

基于参数化解调的旋转目标微多普勒频率提取方法

陈是抒¹,彭志科¹,邢冠培²

(1. 上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室,上海 200240; 2. 上海航天电子技术研究所,上海 201109)

摘要:旋转运动是航天领域中最为常见的微运动,如卫星天线转动、弹道导弹自旋运动等。旋转目标的微多普勒特征对雷达目标识别具有重大影响。针对旋转目标不同散射点的微多普勒频率相互重叠、难以提取的问题,提出了基于参数化解调的旋转目标微多普勒频率提取方法。由点散射模型得到旋转目标的微多普勒信号解析形式。考虑到旋转目标微多普勒信号具有正弦频率调制特征,构造了基于正弦模型的参数化解调算子,优化微多普勒频率参数,使解调信号在载波频率处的频谱值达到最大。为了估计多个散射点的微多普勒频率参数,提出了参数迭代估计方法,在每次迭代中只估计当前最强散射点的微多普勒参数,将相应信号分量从原始信号中剔除,消除对后续分量估计结果的影响。仿真和实验结果表明:基于参数化解调的旋转目标微多普勒频率提取方法与传统时频峰值检测方法相比,能更精确地提取相互交叉的旋转目标微多普勒频率,为最终实现雷达空间目标识别提供了理论基础,能应用于卫星天线、弹道导弹等目标的监测、识别。

关键词:微多普勒;时频分析;参数估计;瞬时频率;频率估计;解调

中图分类号:TN957.51 文献标志码:A

DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.05.006

Micro-Doppler Frequency Extraction for Rotating Targets Based on Parameterized Demodulation

CHEN Shiqian¹, PENG Zhike¹, XING Guanpei²

(1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In the field of spaceflight, the rotating motion of a target is one of the most common micro motions, such as the rotation of the satellite antenna and the spinning motion of the ballistic missile. The micro-Doppler (m-D) signatures of these rotating targets play important roles in radar space target recognition. Since the m-D frequencies of different scattering points usually overlap in the time-frequency domain, it is difficult to extract them by use of traditional methods. To address this issue, this paper proposes a novel m-D frequency extraction method for rotating targets based on parameterized demodulation. Firstly, according to the theory of point scatter model, the analytical expression of the radar echo signal from a rotating target is obtained. Given the fact that the obtained signal model is featured by sinusoidal frequency modulation, a parameterized demodulation operator based on the sinusoidal model is constructed and the parameters of the m-D frequency are optimized to ensure that the spectrum of the demodulated signal reaches the maximum value at the carrier frequency. To estimate m-D frequency parameters of multiple scattering points, an iterative parameter estimation scheme is proposed. For each iteration, only m-D parameters of the current strongest scattering point are estimated and then the corresponding signal component is removed from the original radar echo signal to eliminate the influence on the parameter estimation of other components in subsequent iterations. The simulation and experiment show that compared to the traditional time-frequency peak detection method, the proposed method can accurately extract overlapped m-D frequencies of rotating targets, laying the foundation for radar space target recognition. The method has a promising application prospect in

收稿日期:2018-06-01;修回日期:2018-08-23

基金项目:国家自然科学基金(11632011,11472170);航天先进技术联合研究中心技术创新项目(USCAST2016-26)

作者简介:陈是抒(1991—),男,博士,主要研究方向为时频分析、雷达信号处理等。

monitoring and identifying the targets such as satellite antenna and ballistic missile.

Keywords: micro-Doppler(m-D); time frequency(TF) analysis; parameter estimation; instantaneous frequency(IF); frequency estimation; demodulation

0 引言

雷达通过发射、接收目标反射的电磁波进行探测。当目标以一定速度运动时,其反射信号将偏离雷达发射信号的频率,该现象称为多普勒效应。如果目标除了整体平移运动外,还进行局部振动、转动等微运动,则会使雷达回波信号产生频率调制,并在目标整体平移运动引起的多普勒频率周围产生边带,这种现象称为微多普勒效应^[1-3]。微多普勒调制频率可反映目标的微动特性和结构特征,被广泛应用于雷达目标分类识别中^[4-5]。旋转运动是航天领域中最为常见的微运动,如卫星天线转动、弹道中段弹头自旋运动等,因此本文将主要关注旋转目标的微多普勒频率。

