

文章编号: 2095-4980(2022)04-0306-06

太赫兹双频雷达目标微动特征提取仿真

张成鑫, 鄢 扬*, 傅文杰

(电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 610054)

摘 要: 基于双频太赫兹回旋管设计了双频太赫兹雷达, 针对振动、转动、翻滚运动目标建立了包含微多普勒信息的目标回波模型, 采用时频分析方法开展了微动特征仿真计算。通过仿真结果可以看出, 0.11 THz 雷达和 0.22 THz 雷达对于振动、旋转、翻滚的微动特征都有厘米级的探测能力。在较强噪声条件下, 通过自功率谱时频分析, 可以抑制噪声, 提高微动特征的探测能力。通过 0.11 THz 及 0.22 THz 两路回波基带信号的互功率谱时频分析, 其相同频率的微动特征信息得到增强, 同时噪声得到抑制, 有利于微动特征信息的提取。

关键词: 太赫兹; 回旋管; 特征提取; 时频分析; 微多普勒

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020088

Simulation on target micro-motion feature extraction based on terahertz dual frequency radar

ZHANG Chengxin, YAN Yang*, FU Wenjie

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China)

Abstract: A dual frequency terahertz radar is designed based on the dual frequency terahertz gyrotron. The targets echo model including micro-Doppler information is established for the vibration, rotation and rolling targets. The simulation of micro-motion feature extraction is carried out by using the time-frequency analysis method. The simulation results show that the 0.11 THz radar and 0.22 THz radar have centimeter level detection ability for micro-motion feature extraction of vibration, rotation and roll. Under the condition of strong noise, the self-power spectrum time-frequency analysis can suppress the noise and improve the detection ability of micro-motion feature extraction. Through the cross-power spectrum time-frequency analysis of 0.11 THz and 0.22 THz radar echo baseband signals, the micro-motion feature extraction of the same frequency is enhanced, and the noise is suppressed, which helps to extract micro-motion feature information.

Keywords: terahertz; gyrotron; feature extraction; time-frequency analysis; micro-Doppler

近年来, 随着太赫兹源、检测和 Related 器件的突破, 太赫兹雷达发展迅速。由于太赫兹频率较高, 具有多普勒敏感性, 非常有利于目标的检测和识别, 因此, 太赫兹雷达微动目标特征提取是十分有意义的研究领域^[1]。微动指的是目标或目标组成部分在径向相对雷达的小幅非匀速运动或运动分量, 由此带来的多普勒频移和频带展宽称为微多普勒^[2]。微动在自然界和实际生活中普遍存在, 如车辆引擎带来的车体振动、人体的心跳及行走时四肢的摆动、直升机螺旋桨旋转、桥梁的振动等等。微动目标的微多普勒特征可以反映目标的电磁特性、几何结构和运动特征, 为雷达目标特征提取和目标识别提供了新的途径。自 2006 年美国海军研究实验室(Naval Research Laboratory) Victor. C. Chen 教授提出微多普勒这一概念以来, 微多普勒特征引起了国内外学者的广泛关注, 并出现了研究目标微动和微多普勒的高潮^[2-6]。双频雷达是一种能同时在两个频段上工作的新体制雷达。与常规雷达相比, 双频雷达具有目标发现概率高和抗干扰能力强的显著特点, 这使得双频雷达对复杂电磁环境具有很好的适应能力。另外双频雷达其低频率雷达具有更远距离的探测能力, 对应其高频雷达具有更高分辨力的

收稿日期: 2020-03-07; 修回日期: 2021-05-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61401064); 四川省科技项目资助(2018HH0136)

*通信作者: 鄢 扬 email:yanyang@uestc.edu.cn

探测能力，二者可以相辅相成，互补不足。

目前高频率的回旋管是重要的大功率辐射源，国际上正在大力研究，已经取得较大进展。电子科技大学已经研制出多支 0.22 THz 和 0.42 THz 回旋管^[7-10]，并在双频太赫兹回旋管研制方面取得进展^[11]。这些研究作为远距离目标的微动特征探测和提取提供了可能。

