

正弦调频傅里叶变换的自旋微动群目标分辨

杨 陈¹, 池 龙¹, 张 群^{1,2}, 罗 迎^{1,3}, 宋 桐⁴

(1.空军工程大学信息与导航学院,西安,710077;2.复旦大学电磁波信息科学教育部重点实验室,上海,200433;3.西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室,西安,710071;4.95880部队,北京,100843)

摘要 近年来针对孤立目标的微动特征提取技术已较为成熟,但针对群目标的分辨与微动特征提取技术尚有待深入研究。以空间自旋微动群目标为例,提出了一种基于正弦调频傅里叶变换的自旋微动群目标分辨方法。建立了自旋微动群目标的回波模型,在此基础上采用正弦调频傅里叶变换来提取回波中的微多普勒特征分量。针对正弦调频傅里叶变换在分析多分量正弦调频信号时所特有的交叉项问题,提出了一种有效的交叉项抑制方法。结合交叉项抑制方法,利用正弦调频傅里叶变换处理自旋群目标微动信号,实现了对自旋微动群目标的分辨,并准确地提取出各子目标自旋频率特征。

关键词 群目标;微多普勒;正弦调频傅里叶变换;交叉项

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.03.010

中图分类号 TN957 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)03-0051-06

Resolution of Group Targets with Spinning Micro-Motion Based on Sinusoidal Frequency Modulation Fourier Transform

YANG Chen¹, CHI Long¹, ZHANG Qun^{1,2}, LUO Ying^{1,3}, SONG Tong⁴

(1.Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves (Ministry of Education), Fudan University, Shanghai 200433, China; 3. Key Lab. for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China; 4. Unit 95880, Beijing 100483, China)

Abstract: The technique of extracting isolated target micro-motion feature has already been comparative mature in recent years, but the technique of extracting group targets micro-motion feature remains to be further studied. Taking space autorotation micro-motion as example, a resolution scheme of group targets based on sinusoidal frequency modulation Fourier transform (SFMFT) is proposed in this paper. First, an echo model of group targets with spinning micro-motion is established, and SFMFT is applied in extracting micro-Doppler component on the basis of the above-mentioned. Then, a suppression method of cross-term in SFMFT is put forward in view of the problem that the sinusoidal frequency modulation Fourier transform (SFMFT) displays the characteristic cross-term in analyzing multi-component sinusoidal frequency modulation signals. Finally, combined with the proposed cross-term suppression method, group targets

收稿日期:2015-12-17

基金项目:国家自然科学基金(61471386,61571457);中国博士后科学基金(2015M570815)

作者简介:杨 陈(1991-),男,重庆忠县人,硕士生,主要从事雷达信号处理研究.E-mail:yangchen19910523@163.com.

引用格式:杨陈,池龙,张群,等.正弦调频傅里叶变换的自旋微动群目标分辨[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(3):51-56. YANG Chen, CHI Long, ZHANG Qun, et al. Resolution of Group Targets with Spinning Micro-Motion Based on Sinusoidal Frequency Modulation Fourier Transform[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(3): 51-56.

with spinning micro-motion are effectively resolved by utilizing the group targets with spinning micro-motion signals of the sinusoidal frequency modulation Fourier transform, and the spinning frequency of each sub-target is accurately extracted.

Key words: group targets; micro-Doppler; sinusoidal frequency modulation Fourier transform (SFMFT); cross-term

微动是指目标或目标的组成部分除了主体平动之外的振动、转动等小幅运动^[1]。受微动调制的雷达回波通常表现为正弦调频形式^{[2]3-42}，在目标上的多个微动散射点或者多个目标上的微动散射点共同作用下，微动信号为多分量正弦调频信号。通过从微动信号中提取目标的微动特征，可为目标探测和识别提供良好的信息^[2-4]。例如文献[5]提出了基于微多普勒效应的强海杂波条件下海面运动目标的探测方法；文献[6]提出了海上雷达微弱微动目标探测方法；文献[7~9]提出了不同的基于微多普勒效应的人类活动分辨方法；文献[10]提出了基于微多普勒效应的快速识别空中目标旋转部件的代数迭代宽带雷达成像算法；而文献[11]则利用复数局部均值分解分离了微动信号，改善 ISAR 成像质量，提高了识别能力。近几年微动特征提取技术得到了广泛的研究，例如文献[12]提出了基于经验模态分解的微动特征提取方法；文献[13]提出了基于复图像 OMP 分解的宽带雷达微动特征提取方法；文献[14]提出了基于距离和差值序列的复杂运动目标微动特征提取方法；文献[15]提出了基于雷达一维距离像序列的微动特征提取方法；文献[16]提出了基于傅里叶-贝塞尔变换、时频分析与分数阶傅里叶变换相结合微动特征提取方法；文献[17]提出了基于组网雷达的弹道目标三维进动特征提取方法；文献[18]提出了基于时频谱的地面目标人与车的微动特征提取方法；文献[19]提出了多基地被动雷达中直升机的微动特征提取方法等等。