目标运动使微多普勒信号频率具有时变特征^[6]。目前,国内外已有大量利用时频分析方法处理这类非平稳信号的报道,如:文献[7]利用经验模式分解方法分离出目标旋转部件产生的微多普勒特征分量,以消除微多普勒特征对目标主体部分ISAR(逆合成孔径雷达)成像的影响,但经验模式分解方法容易产生边界效应、模式混叠等问题,难以处理航天领域各种复杂的雷达信号;文献[8-9]分别利用Fourier-Bessel 级数和Chirplet 变换提取雷达回波信号中的微多普勒特征,利用Fourier-Bessel 级数分离雷达信号中的非平稳成分与平稳成分,而非平稳成分往往与雷达微多普勒特征相对应,不能进一步分离不同散射点的微多普勒特征。上述文献主要介绍了微多普勒信号分解,未见信号频率特征提取的报道。文献[10-11]通过检测回波信号时频分布的局部峰值点,估计目标的微多普勒频率,但由于目标不同散射点的微多普勒频率分量通常在时频分布上相互重叠,该方法难以得到感兴趣的频率分量,且信号时频分布的分辨率有限,因此较难估计高精度的微多普勒频率;文献[12]提出一种参数化解调方法,用于估计多项式频率调制信号的瞬时频率,而该方法能有效处理瞬时频率交叉、重叠的信号,但其采用的多项式模型在逼近复杂瞬时频率曲线时存在龙格现象,无法估计高度振荡的微多普勒频率。

鉴于旋转目标微多普勒信号具有正弦频率调制特征,本文提出了一种基于正弦模型的参数化解调

方法。该方法与文献[12]中的多项式模型解调方法不同,将频率估计问题转化为模型参数优化问题,利用粒子群算法优化参数,对旋转目标呈周期振荡的微多普勒频率进行有效估计。

1 理论背景

1.1 信号模型

将旋转目标简化为绕固定旋转中心运动的散射点^[13],雷达与旋转散射点的几何关系如图 1 所示。图中:散射点 P 绕回转中心 O 以角频率 f_r 逆时针旋转; l_0 为雷达到回转中心的距离; l_1 为回转半径; L_P 为雷达到散射点的瞬时距离; φ_0, φ_t 分别为起始时刻和 t 时刻散射点 P 的旋转角, $\varphi_t = \varphi_0 + 2\pi f_r t$ 。

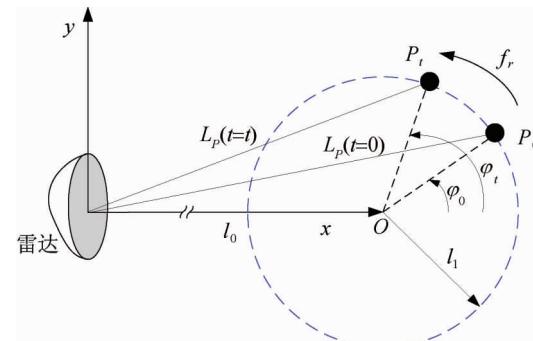


图 1 雷达与旋转散射点的几何关系

Fig. 1 Geometrical relationship between radar and rotating scattering point

由图 1 中的几何关系得到雷达与散射点之间距离,即

$$L_P(t) = \sqrt{l_0^2 + l_1^2 + 2l_0l_1 \cos(\varphi_0 + 2\pi f_r t)} \quad (1)$$

假设散射体位于雷达远场,即 $(l_1/l_0)^2 \rightarrow 0$,则式(1)可简化为

$$L_P(t) \approx l_0 + l_1 \cos(\varphi_0 + 2\pi f_r t) \quad (2)$$

因此,点 P 的雷达回波基带信号可表示为

$$s_P(t) = \sigma_P \exp\left[j \frac{4\pi L_P(t)}{\lambda}\right] = \sigma_P \exp[j\theta_P(t)] \quad (3)$$

式中: j 为虚数单位, $j = \sqrt{-1}$; σ_P 为点 P 的散射系数; λ 为雷达波长; $\theta_P(t)$ 为信号相位函数。因此,点 P 的微多普勒频率可表示为

$$\begin{aligned} f_p^{\text{MD}}(t) &= \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_p(t)}{dt} = \\ &= \frac{-4\pi f_r l_1 \sin(\varphi_0 + 2\pi f_r t)}{\lambda} \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)可见: 旋转目标的微多普勒频率随时间正弦变化, 正弦周期与目标旋转周期一致。最大多普勒频率 f_{\max}^{MD} 与目标旋转半径和旋转周期有关, $f_{\max}^{\text{MD}} = 4\pi f_r l_1 / \lambda$ 。一个目标通常包含多个散射点, 此时雷辔回波信号由多个信号分量叠加构成, 其表达式为

$$s^r(t) = \sum_{i=1}^K \sigma_i \exp\left[j \frac{4\pi L_i(t)}{\lambda}\right] \quad (5)$$