本文基于双频脉冲回旋管设计了 0.11 THz 及 0.22 THz 双频脉冲雷达系统，针对振动、转动、翻滚运动目标建立了包含微多普勒信息的目标回波模型，采用时频分析的方法提取微动特征参数，之后利用回波信号的自功率谱时频分析和互功率谱时频分析方法，进一步提高微动特征，降低了噪声的影响程度。

1 双频雷达模型

太赫兹双频雷达原理框图如图 1，双频太赫兹回旋管在脉冲调制器驱动下，同时产生 0.11 THz 和 0.22 THz 电磁波，通过准光模式转换器将高阶模式的太赫兹波转换为高斯波束，再经反射面天线向外空间辐射。太赫兹波被运动目标反射后其回波信号送至接收天线，分别经过 0.11 THz 混频器及 0.22 THz 混频器混频后取基带信号并通过中频放大，经相参处理后送至数字信号处理系统进行测距、测速及微动特征提取等处理及分析。本地振荡器为 0.11 THz 混频器提供参考信号，它经二倍频后同时送给 0.22 THz 混频器作为参考信号，两路信号的相位是同步的，系统是相参系统。信号相参处理模块将发射信号与接收信号的相位做一定的处理，以提高雷达的测量精确度及抗干扰能力。

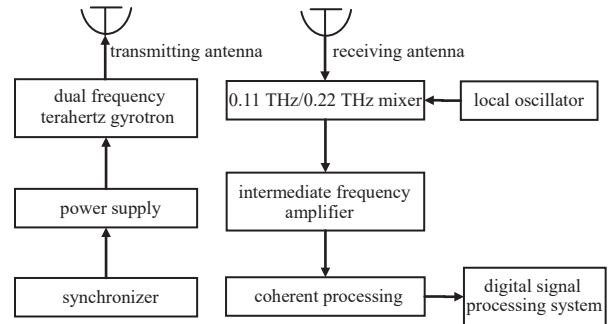


Fig.1 Block diagram of pulse terahertz radar
图 1 太赫兹脉冲雷达框图

由于回旋管振荡器属于非相参太赫兹波脉冲功率源，需要对信号进行相干处理，以获取到相参太赫兹信号。相参信号可以通过文献[12]中提出的中频相参处理方法获得。图 1 中，同步信号发生器为回旋管以及相干处理系统提供同步信号。混频器可采用常温谐波混频器，也可采用低温超导混频器，以获得更低的噪声系数。

2 微动目标模型

常见的目标微动模型大概有 4 种，分别为振动、转动、翻滚和锥旋^[4]。对于这几类目标的微动，可通过数学建模得到微多普勒数学模型。假设雷达所在的坐标系为 (X, Y, Z) ，雷达位于坐标原点 O 处，如图 2 所示。目标所在坐标系为 (X', Y', Z') ，目标质心位于坐标原点 O' 处。雷达到目标的距离为矢量 R_0 ，目标坐标系的坐标轴相对于雷达坐标系的坐标轴的方向由 3 个独立的角度表示。令 r 为目标坐标系中任意一点 P 的位置，那么其在目标坐标系中的位置为 $(R_0 + r)$ ，其速度矢量为：

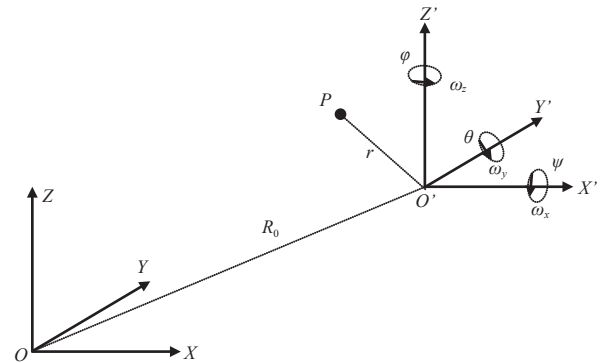


Fig.2 Geometry relationship between radar and the target
图 2 雷达与微动目标的几何示意图

$$v = \frac{d}{dt} (R_0 + r) = V + \Omega \times r \tag{1}$$

式中： V 是目标旋转中心的平动速度； Ω 是目标转动的角速度矢量。

雷达发射载频为 f 的正弦波脉冲信号，散射点 P 的回波信号是雷达与 P 点之间距离 $r(t) = |R_0 + r|$ 的函数：

$$s(t) = \begin{cases} \sigma \exp \left[2\pi f t - j 2\pi f \frac{2r(t)}{c} + \theta \right], & iT_r \leq t \leq (i+1)T_r \\ 0, & \text{others} \end{cases} \tag{2}$$

