

雷达目标微动特性研究

刘永祥,李康乐,黎湘,姜卫东,庄钊文

国防科学技术大学电子科学与工程学院,长沙 410073

摘要 雷达目标微动特性是当前目标探测与识别领域的新兴研究方向和热点课题,随着近 10 年的发展积累了一些研究成果。本文重点综述了微动目标雷达回波调制效应、微动特征提取、微动目标雷达成像、微动特性测量及雷达波形设计等方面的研究成果,部分成果已应用于空间/空中目标探测与识别等领域。本文的研究成果及结论为进一步推动国内微动特性研究提供参考和基础。

关键词 微动;微多普勒;雷达目标;特征提取;ISAR 成像

中图分类号 TN95

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.22.012

Characteristic Analysis of Radar Target with Micro-motions

LIU Yongxiang, LI Kangle, LI Xiang, JIANG Weidong, ZHUANG Zhaowen

School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Abstract The analysis of radar targets in micro-motions is an emerging technical hotspot in the field of radar target acquisition and identification, and much progress has been made during this decade. Some scientific issues related to micro-motion analysis are discussed in this paper, such as the modulation in radar returns induced by micro-motions, the extraction of micro-motion features, the radar imaging for targets in micro-motions, and the radar waveform designing oriented to micro-motion features. Some of the research achievements have already applied in the fields of aerial and spatial target acquisition and identification.

Keywords micro-motion; micro-Doppler; radar target; feature extraction; ISAR imaging

0 引言

近 10 年来,目标微动特性在目标探测与识别领域的重要价值引起了国内外学术界和工程界的关注,为推动国内在微动特性方面的研究,本文作者撰写过目标微动特性进展的综述文章^[1],重点从微动的内涵、在目标探测与识别中的应用前景以及需要解决的难点问题等进行了阐述和分析,5 年过去了,随着研究的不断深入和成果的丰富,本文重点总结和归纳在微动调制效应、特征提取、微动目标雷达成像、微动测量及波形设计等方面取得的成果,以供参考。

微动(micro-motion,亦称为微运动)起源于激光测量雷达,特指目标细微的运动引起激光回波中多普勒的变化,称为微多普勒(micro-Doppler),后有学者将该概念引入到雷达探测领域中^[2-7],微动也扩展为使雷达回波产生时变多普勒效应的多种运动形式的统称,微多普勒内涵变为时变的多普勒,可以说,目标微动表征了目标运动状态的细节,如点目标

的非匀速运动,刚体目标的转动,非刚体目标部件间的相对运动等。微动在各目标探测领域广泛存在,如人行走、桥梁摆动、雷达天线转动、舰船摆动、直升机旋翼转动、飞机颤动、中段弹头进动等^[2,5,7-8]。

雷达目标微动特性研究,是指利用雷达探测具有微动状态的目标,从雷达回波中获取微动特征及信息,实现目标状态估计与识别,具体包括运动特性建模、微动对雷达波的调制效应分析、微动特征提取与参数估计、微动特性测量等研究内容,涉及姿态力学、电磁散射、时频分析、参数估计、系统设计等多学科知识,基础性强,交叉性明显,一旦突破,对目标探测与识别领域具有重要推动作用。

雷达目标微动特性研究是将“微动现象”推向“微动特性识别与应用”的重要环节,与目标微动状态、雷达参数、信号处理等多种因素有关,其难点在于微动特征信号在整个雷达回波中能量弱、幅度小,并且具有非线性、非平稳、多分量等

收稿日期:2011-05-19;修回日期:2011-07-21

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(61025006);国家自然科学基金项目(60872134,61072117)

作者简介:刘永祥,副教授,研究方向为雷达目标微动特性,电子信箱:lyx_bible@sina.com

特点^[9-10]。目前,领域内有学者认为雷达目标微动特性获取是一个技术难题,尤其是在传感器工作频段不高的情况下(相对于激光频段),微动特征信号不明显,特征信号提取难度大,甚至有学者对研究雷达目标微动特性持保留态度,认为难以从目标回波中提取。