位于雷达天线同一波束范围内多个目标为群目标，群目标中的单个目标则称为子目标^[20]。群目标雷达回波信号中，各子目标的回波信号在时域或频域相互叠加，要精确平动补偿各子目标回波很困难，所以，现有针对孤立目标的微动特征提取技术在处理群目标微动信号时达不到理想效果。群目标分辨是指从雷达回波中分辨出群目标中的子目标数量并提取出各子目标的运动特征。

本文利用文献[21]提出的正弦调频傅里叶变换处理群目标微动信号，以实现群目标的分辨。针对正弦调频傅里叶变换处理多分量正弦调频信号时出现交叉项的问题，本文分析了多分量正弦调频信号交叉项的性质，在此基础上提出了一种抑制交叉项

的方法。结合交叉项抑制方法，用正弦调频傅里叶变换处理自旋微动群目标微动信号，很方便地获得了子目标数和各子目标的自旋频率。

1 自旋微动群目标回波建模

为便于描述 1 个目标相对于雷达的空间三维自旋运动，需要建立 3 个坐标系，分别为雷达坐标系、参考坐标系和目标本地坐标系，其中雷达坐标系以雷达位置为坐标原点，不随目标姿态变化而变化；目标本地坐标系以目标中心为坐标原点，随着目标在雷达坐标系中的运动而运动；参考坐标系用于构建目标本地坐标系与雷达坐标系之间的转换关系，以目标中心为坐标原点，但坐标轴分别与雷达坐标系的坐标轴平行，随着目标中心的平动而整体平动^[2]。见图 1。

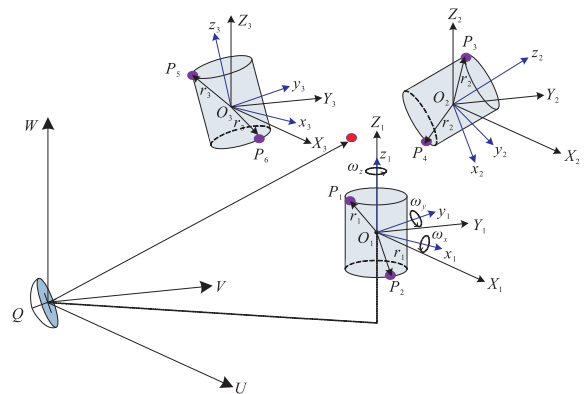


图 1 雷达与三维自旋群目标几何关系

Fig.1 Geometrical relationship between radar and three-dimensional spinning group targets

坐标系 (QU, QV, QW) 为雷达坐标系，坐标原点为 Q。以 R_0 为中心的邻域有 3 个目标，其中心分别位于 O_1 、 O_2 和 O_3 。以 O_1 、 O_2 和 O_3 为原点的 3 个坐标系 (O_1X_1, O_1Y_1, O_1Z_1) 、 (O_2X_2, O_2Y_2, O_2Z_2) 和 (O_3X_3, O_3Y_3, O_3Z_3) 为参考坐标系，平行于雷达坐标系。以 O_1 、 O_2 和 O_3 为原点的 3 个坐标系为 (O_1x_1, O_1y_1, O_1z_1) 、 (O_2x_2, O_2y_2, O_2z_2) 和 (O_3x_3, O_3y_3, O_3z_3) 为目标本地坐标系。目标 O_k 分别以角速度 ω_x 、 ω_y 和 ω_z 绕本地坐标系的 x 轴、 y 轴和 z 轴做旋转运动，用目标的本地坐标系的角速度向量 $\omega_k =$