式中： c 为真空中的光速； T 为脉冲宽度； T_r 为重复周期； θ 为初始相位； σ 为散射点的散射系数； i 表示第 i 个脉冲。

设本振参考信号可表示为：

$$z_i(t) = \exp(2\pi f t + \theta), iT_r \leq t \leq (i+1)T_r \tag{3}$$

在接收端，回波信号和本振参考信号混频后，输出散射点 P 的基带回波信号，可以表示为：

$$s(t) = \sigma \exp \left[-j2\pi f \frac{2r(t)}{c} \right] = \sigma \exp [j\Phi(t)] \quad (4)$$

式中：相位 $\Phi(t) = -2\pi f \frac{2r(t)}{c}$ 。对相位求时间导数，可以得到目标运动引起的多普勒频移为：

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{2f}{c} \frac{d}{dt} r(t) = \frac{2f}{c} \frac{d}{dt} [(\mathbf{R} + \mathbf{r})^T \cdot \mathbf{n}] = \frac{2f}{c} (\mathbf{V} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r})^T \cdot \mathbf{n} \quad (5)$$

式中：正体上标 T 表示向量的转置； $\mathbf{n} = \left(\frac{\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|} \right)$ 是径向速度的单位矢量，等式最右端第一项是平动引起的多普勒频移，第二项是转动引起的微多普勒频移。

取微多普勒频移 $f_{\text{micro-Doppler}}$ 为：

$$f_{\text{micro-Doppler}} = \frac{2f}{c} (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r})^T \cdot \mathbf{n} \quad (6)$$

从式(6)可以看出，微动目标的雷达回波在相位上存在调制。含有微多普勒信息的目标回波会在频域展宽，这种现象在太赫兹频段尤为明显。对于 0.11 THz 和 0.22 THz 频率的脉冲体制雷达，0.22 THz 脉冲雷达微多普勒频率是 0.11 THz 的 2 倍。

3 双频太赫兹脉冲雷达目标特征参数提取算法

微多普勒产生时变的频率调制。对于时变频率特征的分析，常用的傅里叶变换和逆 Radon 变换不再适用。傅里叶变换不能提供与时间有关的频率信息，且微多普勒混叠后导致信号频谱发生折叠，无法通过回波频谱进行参数估计；逆 Radon 变换由于微多普勒混叠后，时频图上不完整的正弦曲线无法经过逆 Radon 变换在参数域进行聚焦。

采用时间-频率联合信号分析方法，将一维时间信号映射到一个二维的时频平面，在时频域内对信号进行分析，反映雷达回波信号的时频联合特征。

短时间傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)是最常用的分析方法，其表达式为：

$$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) w(\tau - t) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (7)$$

式中： $\omega = 2\pi f$ 是角频率； $w(t)$ 是时间窗函数。但是 STFT 分析方法在时间分辨率和频率分辨率上不可能同时达到最好。平滑伪 Wigner-Ville 分布(Smoothed Pseudo-Wigner-Ville Distribution, SPWVD)是时频分析中的一种重要方法，具有时频聚散好、分辨力高的优点。对于信号 $s(t)$ 的 SPWVD 的表达式为：

$$SPWVD_s^{g,h}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) H(f) s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (8)$$

式中： $g(t)$ 为时域加窗函数； $H(f)$ 为频域加窗函数；两个函数窗都是偶函数窗，且有 $g(0) = h(0) = 1$ 。

为了提高在回波信号信噪比较低情况下进行信号分析，同时充分利用双频体制雷达的特点，采用互功率谱时频分析方法提取两路信号的微动特征，使得两路具有相同频率的信号能量得到增强，更能在强噪声背景下提取微动信号的特征信息。信号 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 的互谱时频分析的表达式为：

$$XSPECTROGRAM_{s_1, s_2}^w(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(\tau) s_2^*(t - \tau) w(\tau - t) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (9)$$