本文通过系统总结微动对雷达波的调制效应、微动特征信号提取和微动特性测量等方面的研究成果,从信号处理和雷达测量两个方面回答“如何获取微动目标的特征信号”的科学问题,为后续的目标状态估计与识别提供基础,并推动成果在目标探测与识别领域的应用。论文主要包括三部分内容,首先分析了目标微动对雷达波的调制效应,揭示出微动目标雷达回波具有多成分调频调幅特点,并重点分析了微动对大带宽时宽雷达信号的调制效应;第二部分重点研究微动特征提取的技术途径,包括微动信号分离、微动目标雷达成像、微动参数估计等;第三部分,以一种新的雷达信号波形为例,介绍了面向微动特征获取的波形设计思路。

1 微动目标对雷达回波的调制特性分析

微动目标雷达回波调制特性分析主要是揭示目标运动、结构、散射等信息在雷达回波信号中的表现形式,以期基于雷达回波的微动特征提取提供理论基础,调制过程从物理原理上比较简单,难点在于具有时频耦合的雷达波形与目标结构、运动、散射等因素间的复杂作用关系^[11]。

1.1 多分量非线性调频调幅特性

微动目标对雷达回波的调制效应主要体现在雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)、多普勒谱、高分辨像等雷达特征信号上,蕴含了目标的几何结构及运动特性。微动引起的非线性频率调制,是一种时变多普勒特征,称为微多普勒,它是微动对雷达波的典型调制效应之一。常见的微动包括4种类型:旋转、振动、翻滚和进动,其特点是在雷达视线方向的基本运动形式为简谐运动,本文主要以此4种典型微动形式为研究对象,其微多普勒可表示为

$$f_{\text{mb}}(t) = \frac{2}{\lambda} [\omega \times r(t)]_{\text{radar}} = \frac{2\omega_0 A_0}{\lambda} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1)$$

其中, f_{mb} 为微多普勒, t 为时间, λ 为雷达信号波长, ω_0 为微动频率, A_0 为径向微动幅度, φ_0 为初始相位。可以看出,微多普勒本质上是由目标微动在雷达视线上的速度分量引起,在单频或窄带测量条件下,这4类典型微动引起的微多普勒表现为正弦调制的时变特性,且微多普勒幅度与微动幅度、微动频率、雷达视线角等因素有关,微多普勒调制描述了微动引起的瞬时多普勒变化特性,反映了目标的瞬时速度变化特性^[12]。

目标微动会引起雷达回波的非线性频率调制(主要是多普勒频率调制),目标微动中目标散射结构的变化也对雷达回波产生非线性幅度调制,该调制来源于两方面:一是雷达目标散射中心的各向异性,二是散射中心在微动过程中的迁移。当目标散射中心为各向异性时,雷达观测时微动目标的散射强度变化将对回波产生幅度调制,以目标进动为例,根

据几何绕射理论(Geometrical Theory of Diffraction, GTD),可以推导出进动角较小(小于15°)情况下的雷达目标散射中心强度变化规律:

$$\sigma(t) = \sigma_0 [\rho + \exp[B \sin(\omega_0 t + \eta)]] \quad (2)$$

其中, σ_0 , ρ , B , η 为拟合参数,这些参数与散射中心特性相关,当 $B=0$ 时, $\sigma(t)$ 为常数,表示各向同性散射中心,实验测量数据也验证了该变化规律,此时进动目标的雷达回波可表示为

$$s(t) = \sum_{l=1}^L \sigma_{0l} [\rho_l + \exp[B_l \sin(\omega_0 t + \eta_l)] \cdot \exp[j \frac{4\pi f_0}{c} [r_{0l} + A_{0l} \sin(\omega_0 t + \varphi_l)]] \quad (3)$$

其中, L 为目标等效散射中心个数,说明光学区雷达目标电磁散射可表示为多个等效散射中心的叠加。

基于上述分析,微动目标雷达回波呈多分量非线性调频调幅信号形式,其中,调频部分体现为由径向速度变化引起的多普勒频率调制,调频参数 A_l , φ_l 反映各个散射中心的相对位置;调幅部分体现为微动过程中姿态变化引起的散射强度调制,调幅参数 σ_{0l} , ρ_l , B_l , η_l 反映各个散射中心的散射特性。在实际雷达回波中,各散射中心可能存在不连续、遮挡等效应,使得雷达回波调制特性更加复杂。