$(\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ 来描述。 P_i 目标 O_k 上的一个散射点,初始时刻向量 $O_k P_i$ 在本地坐标系中坐标为 (x_{ki}, y_{ki}, z_{ki}) 。本地坐标系和参考坐标系夹角 $\omega_{\text{Euler}1} = (\varphi_e, \theta_e, \varphi_e)$ 称为欧拉角。同一向量在本地坐标系和参考坐标系中具有不同的表达式,它们之间的关系由欧拉(Euler)旋转矩阵确定^[2],在参考坐标系中用 $\hat{\omega}_k = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ 表示 ω_k 。

假设雷达发射载频为 f_c 的单频连续波信号:

$$p(t) = \exp(j2\pi f_c t) \quad (1)$$

则对于 m 个目标,目标 $k (k = 1, 2, \dots, m)$ 上有 n_k 个散射点的情况,微动信号为:

$$s_{\text{bd}}(t) = \sum_{k=1}^m \exp\left(\frac{j4\pi f_c \Delta R_k}{c}\right) \left\{ \sum_{i=1}^{n_k} \sigma_{ki} \exp[j\Phi_{ki}(t)] \right\} \quad (2)$$

式中: ΔR_k 为 O_k 到 Q 的距离与 R_0 到 Q 的距离之差, σ_{ki} 为散射系数; $\Phi_{ki}(t) = \frac{j4\pi f_c r_{ki}(t)}{c}$, $r_{ki}(t)$ 表示目标 O_k 上第 i 个散射点的运动轨迹。文献[2]已经证明:

$$\frac{d\Phi_{ki}(t)}{dt} = \frac{2\pi f_c}{c} \left\{ [\hat{\omega}_k^2 \sin(\Omega_k t) + \hat{\omega}_k \cos(\Omega_k t)] \mathbf{R}_{\text{init}-k} \mathbf{O}_k \mathbf{P}_{ki} \right\}^T n \quad (3)$$

式中: $\Omega_k = \|\omega_k\|$; $\mathbf{R}_{\text{init}-k}$ 为欧拉旋转矩阵; $n =$

$$\frac{\mathbf{Q}\mathbf{R}_0}{\|\mathbf{Q}\mathbf{R}_0\|}; \hat{\omega}_k = \frac{1}{\Omega_k} \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{pmatrix}。这证$$

明 $s_{\text{bd}}(t)$ 为多分量正弦调频信号。

2 正弦调频傅里叶变换交叉项抑制

文献[21]定义了正弦调频信号空间和该空间的加法、减法、数乘和内积运算法则。正弦调频信号空间除了不具备零元素和负元素唯一性外,满足其它线性空间的条件。在定义正弦调频信号空间基础上,文献[21]进而提出了一种处理正弦调频信号的新变换,即正弦调频傅里叶变换。这里直接给出离散正弦调频傅里叶变换的定义式:

$$X(k) = F(x(n)) \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \ln[x(n)] (jW_N^{nk}) \quad (3)$$

式中: $W_N^{nk} = \exp(-j \frac{2\pi}{N} nk)$ 。

2.1 交叉项分析

在多分量正弦调频信号的正弦调频傅里叶变换频谱(下文简称频谱)中,除了各分量的调频频率以外,其它的频率处也会出现峰值,本文称这些频率为交叉项。下面先讨论交叉项产生原因和交叉项出现的位置。

根据文献[21]中关于正弦调频信号空间的加法定义,2个正弦调频信号 $x_1 = \exp[j\varphi_1(t)]$ 和 $x_2 = \exp[j\varphi_2(t)]$ 相加(用 $\langle + \rangle$ 与传统空间中的运算符号的加号“+”相区别)为:

$$x_1 \langle + \rangle x_2 \stackrel{\text{def}}{=} \exp[j\varphi_1(t)] \exp[j\varphi_2(t)] = \exp[j(\varphi_1(t) + \varphi_2(t))] \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可得:

