骤 5 重复步骤 3-步骤 4，直到不存在明显的最小幅值项。

5 仿真实验

为分析算法有效性，对本文算法与 AMDF 算法及文献[15]提出的 SFMFT 算法，从参数估计精度和鲁棒性两方面进行分析与比较。

5.1 算法精度与鲁棒性分析

以地面驻停车辆群为例进行仿真实验：假设雷达载频 $f_c = 10$ GHz，脉冲重复频率 PRF = 256 Hz，雷达照射时间 $T = 1$ s。目标群中心参考点距雷达的位置坐标为 (3 km, 4 km, -5 km)，地面驻停车辆群中包含 3 个子目标，各目标发动机振幅、振动频率、振动轴方位角和俯仰角分别设置如下。目标 1 发动机以振幅 $A_1 = 3$ mm、频率 $f_1 = 3.25$ Hz 做周期振动；目标 2 振幅为 $A_2 = 6$ mm、振动频率 $f_2 = 7.93$ Hz；目标 3 振幅为 $A_3 = 8$ mm、振动频率 $f_3 = 13.13$ Hz，均沿定向轴进行振动，振动轴的方位角 α_p 与俯仰角 β_p 均为 $\alpha_p = \pi/5$ rad 和 $\beta_p = \pi/4$ rad。为验证本文算法的精度和鲁棒性，在不同信噪比 (SNR) 条件下采用 k -分辨率 ($k = 10$) 贝塞尔函数基进行仿真实验，得到的信号分解各项幅值如图 1 所示。

图 1 表明，无论在是否含有噪声的条件下，信号分解投影的幅值分别在 $m_1 = 69$ ， $m_2 = 163$ 和 $m_3 = 267$ 处取得极小值。将 m_1 ， m_2 和 m_3 分别代入式(19)~式(21)，求解得 3 个振动子目标的估计频率分别为 3.2345 Hz, 7.9345 Hz 和 13.1345 Hz，估计频率误差均在 0.0300 Hz 以内。可见，本文算法在 SNR > 0 dB 时能够较好地进行微动群目标的频率估计。

归一化均方误差 (Normalized Root-Mean-Square Error, NRMSE) 是衡量参数估计精度的常用

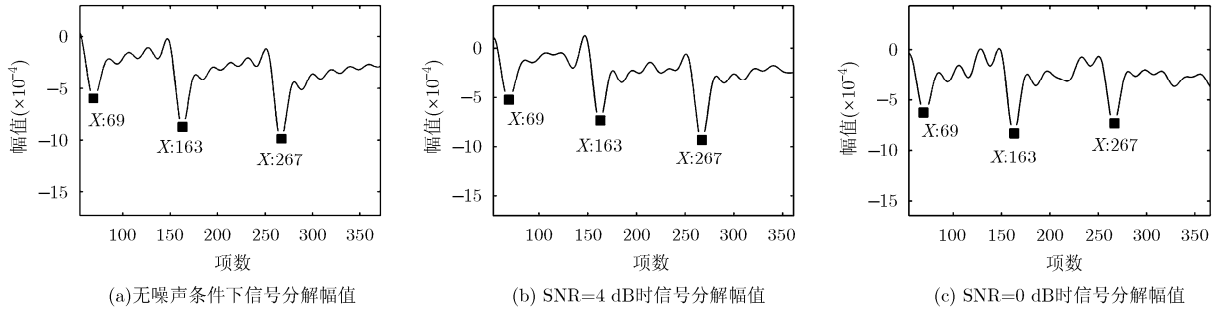


图 1 采用 k -分辨率贝塞尔函数基信号分解结果

指标，它表征了估计参数与实际参数之间的欧氏距离。为分析 SNR 与 k -分辨率对估计精度的影响，本文采用 200 次 Monte Carol 仿真，以 3 个子目标估计频率的 NRMSE 平均值衡量算法的估计精度，仿真结果如图 2 所示。