1.2 目标微动对宽带雷达信号的调制特性分析

宽带雷达信号主要用于获取目标高分辨雷达像,包括高分辨距离像(High Resolution Range Profile, HRRP)和逆合成孔径(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)成像,微动会对宽带雷达像产生一定的调制影响。根据雷达信号和微动参数的相对关系,微动对高分辨距离像存在多种调制现象,本小节重点分析线性调频信号(Linear Frequency Modulation, LFM)和阶梯变频(Stepped Frequency, SF)两种典型宽带信号的微动调制效应。

线性调频雷达脉冲信号持续时间一般在微秒量级,大多数微动目标的微动频率一般不超过百赫兹,目标微动对单个脉冲回波特性影响可以忽略不计,可按照“停-走”模型进行分析。当目标微动幅度远大于距离分辨单元时,微动目标散射中心在一维距离像-慢时间序列中的位置呈正弦变化的规律;当目标做小幅微动时,即目标散射中心的微动幅度在1—2个距离分辨单元之内,在一维距离像-慢时间序列上看不出散射中心位置的明显变化,利用距离像峰值位置难以提取微动信息,此时距离像的调制信息主要体现在距离单元中的回波相位项上,相位随时间表现为正弦变化。

步进频雷达信号通常具有严重的时间多普勒耦合,目标运动会造成距离像移位和波形失真,此时微动引起的雷达回波调制效应更加复杂。当扫频周期远小于微动周期时,散射中心在距离像中的峰值位置随着时间的增长呈正弦规律变化,但是变化幅度与真实幅度存在差异,其移位失真因子 $\xi = \sqrt{(\omega_0 f_c T / \Delta f)^2 + 1}$ (其中, ω_0 为微动频率, f_c 为起始频率, T 为脉冲重复周期, Δf 为步进频率间隔),与微动参数和步进频参数有关,目标微动速度越快,引起的距离像移位失真越大。图1

为一个振动目标 (振幅为 0.4m, 振动频率为 4Hz) 的一维距离像-慢时间序列, 可以看出, 距离像峰值位置呈正弦规律变化, 幅度严重失真, 最大幅度达到 2.7m, 另外, 当微动速度较大时, 还会引起距离像展宽。当扫频周期大于微动周期时, 目标距离像表现为一系列谱峰群, 在初始位置两侧呈现多个“副像”, 根据距离像谱峰间隔可估计出微动频率, 该方法估计精度受信号频域分辨率限制, 在得到微动频率估计后, 再通过距离像谱峰展宽来估计目标微动幅度。

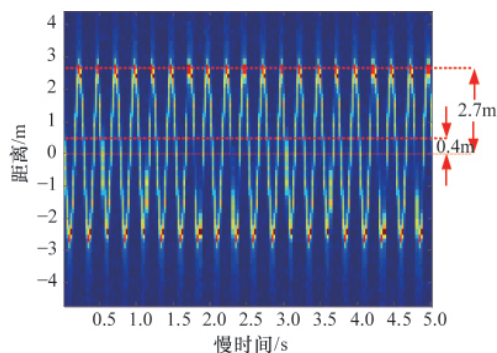


图 1 振动目标的高分辨距离像移位失真

Fig. 1 HRRP migrating distortion of target with vibration

1.3 微动调制特性的影响因素分析

雷达目标微动特性测量受目标特性、雷达信号等诸多因素影响, 除微动幅度、微动频率等参数外, 目标结构也会对测量产生影响。图 2 是锥体目标在有翼和无翼 (十字翼可拆卸) 进动状态下的雷达回波微多普勒时频图 (Time-frequency