$$F(x_1 \langle + \rangle x_2) = F(x_1)F(x_2) \quad (5)$$

即 2 个正弦调频信号在正弦调频信号空间相加得到的信号的正弦调频傅里叶变换等于这 2 个正弦调频信号各自的正弦调频傅里叶变换相加。容易证明,对于 2 个信号以上的情况,正弦调频傅里叶变换满足正弦调频信号空间的线性可加性。正弦调频傅里叶变换处理多分量正弦调频信号时之所以有交叉项存在,是因为多分量正弦调频信号是由各分量信号在时域线性相加而得到的,但是正弦调频傅里叶变换在传统加法定义下并不满足线性可加性。令 $\psi(t; r_i, \omega_i, \theta_i) = \psi(r_i, \omega_i, \theta_i) = r_i \cos(2\pi\omega_i t + \theta_i)$, 含有 m 个分量的多分量正弦调频信号可表示为 $x(t) = \sum_{i=1}^m [j\psi(r_i, \omega_i, \theta_i)]$ 。由 $F(x(t))$ 得到的频

谱中,峰值出现在 $\sum_{i=1}^m a_i \omega_i (a_i \in Z)$ 处。当 a_1, a_2, \dots, a_m 中 $a_j = 1$, 且 $a_l = 2 (l = 1, 2, \dots, j - 1, j + 1, \dots, m)$ 时, $\sum_{i=1}^m a_i \omega_i = \omega_j$ 表示第 j 个分量信号的调频频率 ω_j ; 由 a_1, a_2, \dots, a_m 其他组合得到的 $\sum_{i=1}^m a_i \omega_i$ 即为交叉项。下面以 2 个正弦调频信号分量的情况为例进行分析。

2 个正弦调频分量线性和信号为 $x(t) = \sum_{i=1}^2 \exp[j\psi(r_i, \omega_i, \theta_i)]$, 对 $x(t)$ 进行麦克劳林展开得到如下形式:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{i=1}^2 [j\psi(r_i, \omega_i, \theta_i)]^k / k! \quad (6)$$

高次项系数很小,影响很小,为了清晰说明问题,忽略高次项, k 最大值取 2, 且 $\ln(x + 1) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} (x^n / n)$, 所以:

$$\ln[x(t)] = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \{ [1 + j\psi(r_1, \omega_1, \theta_1) + [\psi(r_1, \omega_1, \theta_1)]^2 / 2 + j\psi(r_2, \omega_2, \theta_2) + [j\psi(r_2, \omega_2, \theta_2)]^2 / 2]^n / n \} \quad (7)$$

同样高次项系数很小,影响很小,且为了清晰说明问题,忽略高次项, n 最大值取 2, 则:

$$\ln[x(t)] = 1/2 + (r_1^2 + r_2^2) / 4 -$$

$$\begin{aligned}
& r_1^2 r_2^2 / 16 - 3(r_1^4 + r_2^4) / 64 + \\
& \psi(j3r_1^3 / 8 + jr_1 r_2^2 / 4, \omega_1, \theta_1) + \\
& \psi(j3r_2^3 / 8 + jr_1^2 r_2 / 4, \omega_2, \theta_2) + \\
& \psi(r_1^2 / 4 - r_1^4 / 16 - r_1^2 r_2^2 / 16, 2\omega_1, 2\theta_1) + \\
& \psi(r_2^2 / 4 - r_2^4 / 16 - r_1^2 r_2^2 / 16, 2\omega_2, 2\theta_2) + \\
& \psi(r_1 r_2 / 2, \omega_1 + \omega_2, \theta_1 + \theta_2) + \\
& \psi(r_1 r_2 / 2, \omega_1 - \omega_2, \theta_1 - \theta_2) + \\
& \psi(jr_1^3 / 8, 3\omega_1, 3\theta_1) + \psi(jr_2^3 / 8, 3\omega_2, 3\theta_2) + \\
& \psi(jr_1^2 r_2 / 8, 2\omega_1 + \omega_2, 2\theta_1 + \theta_2) + \\
& \psi(jr_1^2 r_2 / 8, 2\omega_1 - \omega_2, 2\theta_1 - \theta_2) + \\
& \psi(jr_1 r_2^2 / 8, \omega_1 + 2\omega_2, \theta_1 + 2\theta_2) + \\
& \psi(jr_1 r_2^2 / 8, \omega_1 - 2\omega_2, \theta_1 - 2\theta_2) - \\
& \psi(r_1^4 / 64, 4\omega_1, 4\theta_1) - \psi(r_2^4 / 64, 4\omega_2, 4\theta_2) - \\
& \psi(r_1^2 r_2^2 / 32, 2\omega_1 + 2\omega_2, 2\theta_1 + 2\theta_2) - \\
& \psi(r_1^2 r_2^2 / 32, 2\omega_1 - 2\omega_2, 2\theta_1 - 2\theta_2) \quad (8)
\end{aligned}$$