若两路信号为同一信号，则为自功率谱时频分析。

4 仿真计算

4.1 振动和旋转目标特征提取

振动和旋转是最基本的两种微动形式，在对信号回波进行分析时，可以将振动和旋转两种运动看成一种形式。假设有两个散射点的振动或旋转目标，雷达距目标的距离为 1 km，两个散射点目标在雷达的径向方向做振

动运动，振动幅度分别为 5 mm 和 20 mm，振动频率分别为 4 Hz 和 2.5 Hz，初始相位分别为 0 rad 和 0.3 rad。0.11 THz 雷达和 0.22 THz 雷达两路基带回波信号的采样点数为 4 096，信噪比分别为 10 dB 和 5 dB，观测时间为 1 s。对两路基带信号分别做 STFT、SPWVD、自功率谱时频分析和互功率谱时频分析。

从图 3 中可以看出，散射点做振动或者旋转运动，0.22 THz 雷达提取到的微动频率是 0.11 THz 雷达的两倍。通过图 3(b)和图 3(d)可以看出，SPWVD 时频分析可以在抑制噪声的同时，在较高的分辨力下提取微动特征信号，有较小的交叉项干扰。通过图 3(c)和图 3(e)可以看出，在较差的信噪比条件下，通过雷达基带信号的自功率谱时频分析，可以抑制噪声，增强微动特征，提高分辨力。

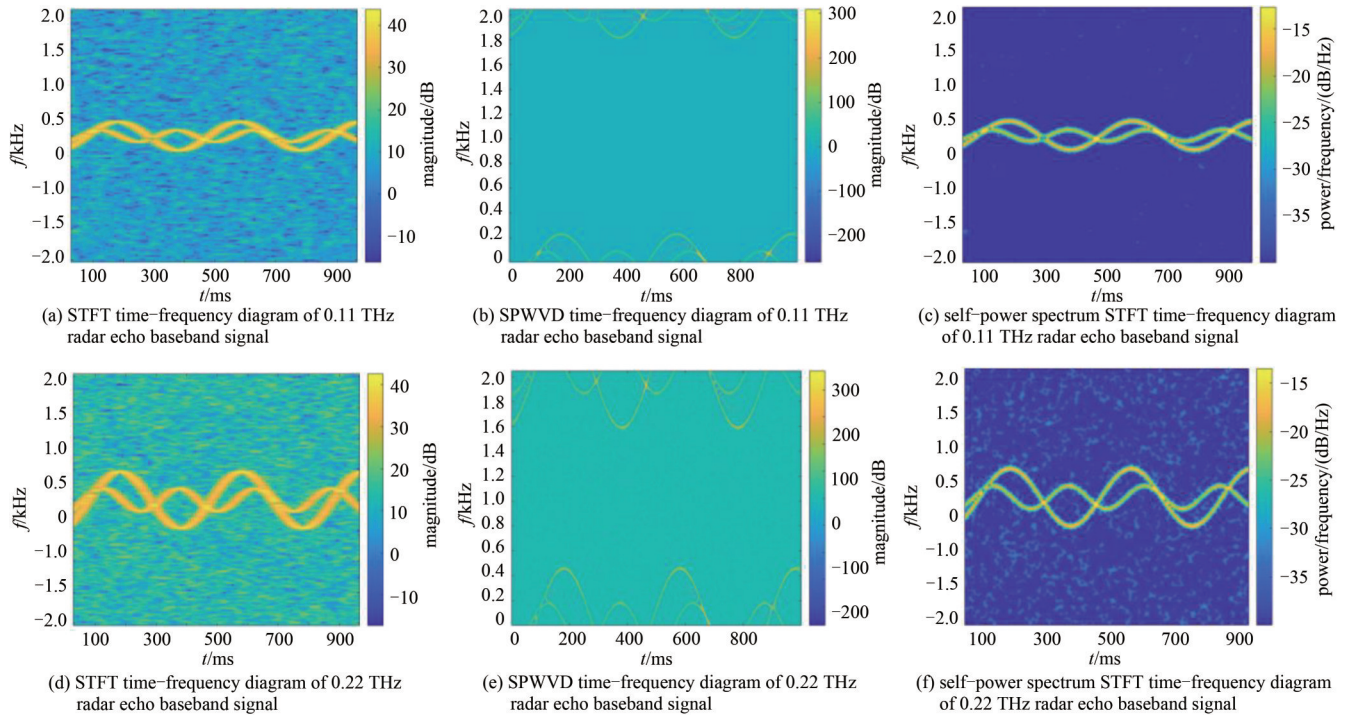


Fig.3 Time-frequency diagram of radar baseband echo signal for vibrating (rotating) target
图3 振动(旋转)目标的雷达回波基带信号时频图