式中: K 为散射点数目; σ_i 为第 i 个散射点的散射系数; $L_i(t)$ 为雷达与第 i 个散射点之间的瞬时距离。

假设所有微动散射点的旋转频率为 f_r , 则参照式(2)可得到瞬时距离函数, 其表达式为

$$L_i(t) \approx l_0 + l_{i1} \cos(\varphi_{i0} + 2\pi f_r t) \quad (6)$$

式中: l_{i1} 为第 i 个散射点的旋转半径; φ_{i0} 为第 i 个散射点的起始旋转角。参照式(4)可得到第 i 个散射点的微多普勒频率, 即

$$f_i^{\text{MD}}(t) = \frac{-4\pi f_r l_{i1} \sin(\varphi_{i0} + 2\pi f_r t)}{\lambda} \quad (7)$$

由式(7)可得: 不同散射点的微多普勒频率是一些幅值和相位不同、角频率相同的正弦函数, 这些微多普勒频率通常在时频面上相互重叠, 难以提取。

1.2 参数化解调

参数化解调方法可估计特定信号的模型参数。广义调频信号模型为

$$s(t) = A \exp\left[j 2\pi \int_0^t f_l(\gamma) d\gamma + \psi_0\right] \quad (8)$$

式中: A 为信号幅值; ψ_0 为信号初始相位; $f_l(t)$ 为信号瞬时频率。若式(8)为雷辔回波信号, 则 $f_l(t)$ 为微多普勒频率, 其表达式见式(4)。

参数化解调算子的表达式为

$$\begin{aligned} \Phi(t; \mathbf{P}, f_c) &= \\ &\exp\left\{-j 2\pi \left[\int_0^t g(\gamma; \mathbf{P}) d\gamma - f_c t \right]\right\} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: f_c 为载波频率; $g(t; \mathbf{P})$ 为特定的参数化解调函数^[12]; \mathbf{P} 为解调函数的参数集合。将式(8)乘以式(9)得到解调信号, 即

$$\begin{aligned} s^d(t) &= s(t) \Phi(t; \mathbf{P}, f_c) = A \exp\left\{j \left(2\pi f_c t + \right.\right. \\ &\left.\left.2\pi \int_0^t [f_l(\gamma) - g(\gamma; \mathbf{P})] d\gamma + \psi_0\right)\right\} \end{aligned} \quad (10)$$

当且仅当 $f_l(t) = g(t; \mathbf{P})$ 时, 式(10)为单频信号 $s^d(t) = A \exp[j(2\pi f_c t + \psi_0)]$, 即信号能量集中在频率 f_c 处, 信号频谱值在 f_c 处达到最大。因此, 可通过优化信号模型参数 \mathbf{P} 使 $s^d(t)$ 在载波频率 f_c 处的频谱值达到最大, 即

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{P}} &= \underset{\mathbf{P}}{\operatorname{argmax}} \left| \left\{ [\mathcal{F} s(t) \Phi(t; \mathbf{P}, f_c)] \right\}_{f=f_c} \right| = \\ &= \underset{\mathbf{P}}{\operatorname{argmax}} \left| \int_R s(t) \Phi(t; \mathbf{P}, f_c) \exp(-j 2\pi f_c t) dt \right| \end{aligned} \quad (11)$$

式中: \mathcal{F} 为傅里叶变换; f 为频率变量。

需要注意的是, 原始信号由解调信号调制得到, 即

$$\begin{aligned} s(t) &= s^d(t) \times \operatorname{conj}[\Phi(t; \mathbf{P}, f_c)] = \\ &= s^d(t) \times \exp\left\{j 2\pi \left[\int_0^t g(\gamma; \mathbf{P}) d\gamma - f_c t \right]\right\} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: conj 为复数共轭。