由式(3)和式(8)可知, $F[x(t)]$ 得到的频谱中, 峰值出现在 ω_1 、 ω_2 、 $2\omega_1$ 、 $2\omega_2$ 、 $\omega_1 + \omega_2$ 、 $\omega_1 - \omega_2$ 等频率处。

2.2 交叉项抑制方法

交叉项抑制方法基于这样一个关系: 多分量正弦调频信号 $x(t)$ 离散正弦调频傅里叶变换结果和它的共轭信号 $x^*(t)$ 的离散正弦调频傅里叶结果相比, 分量信号的调频频率处的幅度符号相反, 主要交叉项处的幅度符号相同。下面以 2 个正弦调频信号分量的情况为例进行分析。如式(6)、(7)、(8)推导过程, 可得:

$$\begin{aligned}
\ln[x^*(t)] &= 1/2 + (r_1^2 + r_2^2) / 4 - \\
& r_1^2 r_2^2 / 16 - 3(r_1^4 + r_2^4) / 64 - \\
& \psi(j3r_1^3 / 8 + jr_1 r_2^2 / 4, \omega_1, \theta_1) - \\
& \psi(j3r_2^3 / 8 + jr_1^2 r_2 / 4, \omega_2, \theta_2) + \\
& \psi(r_1^2 / 4 - r_1^4 / 16 - r_1^2 r_2^2 / 16, 2\omega_1, 2\theta_1) + \\
& \psi(r_2^2 / 4 - r_2^4 / 16 - r_1^2 r_2^2 / 16, 2\omega_2, 2\theta_2) + \\
& \psi(r_1 r_2 / 2, \omega_1 + \omega_2, \theta_1 + \theta_2) + \\
& \psi(r_1 r_2 / 2, \omega_1 - \omega_2, \theta_1 - \theta_2) - \\
& \psi(jr_1^3 / 8, 3\omega_1, 3\theta_1) - \psi(jr_2^3 / 8, 3\omega_2, 3\theta_2) - \\
& \psi(jr_1^2 r_2 / 8, 2\omega_1 + \omega_2, 2\theta_1 + \theta_2) - \\
& \psi(jr_1^2 r_2 / 8, 2\omega_1 - \omega_2, 2\theta_1 - \theta_2) - \\
& \psi(jr_1 r_2^2 / 8, \omega_1 + 2\omega_2, \theta_1 + 2\theta_2) - \\
& \psi(jr_1 r_2^2 / 8, \omega_1 - 2\omega_2, \theta_1 - 2\theta_2) - \\
& \psi(r_1^4 / 64, 4\omega_1, 4\theta_1) - \psi(r_2^4 / 64, 4\omega_2, 4\theta_2) - \\
& \psi(r_1^2 r_2^2 / 32, 2\omega_1 + 2\omega_2, 2\theta_1 + 2\theta_2) - \\
& \psi(r_1^2 r_2^2 / 32, 2\omega_1 - 2\omega_2, 2\theta_1 - 2\theta_2) \quad (9)
\end{aligned}$$

由式(3)、式(8)和式(9)可知, 多分量正弦调频信号 $x(t)$ 离散正弦调频傅里叶变换结果和它的共轭信号 $x^*(t)$ 离散正弦调频傅里叶结果相比, 分量

信号的调频频率处的幅度符号相反, 主要交叉项处的幅度符号相同, 所以由 $\|F[x^*(t)] + F[x(t)]\|$ 得到的频谱中, $x(t)$ 中分量信号的调频频率被消除, 交叉项幅度增加。由 $\|F[x(t)] - \|F[x^*(t)] + F[x(t)]\|$ 可得到 $x(t)$ 的抑制了交叉项的频谱。