从图 4 可以看出，通过两路雷达信号的互相关，相同频率的信号得到增强，有利于提取雷达信号的微动特征。

从仿真结果可以看出，SPWVD 变换比 STFT 变换有更高的时频分辨力，但是 SPWVD 变换有较小的交叉项干扰。自功率谱及互功率谱时频变换有更好的抗噪性能，没有交叉项干扰，背景更为干净，信号与背景差异较大，时频分辨力比 STFT 变换要高，更利于信号的提取与分析。

4.2 翻滚目标特征提取

微翻滚运动为平动和振动或者旋转的复合运动。假设一个有 3 个散射点的目标做翻滚运动，雷达距目标的初始距离为 1 km，3 个散射点沿雷达径向速度为 0.05 m/s，加速度为 0.02 m/s²，散射系数分别为 0.8,1,1，振动或者旋转幅度分别为 5 mm,15 mm,20 mm，频率分别为 3 Hz,2.5 Hz, 2 Hz，初始相位分别为 0,0.3 rad,0.5 rad。0.11 THz 雷达和 0.22 THz 雷达两路基带回波信号的采样点数为 4 096，信噪比分别为 0.5 dB 和 0.1 dB，观测时间为 2 s。对两路基带信号分别做 STFT、SPWVD、自功率谱时频分析和互功率谱时频分析。

从图 5 中可以看出，目标散射点进行平动的同时做伴随振动或者旋转，整体做微翻滚运动，0.22 THz 雷达比 0.11 THz 雷达的微动特征更明显。通过图 5(b)和图 5(e)可以看出，SPWVD 时频分析可以在抑制噪声的同时，微动

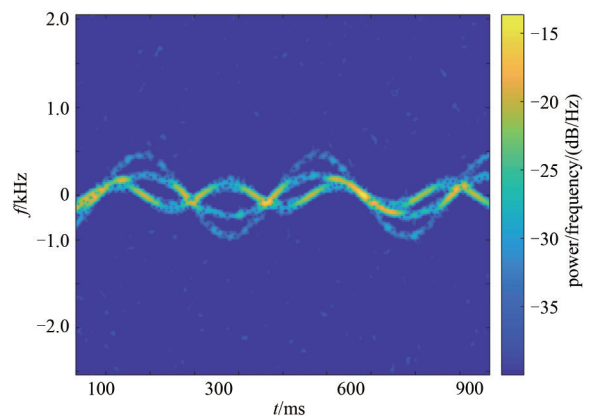


Fig.4 Cross-power spectrum time-frequency diagram of vibrating (rotating) target radar baseband echo signal
图4 振动(旋转)目标的雷达回波基带信号互谱时频图

特征分辨力也较高,有较小交叉项的干扰。通过图 5(c)和图 5(f)可以看出,在很差的信噪比条件下,通过雷达基带信号的自功率谱时频分析,可以抑制噪声,增强微动特征,分辨力较高。