2 基于参数化解调的微多普勒频率估计方法

由于旋转目标的微多普勒频率随时间正弦变化, 因此提出基于正弦模型的参数化解调方法, 用于提取目标微多普勒频率。将式(7)整理为

$$f_i^{\text{MD}}(t) = a_i \sin(2\pi f_r t + \phi_{i0}) \quad (13)$$

式中: a_i 为多普勒频率幅值, $a_i = 4\pi f_r l_{i1} / \lambda$; $\phi_{i0} = \varphi_{i0} + \pi$ 。参照式(9), 构造与式(13)相匹配的参数化解调算子, 即

$$\Phi(t; \mathbf{P}_i, 0) = \exp\left[j \frac{a_i}{f_r} \cos(2\pi f_r t + \phi_{i0})\right] \quad (14)$$

式中: f_c 为载波频率, $f_c = 0$ (参考式(9)); $\mathbf{P}_i = \{a_i, f_r, \phi_{i0}\}$ 为待估计的模型参数集。参照式(11)可估计微多普勒频率参数, 即

$$\tilde{\mathbf{P}}_i = \underset{\mathbf{P}_i}{\operatorname{argmax}} \left| \int_R s^r(t) \Phi(t; \mathbf{P}_i, 0) dt \right| \quad (15)$$

式中: $s^r(t)$ 为雷辔回波信号(见式(5))。采用粒子群优化算法对式(15)进行优化求解^[14]。

回波信号包含 K 个信号分量, 由于强信号分量对弱信号分量的估计有抑制作用, 通常只能估计到能量最强(即 σ_i 最大)的信号分量参数。为得到所有 K 个散射点的微多普勒频率参数, 采用迭代估计算法, 将估计到的强信号分量从原始信号中剔除(消除强信号分量的干扰), 从剩余信号中估计其他的弱信号分量参数。

算法流程具体步骤如下:

- 1) 令 $i = 1$;

2) 从回波信号 $s^r(t)$ 中估计第 i 个散射点的微多普勒频率参数 $\tilde{\mathbf{P}}_i$, 见式(15);

3) 利用所估的频率参数, 对回波信号解调处理, $s^d(t) = s^r(t)\Phi(t; \tilde{\mathbf{P}}_i, 0)$, 这里载波频率 $f_c = 0$, 即第 i 个信号分量将被解调到基带;

4) 利用低通滤波器, 从解调信号 $s^d(t)$ 中提取第 i 个分量的基带信号, 其表达式为 $\tilde{s}_i^b(t) = \text{LPF}[s^d(t)]$, 其中 LPF 代表低通滤波;

5) 对基带信号进行调制, 恢复信号分量, $\tilde{s}_i(t) = \tilde{s}_i^b(t) \times \text{conj}[\Phi(t; \tilde{\mathbf{P}}_i, 0)]$ (参考式(12));

6) 将提取到的信号分量从原始回波信号中剔除, $s^r(t) = s^r(t) - \tilde{s}_i(t)$, 其中 $i = i + 1$;

7) 重复执行步骤 2)~6), 直到 $i \geq K$ 。

上述步骤中, 步骤 6) 将当前提取到的强信号分量从回波信号中移除, 因此该算法能在下次迭代中从剩余信号估计到其他能量较弱的信号分量参数。上述算法经过 K 次迭代可提取所有散射点的微多普勒频率参数。算法流程如图 2 所示。

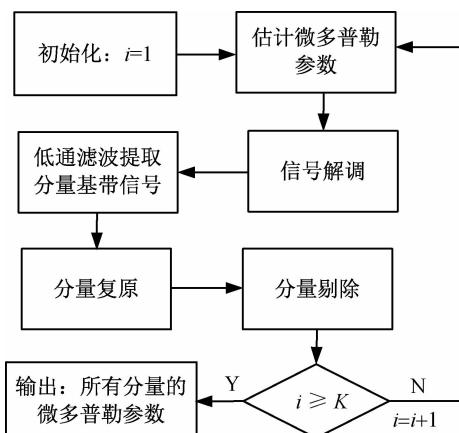


图 2 算法流程

Fig. 2 Flowchart of algorithm

3 算法验证

3.1 仿真验证

雷达波长 $\lambda = 0.06$ m; 雷达与旋转目标中心的距离 $l_0 = 500$ m; 目标包含 3 个强散射点, 其旋转半径分别为 $l_{11} = 3$ m, $l_{21} = 2.5$ m, $l_{31} = 1$ m; 初始旋转角分别为 $\varphi_{10} = \pi/3$ rad, $\varphi_{20} = 5\pi/6$ rad, $\varphi_{30} = 4\pi/3$ rad; 散射系数 $\sigma_1 = 3$, $\sigma_2 = 2.8$, $\sigma_3 = 2$; 目标旋转角频率 $f_r = 2$ Hz。假设信号被高斯白噪声污染, 信噪比为 0 dB, 则利用短时傅里叶变换得到含噪声的雷