综上所述, 抑制交叉项的方法可以总结为如下几个步骤(设待处理信号为 $x(t)$): ① $F[x(t)]$; ② $F[x^*(t)]$; ③ $\|F[x^*(t)] + F[x(t)]\|$; ④ $\|F[x(t)]\|$ 减去③得到的交叉项, 得到抑制交叉项后的频谱。

3 自旋微动群目标分辨方法

对于只具有自旋微动形式的群目标, 各子目标的旋转频率不同, 而在同一子目标上的散射点的自旋频率相同, 因此我们可以通过提取微动信号中的调频分量来实现自旋微动群目标的分辨: 子目标数由调频分量的数目确定, 各子目标的自旋频率由各调频分量的值确定。群目标的回波信号很难精确平动补偿, 式(2)中的 $\exp(\frac{j4\pi f_c \Delta R_k}{c})$ 部分即为由于不能精确平动补偿而引起的多普勒效应。自旋微动群目标微动信号经正弦调频傅里叶变换处理后, 由于未精确补偿引起的多普勒频率将会出现在频谱的零频处, 去除频谱中的零频成分后再做抑制交叉项处理得到微动信号频谱即可实现自旋微动群目标的分辨。综上所述, 自旋微动群目标的分辨方法总结为: ① 正弦调频傅里叶变换处理微动信号; ② 去除 2.2 节中①得到的频谱中零频成分; ③ 对 2.2 节中②得到的频谱做交叉项抑制; ④ 根据③得到的微动信号频谱实现自旋微动群目标分辨。

4 仿真

设雷达坐标系坐标为 (300, 400, 500) (单位: km) 附近有 3 个自旋微动目标, 其信息见表 1。雷达载频为 $f_c = 300$ MHz, 采样频率为 $f_s = 100$ Hz, 信号时长 $T = 2$ s, 在回波中加入不同信噪比的高斯白噪声, 仿真结果见图 2。

图 2(a) 可知, 直接用正弦调频傅里叶变换从自旋群目标微动信号中提取多微动特征时, 确实会受到交叉项的干扰, 因而不易判断出子目标的数目和确定子目标微动频率。图 2(b) 为用本文提出的交叉项抑制方法处理图 2(a) 之后的结果。图 2(b) 中有 3 种频率成分 (2 Hz、3 Hz、7 Hz), 很容易判断出

该群目标中有 3 个子目标,并且这 3 个频率分别是 3 个子目标的自旋频率,与表 1 中给出的目标信息十分吻合,实现了群目标的分辨。图 2 (c) 和 (d) 是在 SNR=5 dB 条件下交叉项抑制前后的微动信号频谱,此时自旋微动群目标分辨不受影响。图 2 (e)

和(f)是在 SNR=0 dB 条件下交叉项抑制前后的微动信号频谱,此时由于噪声功率太强,自旋群目标分辨受到很严重影响。上面的仿真结果证明,在信噪比大于 5 dB 的条件下,本文提出的方法能够实现自旋微动群目标的分辨。

表 1 目标参数信息

Tab.1 The parameters' information of targets

目标	本地坐标系原点在雷达坐标系中的坐标/m	初始欧拉角/rad	本地坐标系角速度向量/(rad · s ⁻¹)	散射点	本地坐标系中散射点坐标/m	散射系数
1	$u=300\ 000.256\ 1$	$\pi(1/3,1/4,1/5)$	$ 2\pi(4,5,\sqrt{8}) =14\pi$	1	(0.07,0.07,0)	0.918
	2			(-0.07,0,-0.07)	0.913	
2	$u=300\ 000.886\ 6$	$\pi(1/5,1/6,1/2)$	$ 2\pi(1,2,2) =6\pi$	1	(0.07,0.07,0)	0.990
	2			(-0.07,0,-0.07)	0.917	
3	$u=300\ 000.446\ 8$	$\pi(1/2,1/4,1/8)$	$ 2\pi(1,\sqrt{2},1) =4\pi$	1	(0.07,0.07,0)	0.903
	2			(-0.07,0,-0.07)	0.956	