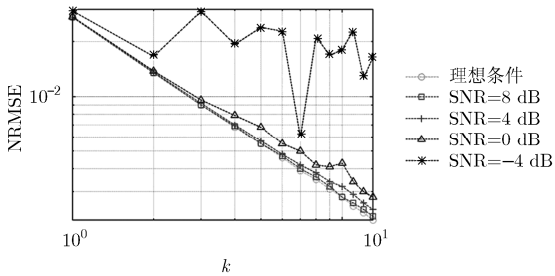


图 2 不同 SNR 及 k -分辨率条件下频率估计的 NRMSE

从图 2 可以看出，在相同 SNR 条件下，采用 k -分辨率越大的贝塞尔函数基进行参数估计的精度越高，这与 2.3 节的分析结论相符。当 $SNR > 0$ dB 时，在相同 k -分辨率条件下估计误差变化不大，这是由于此时噪声使得计算所得用于频率估计的最小值项数稍有偏差，最小值项数落在理论估计项数的临近若干项内，因此估计误差较小，但随着 SNR 降低至 -4 dB 时估计频率将与真实频率产生较明显偏差。

5.2 算法对比分析

SFMFT 算法^[15]通过定义信号的正弦调频空间，将微动信号的相位调制信息直接投影在以三角函数构成的正交基上，并以频谱的形式表达出来。以

相同振动群目标为模型，在不同 SNR 条件下采用 SFMFT 算法进行仿真，仿真结果如图 3 所示。

图 3(a)表明，即使在无噪声条件下，除过在 3 个子目标的微动频率 $f_1 = 3$ Hz, $f_2 = 8$ Hz, $f_3 = 13$ Hz 处外还含有若干项谱线，这些谱线将对微动特征的提取造成干扰；图 3(b)与图 3(c)表明，在 $SNR > -4$ dB 时，SFMFT 频谱仍能够反映各子目标的振动频率，但干扰项同样存在。

AMDF 算法^[11,12]将采样序列采用加窗处理，通过信号时移、作差、绝对值求和等一系列运算，寻找谷值点求取微动周期。下面采用 AMDF 算法进行目标的微动频率估计，仿真实验结果如图 4 所示。

图 4(a)表明，基于 AMDF 的微动参数估计算法不适用于微动群目标，当若干信号分量叠加在一起时谷值点将产生混乱。图 4(b)与图 4(c)分别为在 $SNR = 0$ dB 和 $SNR = -4$ dB 条件下以目标 1 为例的仿真结果。从图上可以看出，在 0 dB 和 -4 dB 条件下基于 AMDF 的参数估计算法能够通过谷值点较好地反映单目标的振动周期与振动频率，经计算其估计误差分别为 0.0096 Hz 和 0.0319 Hz。

由 3 种算法的仿真实验结果可以看出，SFMFT 算法和 AMDF 算法均在低 SNR 条件下具有更强的鲁棒性。然而，SFMFT 算法在对群目标微动频率估计时干扰项较为明显，而 AMDF 算法无法对群目标回波进行微动频率估计。为得到一般性的结论，现将以上 3 种算法的主要指标进行对比总结，如表 1 所示。