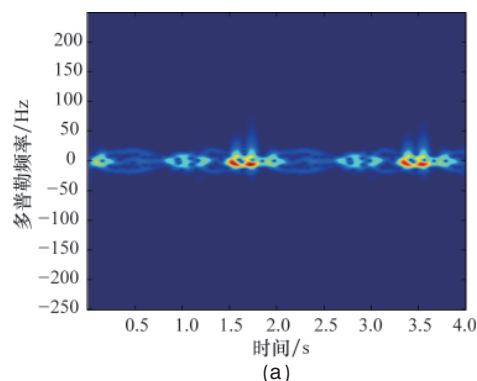


图 2 锥体目标无翼 (a) 和有翼 (b) 时的微多普勒时频图

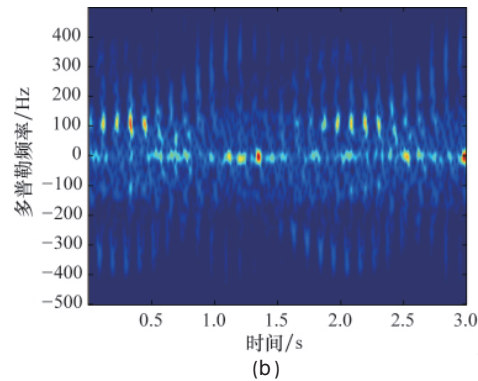
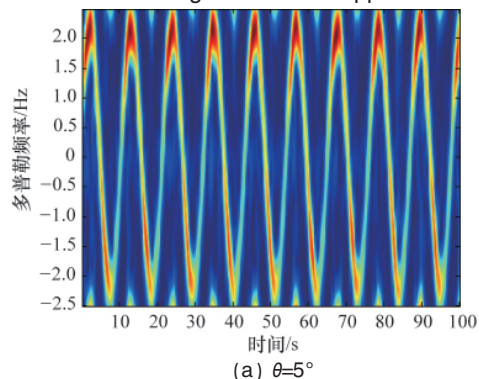
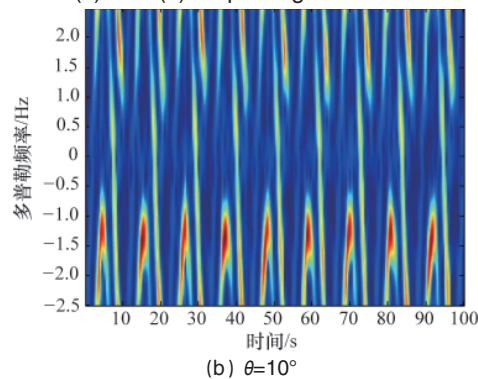


Fig. 2 Micro-Doppler TFD of cone without (a)/with (b) empenages



(a) $\theta=5^\circ$



(b) $\theta=10^\circ$

图 3 锥体目标不同进动角下的微多普勒时频图

Fig. 3 Micro-Doppler TFD of cone with different precession angles

Distribution, TFD), 其中, 雷达频率 10GHz, 进动周期 $T=2s$, 自旋频率 2Hz, 进动角 $\theta=8^\circ$, 平均视界角 $\alpha=30^\circ$, 结果表明, 在相同微动参数下, 有翼和无翼时雷达回波微多普勒特性有较大差异, 主要体现在:

(1) 有翼目标总体微多普勒幅度变大, 这是由于尾翼同时进行自旋和锥旋运动, 且自旋频率远大于锥旋频率, 增大了微多普勒分量;

(2) 有翼目标微多普勒出现明显的周期性强值, 这是由于尾翼的散射通常为二面角散射, 属于展布式散射中心, 散射强度变化符合 Sinc 调制特性;

(3) 相对于无翼目标, 有翼目标的微多普勒具有不连续性, 这是由于在大多数时间内有两个翼被遮挡, 观测过程中每个翼的回波以 4 倍自旋频率交替出现。

另外, 雷达信号也会影响着目标微动特性测量效果, 这里主要分析多普勒分辨率和多普勒不模糊范围两个因素。多普勒分辨率为观测时间的倒数, 积累时间越长, 多普勒分辨率越高, 为有效提取周期性微动特征, 通常回波积累时间要大于微动周期。多普勒不模糊范围为脉冲重复频率 (Pulse Repeat Frequency, PRF), 为保证微多普勒不模糊, 需要 PRF 大于目标微多普勒幅度的 2 倍。图 3 为进动锥体目标进动角 θ 分别为 5° 和 10° 时的微多普勒时频图, (雷达频率 10GHz, 目标进动周期 $T=2s$, 自旋频率 2Hz, 平均视界角 $\alpha=25^\circ$, $f_{PRF}=5Hz$), 可以看出, 当 $\theta=5^\circ$ 时, 微多普勒幅度基本到达多普勒不模糊范围, 当 $\theta=10^\circ$ 时, 发生了微多普勒模糊, 即多普勒谱的混叠, 难以解模糊。