达回波信号的时频分布, 仿真信号时频分布如图 3 所示。图中可见, 3 个散射点的微多普勒频率曲线在时频面上相互相交、重叠。

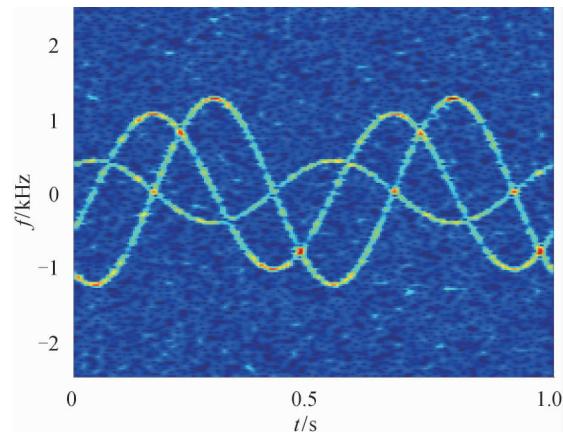


图 3 仿真信号时频分布

Fig. 3 Time-frequency distribution of simulated signal

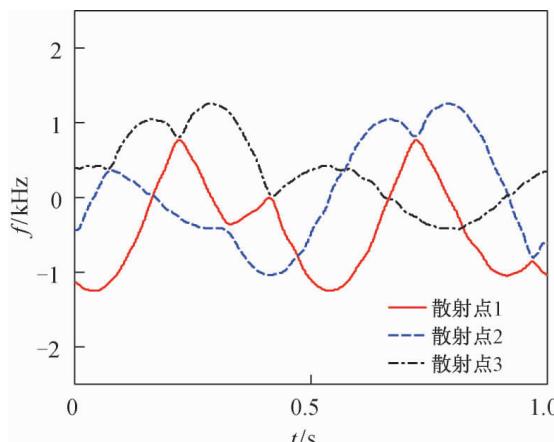
采用本文方法估计式(13)中的微多普勒模型参数, 包括微多普勒振幅 a_i 、振荡频率 f_r (目标旋转角频率)、初始相位 φ_{i0} 。进一步估计散射点的旋转半径 l_{ii} , $l_{ii} = \lambda a_i / (4\pi f_r)$ 。3 个散射点的参数估计结果见表 1。结果表明: 本文方法在强噪声干扰下能得到高精度的参数估计结果。

表 1 仿真信号微多普勒参数估计结果

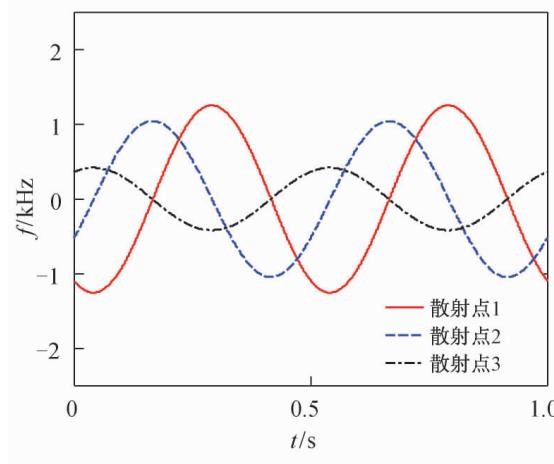
Tab. 1 Parameter estimation of micro-Doppler for simulated signal

散射点编号	类型	振幅 a_i / Hz	频率 f_r / Hz	相位 φ_{i0} / rad	半径 l_{ii} / m
1	真实值	1 256.60	2.000 0	4.188 8	3.000 0
	估计值	1 256.50	2.000 0	4.188 8	2.999 8
2	真实值	1 047.20	2.000 0	5.759 6	2.500 0
	估计值	1 047.30	2.000 0	5.759 5	2.500 3
3	真实值	418.88	2.0000	1.047 2	1.000 0
	估计值	418.95	2.000 2	1.047 0	1.000 1