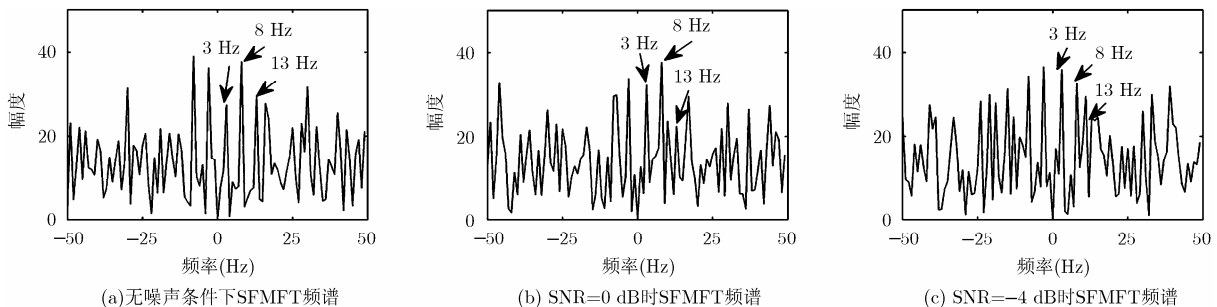


图 3 SFMFT 算法仿真得到的振动群目标估计频谱

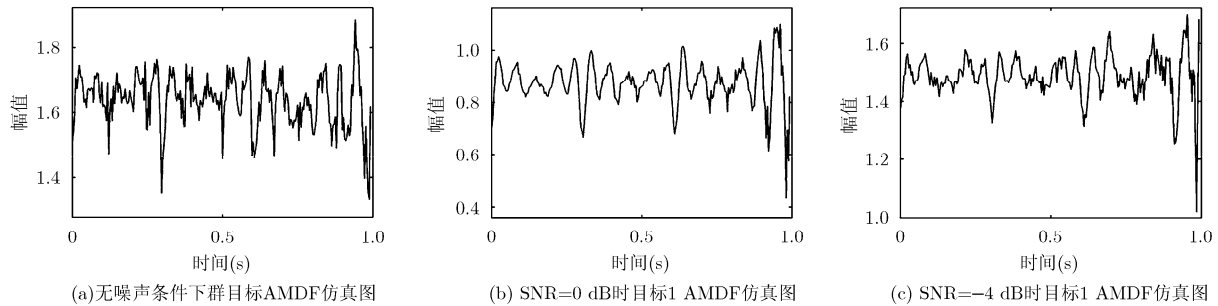


图 4 基于 AMDF 的微动目标特征提取算法仿真图

表 1 算法主要指标对比

	SFMFT 算法	AMDF 算法	贝塞尔函数基信号分解算法
是否适用于群目标参数估计	是	否	是
是否含干扰项	是	否	否
参数估计精度(Hz)	PRF/N_s	PRF/N_s	约为 $PRF/(4kN_s)$
关键参数	信号序列长	信号序列长, 时延窗长	信号序列长, k -分辨率
最低信噪比	约为-4 dB	约为-4 dB	约为 0 dB

综上所述, 3 种算法的估计精度同样受限于脉冲重复频率与信号序列长。对于相同的 PRF 和信号序列长, 文中算法具有更高的估计精度, 理论上可通过选取合适的 k -分辨率贝塞尔函数基来达到估计精度要求, 且对群目标进行微动频率估计时不存在干扰项; 然而, 该算法相比前两种算法对噪声更为敏感, 通常适用于 $SNR > 0$ dB 的条件。

6 结束语

为进行微动群目标分辨, 本文提出了一种采用 k -分辨率贝塞尔函数基进行回波信号正交分解的微动群目标特征提取算法。在进行微动频率估计时, 可通过选取合适的 k -分辨率函数基使得微多普勒频率估计精度达到实际要求。仿真结果表明, 本文算法在 $SNR > 0$ dB 条件下可以有效地完成对群目标中各个子目标的频率估计, 与 SFMFT 算法和 AMDF 算法相比不存在频率干扰项, 且具有更高的估计精度。

参考文献

- [1] 黄剑, 胡卫东. 基于贝叶斯框架的空间群目标跟踪技术[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 86-96. doi: 10.3724/SP.J.1300.2013.20079.
HUANG Jian and HU Weidong. Tracking of group space objects within Bayesian framework[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(1): 86-96. doi: 10.3724/SP.J.1300.2013.20079.
- [2] 李靖卿, 冯存前, 张栋, 等. 基于时频域增强和全变差的群目标信号分离[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(2): 375-382. doi: 10.13700/j.Bh.1001-5965.2015.0110.
- [3] 关永胜, 左群声, 刘宏伟. 高噪声环境下微动多目标分辨[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(11): 2630-2635. doi: 10.3724/SP.J.1146.2009.01348.
GUAN Yongsheng, ZUO Qunsheng, and LIU Hongwei. Micro-motion targets resolution in a high noise environment[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(11): 2630-2635. doi: 10.3724/SP.J.1146.2009.01348.
- [4] CHEN V C, LI Fayin, HO Shenshyang, et al. Micro-Doppler effect in radar: Phenomenon, model and simulation study[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2-21. doi: 10.1109/TAES.2006.1603402.
- [5] NARAYANAN R M and ZENALDIN M. Radar micro-Doppler signatures of various human activities[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(9): 1205-1215. doi: 10.1049/iet-rsn.2015.0173.
- [6] THAYAPARAN T, ABROL S, RISEBOROUGH E, et al. Analysis of radar micro-Doppler signatures from experimental helicopter and human data[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2007, 1(4): 288-299. doi: 10.1049/iet-rsn:20060103.
- [7] QI Wang, PEPIN M, BEACH R J, et al. Demonstration of target vibration estimation in synthetic aperture radar imagery[C]. 2011 IEEE International Geoscience and Remote