2 雷达目标微动特征提取技术

雷达目标微动特征提取主要是从雷达回波中获取反映目标结构、运动等信息的特征量,基于特征量实现对目标结构、尺寸、微动等参数估计,为目标分类识别提供基础。

2.1 微动特征信号分离与获取

在雷达观测过程中,微动目标可能包括多个部件或者包含多种运动形式,此时目标的雷达回波是多个分量的叠加,需要对各分量进行分离,以分别获取各特定部件或运动形式对应的特征量。

在多个部件回波分量分离方面,其关键在于分析出目标主体与微动部件之间的回波信号特性差异,一般来说,微动部件雷达回波都存在幅度、多普勒频率调制,而主体部分雷达回波的幅度和多普勒频率可近似视为常数。基于此,采用了线调频小波(chirplet)基函数对雷达回波进行自适应分解,依据分解出的频率中心和调频斜率等参数区分主体部分和

微动部件,分解过程中采用“CLEAN”思想按照能量大小对回波依次进行分解。图 4(a)为锥体目标进动状态下暗室测量回波的微多普勒时频图,可以看出,回波数据存在多个信号分量,在时频面上分布区域较大,并且在零频附近较强,这是由于转台、控制目标运动的电机和支架等设备不稳定造成的,此时,进动锥体目标与转台支架等设备形成了一个非刚体目标。对回波信号采用 chirplet 基进行自适应分解,分解次数 $N=100$,通过设定频率中心和调频斜率等参数门限,对分解所得到的基进行重新组合,分别得到微动部分回波和背景回波,其时频分布分别如图 4(b)和图 4(c)所示,从信号分离效果看,达到了提取微动信号分量并去除背景干扰的目的。从实验结果看,当微动部件回波强度远弱于主体回波时,信号分离的效果不够理想,后续需进一步研究敏感于微多普勒特性的信号分离和提取方法。

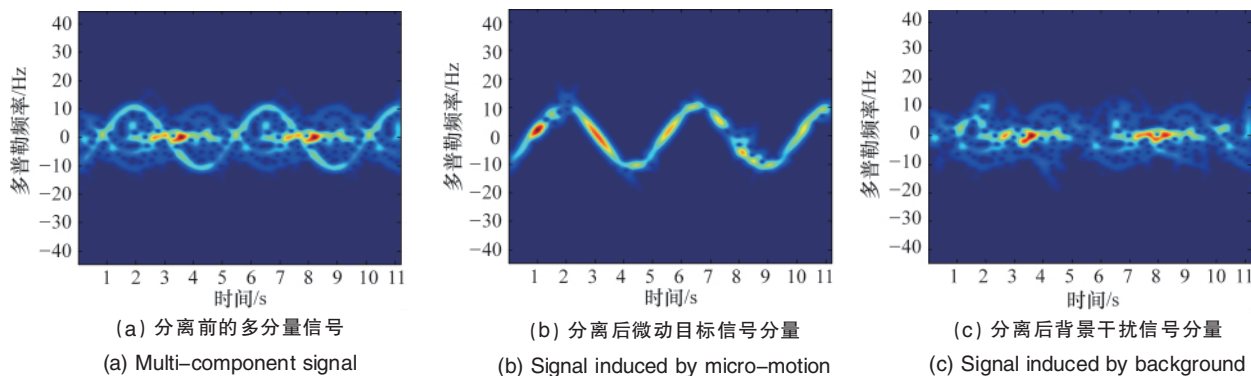


图 4 锥体目标进动状态下雷达回波信号分解的时频图
Fig. 4 Radar signal decomposition of cone with precession

在多种运动形式分离方面,重点研究了目标平动与微动分离问题。一般而言,目标平动相对微动周期而言是缓变的,可用多项式近似,提出了基于瞬时频率多项式模型的目标平动估计方法,该方法基于时频分布图进行估计,利用了目标平动一致性,不需要目标微动规律等先验信息,通过在不同微