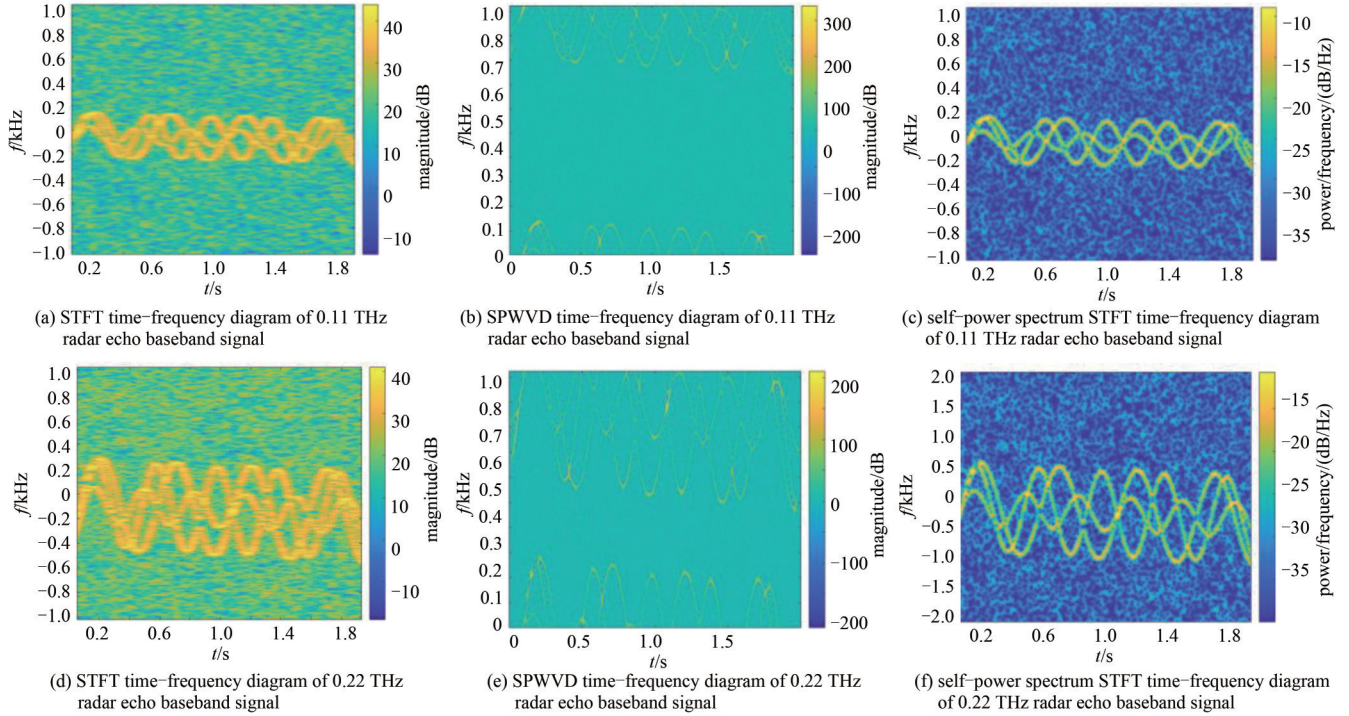


Fig.5 Time-frequency diagram of radar baseband echo signal for rolling target

图 5 翻滚目标的雷达回波基带信号时频图

从图 6 可以看出,通过两路雷达信号的互相关,相同频率的信号得到增强,噪声得到一定程度的抑制,可以作为在较强噪声干扰条件下的微动特征的提取方法。

从仿真结果可以看出,当信号噪声变大时,SPWVD 变换比 STFT 变换有更高的时频分辨力和抗噪性能,但是 SPWVD 变换的交叉项干扰变大。自功率谱及互功率谱时频变换在强噪声条件下仍有很好的抗噪性能,且没有交叉项干扰,时频分辨力也比 STFT 变换要高,信号与背景差异较大,能够更有效地展现出强噪声情况下目标回波的时频特征,更利于信号的提取与分析。

5 结论

通过仿真结果可以看出,0.11 THz 雷达和 0.22 THz 雷达对于振动、旋转、翻滚的微动特征都有厘米级的探测能力,在 5 mm 的散射点目标的微动特征也能够提取,0.22 THz 雷达能够探测到更明显的微动特征。通过 SPWVD 时频分析,在较强噪声条件下,仍能够保持较好的时频分辨力,有较小的交叉干扰。在较强噪声环境下,通过自功率谱时频分析,可以抑制噪声,提高微动特征的探测能力。通过 0.11 THz 及 0.22 THz 两路回波基带信号的互相关时频分析,其相同频率的信号得到增强,同时噪声得到抑制,可以获取到相关微动特征信息。本文提出的方法针对太赫兹雷达远距离高精度微动特征探测与提取具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 杨琪,邓彬,王宏强,等. 太赫兹雷达目标微动特征提取研究进展[J]. 雷达学报, 2018,7(1):22-45. (YANG Qi,DENG Bin,WANG Hongqiang,et al. Advancements in research on micro-motion feature extraction in the terahertz region[J]. Journal of Radars, 2018,7(1):22-45.)