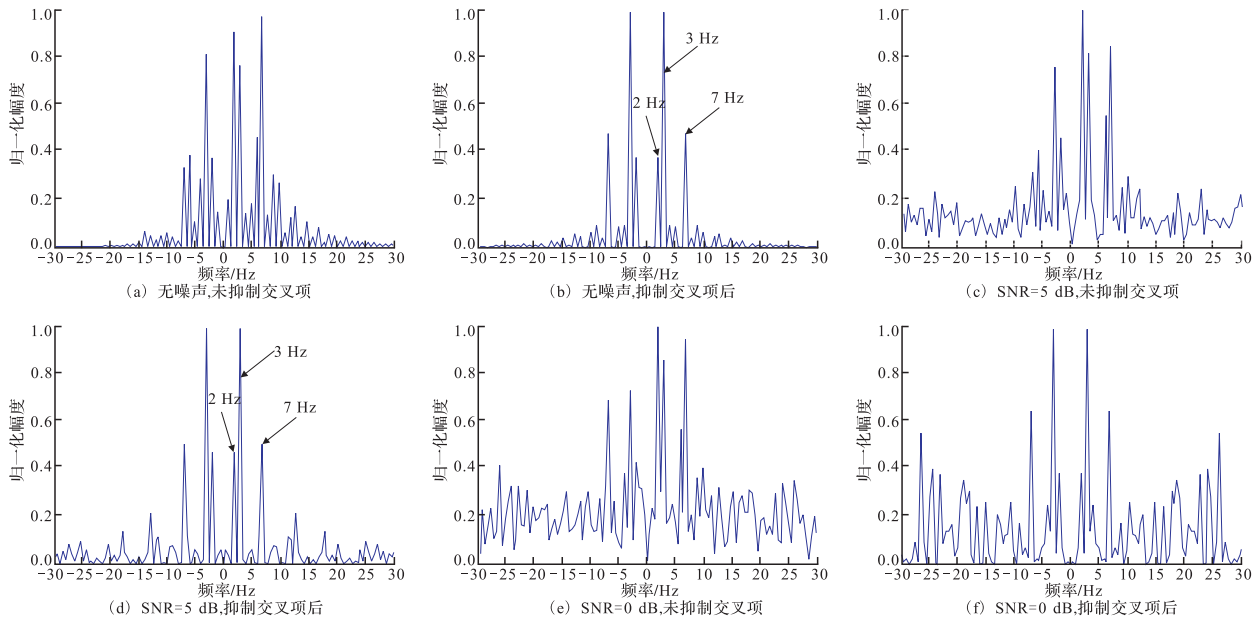


图 2 仿真结果

Fig.2 The result of simulation

5 结语

本文利用正弦调频傅里叶变换处理自旋群目标微动信号,并针对交叉项问题提出了一种抑制方法,结合交叉项抑制方法,正弦调频傅里叶变换直接获得了子目标数目,准确地提取出各子目标自旋频率,实现了群目标分辨。仿真证明了该方法的有效性。需要说明的是,由于正弦调频信号空间零元素不唯一,当自旋散射点的旋转半径超过雷达信号的半个波长时会带来相位模糊问题。高频雷达的信号波长很短,一般小于自旋散射点的旋转半径,此时,必然

会导致相位模糊的问题。因此,若要将此方法推广应用,还需深入研究解相位模糊的方法,这也是作者下一步的研究方向。

参考文献(References):

[1] CHEN V C. Doppler Signatures of Radar Backscattering from Objects with Micro-motions [J]. IET Signal Processing , 2008, 2(3): 291-300.

[2] 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.

ZHANG Qun, LUO Ying. Mico-Doppler Effect of Radar Targets [M]. Beijing: National Defend Industry Press, 2013.