- Sensing Symposium, Vancouver, Canada, 2011: 4083-4086. doi: 10.1109/IGARSS.2011.6050130.
- [8] 陈小龙, 刘宁波, 王国庆, 等. 基于高斯短时分数阶 Fourier 变换的海面微动目标检测方法[J]. 电子学报, 2014, 42(5): 971-977. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.05.021.
- CHEN Xiaolong, LIU Ningbo, WANG Guoqing, *et al.* Gaussian short-time fractional Fourier transform based detection algorithm of target with micro-motion at sea[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(5): 971-977. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.05.021.
- [9] QU Wenxing, YANG Wenge, and ZHANG Ruoyu. Frequency estimation method of sinusoidal frequency signal based on piecewise FFT[C]. 11th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Shanghai, China, 2015: 1-4. doi: 10.1049/cp.2015.0638.
- [10] 韩勋, 杜兰, 刘宏伟. 基于窄带微多普勒调制的锥体目标参数估计[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 961-968. doi: 10.11999/JEIT140814.
- HAN Xun, DU Lan, and LIU Hongwei. Parameter estimation of cone-shaped target based on narrowband micro-Doppler modulation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 961-968. doi: 10.11999/JEIT140814.
- [11] 王玥, 钱志鸿, 张营. 基于扩展谱相减的 RCAF 基音周期检测算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5): 1161-1165.
- WANG Yue, QIAN Zhihong, and ZHANG Ying. RCAF pitch detection algorithm based on expanded spectral subtraction [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(5): 1161-1165.
- [12] 王义哲, 冯存前, 李靖卿, 等. 弹道导弹群防御目标信号识别仿真研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(1): 42-46.
- WANG Yizhe, FENG Cunqian, LI Jingqing, *et al.* A study on simulation of group-target signal identification in ballistic missile defense[J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(1): 42-46.
- [13] LI Po, WANG Dechun, and WANG Lu. Separation of micro-Doppler signals based on time frequency filter and Viterbi algorithm[J]. *Signal, Image and Signal Processing*, 2013, 7(3): 593-605.
- [14] SPARR T and KRANE B. Time-frequency analysis of vibrating targets in airborne SAR system[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(3): 173-176. doi: 10.1049/ip-rsn:20030447.
- [15] PENG Bo, WEI Xizhang, DENG Bin, *et al.* A sinusoidal frequency modulation Fourier transform for radar-based vehicle vibration estimation[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, 63(9): 2188-2199. doi: 10.1109/TIM.2014.2308031.
- [16] PACHORI R B and SIRCAR P. A new technique to reduce cross terms in the Wigner distribution[J]. *Digital Signal Processing*, 2007, 17(2): 466-474. doi: 10.1016/j.dsp.2006.10.004.
- [17] SURESH P, THAYAPARAN T, and VENKATARAMANIAN K. Fourier-Bessel transform and time-frequency-based approach for detecting maneuvering air target in sea-clutter [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(5): 481-491. doi: 10.1049/iet-rsn.2014.0207.
- [18] SURESH P, THAYAPARAN T, OBULESU T, *et al.* Extracting micro-Doppler radar signatures from rotating targets using Fourier-Bessel transform and time-frequency analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(6): 3204-3210. doi: 10.1109/TGRS.2013.2271706.
- [19] SCHAUM S and ARFKEN G. *Mathematical Methods for Physicists*[M]. New York: Academic Press, 1970: 165-175.
- [20] 胡晓伟, 童宁宁, 董会旭, 等. 弹道中段群目标平动补偿与分离方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(2): 291-296. doi: 10.11999/JEIT140494.
- HU Xiaowei, TONG Ningning, DONG Huixu, *et al.* Translation compensation and resolution of multi-ballistic targets in midcourse[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(2): 291-296. doi: 10.11999/JEIT140494.
- [21] 张群, 罗迎. 雷达目标微多普勒效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 22-30.
- ZHANG Qun and LUO Ying. *Micro-Doppler Effect of Radar Targets*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 22-30.
- 张 群: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、雷达成像与目标识别.
- 何其芳: 女, 1993 年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理.
- 罗 迎: 男, 1984 年生, 副教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像与目标识别.