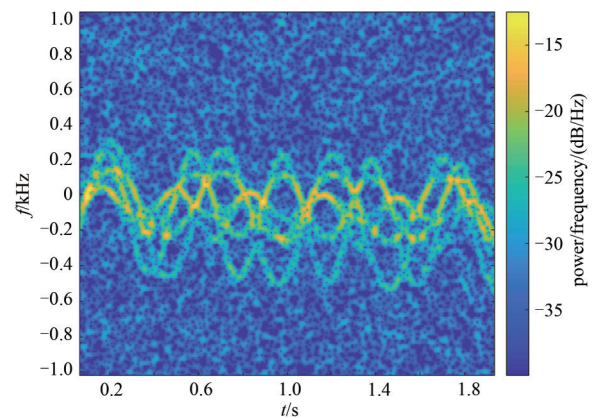


Fig.6 Cross-power spectrum time-frequency diagram of radar baseband echo signal for rolling target

图 6 翻滚目标的雷达回波基带信号互谱时频图

- [2] CHEN V C, LI F, HO S S, 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.
- [3] YANG Yang, HOU Chunping, LANG Yue, et al. Person identification using micro-Doppler signatures of human motions and UWB radar[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019,29(5):366–368.
- [4] 何其芳, 吴义成, 张群, 等. 多重观测矢量模型下的微动目标特征提取[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(5): 904–909. (HE Qifang, WU Yicheng, ZHANG Qun, et al. Micro-Doppler target feature extraction with a multiple measurement vector model[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(5):904–909.)
- [5] GARRY J L, SMITH G E. Experimental observations of micro-Doppler signatures with passive radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019:55(2):1045–1052.
- [6] 曾涛, 卢峰灵, 向寅, 等. 一种强杂波环境下雷达目标微振动信号提取方法[J]. 信号处理, 2019,35(6):935–943. (ZENG Tao, LU Yiling, XIANG Yin, et al. A micro-oscillation signal extraction method for radar target in strong clutter environment[J]. Journal of Signal Processing, 2019,35(6):935–943.)
- [7] FU Wenjie, YAN Yang, LI Xiaoyun, et al. The experiment of a 220 GHz gyrotron with a pulse magnet[J]. Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves, 2009,31(4):404–410.
- [8] YAN Y, LI X, YUAN X, et al. A 0.423 THz second harmonic gyrotron oscillator[J]. Chinese Journal of Electronics, 2013,22(2): 415–418.
- [9] NIU Xinjian, LEI Chaojun, LIU Yinghui, et al. Study of the effect of the electron beam parameters on a 0.4 THz second harmonic gyrotron[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014,61(9):3324–3328.
- [10] ZHANG Tianzhong, ZHAO Qixiang, YU Sheng, et al. The nonlinear simulation, design and experiments on 0.42 THz gyrotron with gradually tapered complex cavity[J]. Vacuum, 2015,125(4):85–92.
- [11] 刘頔威, 鄢扬, 喻胜, 等. 双频工作同轴双电子注回旋管的理论与实验研究[J]. 电子科技大学学报, 2016,45(4):701–706. (LIU Diwei, YAN Yang, YU Sheng, et al. Theoretical and experimental investigations on the coaxial gyrotron with two electron beams[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2016,45(4):701–706.)
- [12] LOHRMANN D R. A coherent mm-wave radar using an incoherent transmitter[J]. Microwave Journal, 1991,34:150,152,154.

作者简介:

张成鑫(1982–), 男, 甘肃省庆阳市人, 在读博士研究生, 助研, 主要研究方向为太赫兹成像及太赫兹器件技术研究 .email:zhangchengxin12@163.com.

鄢扬(1965–), 男, 成都市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高功率微波方面的研究 .email:yanyang@uestc.edu.cn.

傅文杰(1981–), 男, 成都市人, 博士, 副教授, 主要从事高功率太赫兹辐射源方面的研究.