- (in Chinese)
- [3] 王德纯. 微多普勒雷达述评[J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 7(6): 575-580.
WANG Dechun. An Overview of Micro-Doppler Radar [J]. Journal of CAEIT, 2012, 7(6): 575-580. (in Chinese)
- [4] TAHMOUSH Dave. Review of Micro-Doppler Signatures [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2015, 9(9): 1140-1146.
- [5] CHEN Xiaolong, GUAN Jian, BAO Zhonghua, et al. Detection and Extraction of Target with Micro-Motion in Spiky Sea Clutter via Short-Time Fractional Fourier Transform [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(2): 1002-1017.
- [6] CHEN Xiaolong, GUAN Jian, LI Xiuyou, et al. Effective Coherent Integration Method for Marine Target with Micro-Motion via Phase Differentiation and Radon-Lv's Distribution [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2015, 9(9): 1284-1295.
- [7] TIVIVEFOK Hing Chi, PHUNG Son Lam, BOUZERDOUM Abdesselam. Classification of Micro-Doppler Signatures of Human Motions Using Log-Gabor Filters [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2015, 9(9): 1188-1195.
- [8] MCDONALD Michael Kenneth. Discrimination of Human Targets for Radar Surveillance via Micro-Doppler Characteristics [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2015, 9(9): 1171-1180.
- [9] NARAYANAN Ram M, ZENALDIN Matthew. Radar Micro-Doppler Signatures of Various Human Activities [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2015, 9(9): 1205-1215.
- [10] HUA Yuming, GUO Junhai, ZHAO Hua. Algebraic Iterative Wideband Radar Imaging Algorithm to Identify Rapidly Rotating Parts on Aerial Targets [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2015, 9(9): 1162-1170.
- [11] YUAN Bin, CHEN Zengping, XU Shiyu. Micro-Doppler Analysis and Separation Based on Complex Local Mean Decomposition for Aircraft with Fastrotating Parts in ISAR Imaging [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(2): 1285-1298.
- [12] 牛杰, 刘永祥, 秦玉亮, 等. 一种基于经验模态分解的锥体目标雷达微动特征提取新方法[J]. 电子学报, 2011, 39(7): 1712-1715.
NIU Jie, LIU Yongxiang, QIN Yuliang, et al. A New Method of Radar Micro-motion Feature Extraction of Cone Target Based on Empirical Mode Decomposition [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(7): 1712-1715. (in Chinese)
- [13] 罗迎, 张群, 王国正, 等. 基于复图像 OMP 分解的宽带雷达微动特征提取方法[J]. 雷达学报, 2012, 1(4): 361-369.
LUO Ying, ZHANG Qun, WANG Guozheng et al. Micro-Motion Signature Extraction Method for Wideband Radar Based on Complex Image OMP Decomposition [J]. Journal of Radars, 2012, 1(4): 361-369. (in Chinese)
- [14] 贺峰, 刘承兰, 朱国富, 等. 基于距离和差值序列的复杂运动目标微动特征提取[J]. 电子学报, 2012, 40(3): 422-428.
HE Feng, LIU Chenglan, ZHU Guofu, et al. Micro-Motion Signature Extraction of Targets with Complex Motions Based on Summation and Difference Sequence of Ranges [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(3): 422-428. (in Chinese)
- [15] 宁超, 田雨光, 张向阳. 基于雷达一维距离像序列的微动特征提取[J]. 空军预警学院学报, 2013, 27(3): 173-176.
NING Chao, TIAN Yuguang, ZHANG Xiangyang. Extraction of Micro-motion Characteristics Based on Radar One-dimensional Range Profile Sequence [J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2013, 27(3): 173-176. (in Chinese)
- [16] 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 Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(6): 3204-3210.
- [17] 张栋, 冯存前, 贺思三, 等. 组网雷达弹道目标三维进动特征提取[J]. 西安电子科技大学学报, 2015, 42(2): 152-157.
ZHANG Dong, FENG Cunqian, HE Sisan, et al. Extraction of Three-dimensional Precession Features of Ballistic Targets in Netted Radar [J]. Journal of Xidian University, 2015, 42(2): 152-157. (in Chinese)
- [18] SHI Xiaoran, ZHOU Feng, LIU Lei, et al. Textural Feature Extraction Based on Time-Frequency Spectrograms of Humans and Vehicles [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2015, 9(9): 1251-1259.
- [19] BACZYK K, SAMCZYŃSKI P, KULPA K, et al. Micro-Doppler Signatures of Helicopters in Multistatic Passive Radars [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2015, 9(9): 1276-1283.
- [20] 李朝伟. 低分辨率雷达对群目标的检测及分辨研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
LI Chaowei. Research on the Detection and Discrimination of Unresolved Targets of the Low Resolution Radar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [21] PENG Bo, WEI Xizhang, DENG Bin, et al. A Sinusoidal Frequency Modulation Fourier Transform for Radar-Based Vehicle Vibration Estimation [J]. IEEE Transaction on Instrument and Measurement, 2014, 63(9): 2188-2199.

(编辑: 姚树峰)