分别用文献[11]中的方法和本文方法进行微多普勒频率提取, 对比结果如图 4 所示。文献[11]通过检测回波信号时频分布(见图 3)的局部峰值点提取微多普勒频率曲线。由图 4 可见: 不同曲线在交点处模糊, 局部峰值检测法在通过微多普勒频率交叉点后容易识别到错误信号分量, 而本文方法能正确识别交叉信号分量。



(a) 传统时频峰值检测法



(b) 本文参数化解调方法

图 4 仿真信号微多普勒频率提取结果对比

Fig. 4 Comparison of extracted micro-Doppler frequencies of simulated signal

3.2 实验验证

为验证本文方法在实际应用中的有效性,对雷达实测数据的微多普勒频率进行估计。实验装置与文献[15]中的类似,如图5所示。图中:2个金属圆筒以180°的间隔布置在转盘上,转盘以一定速度旋转运动;将2个金属圆筒视为2个旋转目标,并用发射频率为10.5 GHz(即波长为0.0285 m)的连续波雷达探测2个目标的旋转运动;2个圆筒距离旋转中心的距离都为0.1 m。

实测信号的时频分布如图6所示。由图可见,2个旋转目标的微多普勒频率曲线随时间正弦变化,两曲线相位差约为180°。

用本文方法估计实验信号的微多普勒频率参数,结果见表2。实验中转盘的实际转速未知,无法提供各频率参数的真实值,但由估计到的频率参数

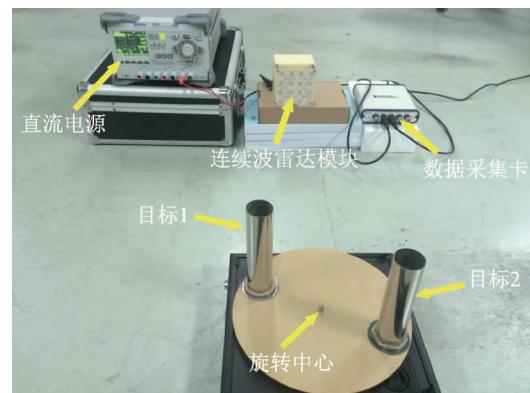


图 5 实验装置

Fig. 5 Experimental devices

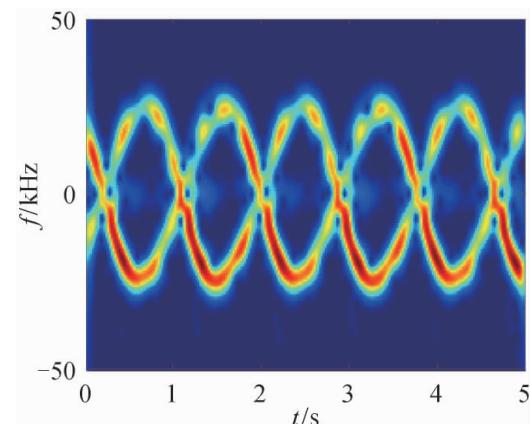


图 6 实验信号时频分布

Fig. 6 Time-frequency distribution of experimental signal

计算得到的目标旋转半径 l_{i1} 与实际半径(0.1 m)的误差不超过2%。实验结果表明:本文方法对于实测雷达数据仍具有较高的频率估计精度。

表 2 实验信号微多普勒参数估计结果

Tab. 2 Parameter estimation of micro-Doppler for experimental signal

目标编号	振幅 a_i / Hz	频率 f_r / Hz	相位 φ_{i0} / rad	半径 l_{i1} / m
1	24.318 7	0.560 4	2.520 9	0.098 4
2	24.943 5	0.559 8	5.707 8	0.101 1

本文方法与传统时频峰值检测法得到的微多普勒频率曲线对比如图7所示。由图可见:传统时频峰值检测法无法正确识别交叉的信号分量,且由于其受其他信号分量的干扰,提取到的频率曲线出现了局部波动和毛刺;本文方法采用与信号匹配的参数化模型,抗干扰能力强,能得到精确的微多普勒频率曲线。

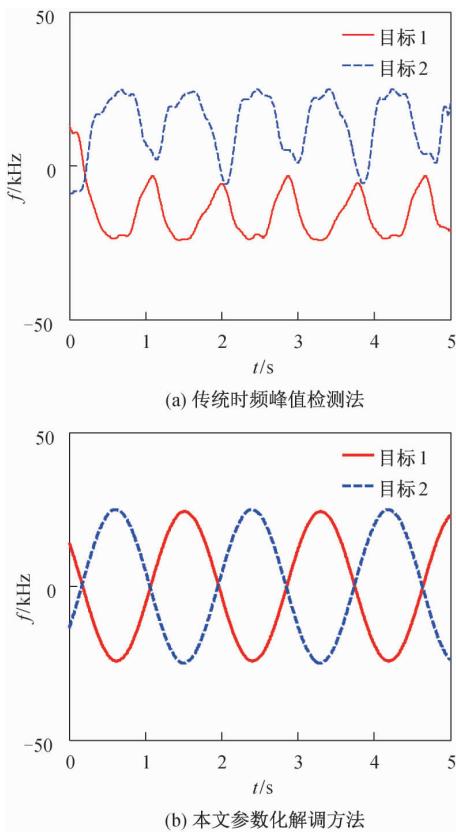


图7 实验信号微多普勒频率提取结果对比

Fig. 7 Comparison of extracted micro-Doppler frequencies of experimental signal

4 结束语

本文对旋转目标的微多普勒频率提取问题进行了研究,分析了基于等效散射点模型的旋转目标雷达回波信号解析形式。针对信号模型特征,提出了基于正弦模型的参数化解调方法,以提取旋转目标的微多普勒频率。在算法具体实施中,采用迭代频率提取方法,逐个获取每个散射点的微多普勒频率。在仿真实验中,将本文方法与传统时频峰值检测法进行对比。结果表明:本文方法能有效提取相互交叉的微多普勒频率曲线,算法精度高,抗干扰能力强,得到的微多普勒频率可进一步用于目标运动参数识别提取,在识别、监测弹道导弹飞行参数等方面具有重要应用前景。后续将基于该方法开展航天领域雷达目标识别应用的系统研究。

参考文献

- [1] 张群,罗迎,何劲.雷达目标微多普勒效应研究概述[J].空军工程大学学报(自然科学版),2011,12(2):22-26.
- [2] 陈爱武.微多普勒效应分析与应用研究[D].南京:南京理工大学,2007.
- [3] 肖金国,杜兰,韩勋,等.基于参数化时频分析的进动锥裙目标瞬时微多普勒频率提取方法[J].电子与信息学报,2016,38(1):90-96.
- [4] 李彦兵.基于微多普勒效应的运动车辆目标分类研究[D].西安:西安电子科技大学,2013.
- [5] 赵紫蕙.微多普勒效应在飞机目标分类中的应用研究[D].西安:西安电子科技大学,2014.
- [6] 张伟,贺振华,姚广孝.一种算术平均时频变换微多普勒快速提取方法[J].上海航天,2016,33(1):10-12,54.
- [7] BAI X, XING M, ZHOU F, et al. Imaging of micromotion targets with rotating parts based on empirical-mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(11): 3514-3523.
- [8] 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.
- [9] THAYAPARAN T, SURESH P, QIAN S, et al. Micro-Doppler analysis of a rotating target in synthetic aperture radar[J]. IET Signal Processing, 2010, 4(3): 245-255.
- [10] 王义哲,冯存前,李靖卿,等.弹道中段多目标微多普勒分离方法[J].北京航空航天大学学报,2017,43(1):113-120.
- [11] THAYAPARAN T, STANKOVIC L J, DJUROVIC I. Micro-Doppler-based target detection and feature extraction in indoor and outdoor environments[J]. Journal of the Franklin Institute, 2008, 345(6): 700-722.
- [12] YANG Y, DONG X, PENG Z, et al. Component extraction for non-stationary multi-component signal using parameterized de-chirping and band-pass filter [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(9): 1373-1377.
- [13] CHEN V C. 雷达中的微多普勒效应[M].北京:电子工业出版社,2013.
- [14] 赵新超,刘国莅,刘虎球,等.基于非均匀变异和多阶段扰动的粒子群优化算法[J].计算机学报,2014,37(9):2058-2070.
- [15] ANABUKI M, OKUMURA S, SATO T, et al. Ultra wideband radar imaging using adaptive array and Doppler separation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(1): 190-200.

(本文编辑:应振华)