动周期期间内平动多普勒谱的变化历程估计,实现微动与平动多普勒谱的分离,避免了复杂的多分量信号瞬时频率估计^[12]。图 5 为进动锥体的雷达回波多普勒谱时频图和平动补偿后的结果,可以看出,剔除平动后的目标回波信号可直接进行微动特征提取。

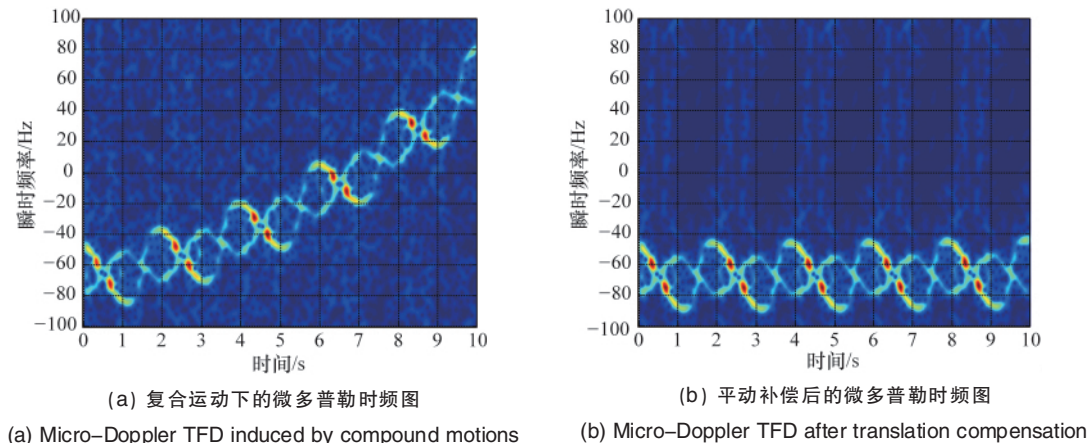


图 5 锥体目标复合运动下的微多普勒时频图
Fig. 5 Micro-Doppler TFD of cone with compound motions

2.2 微动目标 ISAR 成像

ISAR 成像是雷达获取目标结构、尺寸和运动信息的主要途径。本小节重点研究复杂微动目标的 ISAR 成像问题,其特点是在相干处理时间内存在复杂姿态变化,如弹头进动、飞机机动和舰船摆动时都存在俯仰、横滚和偏航方向上的转动,将引起目标多普勒频率和成像平面的变化^[13-15]。

当目标非匀速转动时,各散射点多普勒具有时变性,难以采用傅里叶变换重构目标像。针对此问题,提出了基于匹配傅里叶变换 (Matched Fourier Transform, MFT) 成像方法^[14],对每个距离单元进行一次 MFT 实现横向压缩以获得 ISAR 像,整个成像过程中只需进行一次参数估计,大幅降低了计算量,且该方法适用于任意阶非匀速旋转运动目标。

另外,目标相对雷达转角较大时,目标散射点会出现跨距离单元走动,与时间不满足线性关系,此时首先进行校正,

将现有 Keystone 变换 (Keystone Transform, KT) 推广为多项式形式,提出了广义 KT 算法来校正非匀速旋转引起的越距离单元走动问题,并利用 MFT 实现了广义 KT 运算^[15-16]。

图 6 是利用不同方法对目标进行 ISAR 成像的结果,通过对雷达回波多普勒频率分析可知目标存在匀加速旋转,与图 6(a) 中直接利用距离-多普勒成像的结果相比,图 6(b) 基于 MFT 成像结果的目标顶部和底部聚焦效果增强。图 6(c) 是采用 Keystone 变换校正后再 MFT 横向压缩的成像结果,可以看出,只有底部边缘部分成像效果有改善,说明目标线性距离走动较小。图 6(d) 是采用广义 Keystone 变换校正越距离单元走动后再进行距离-多普勒成像结果,对比看出 ISAR 像质量明显提高,并且此 ISAR 像的对比度最大,图像熵最小。从图像直观对比和定量评价两方面表明,采用 Keystone 变换校正能有效提高目标 ISAR 成像质量。

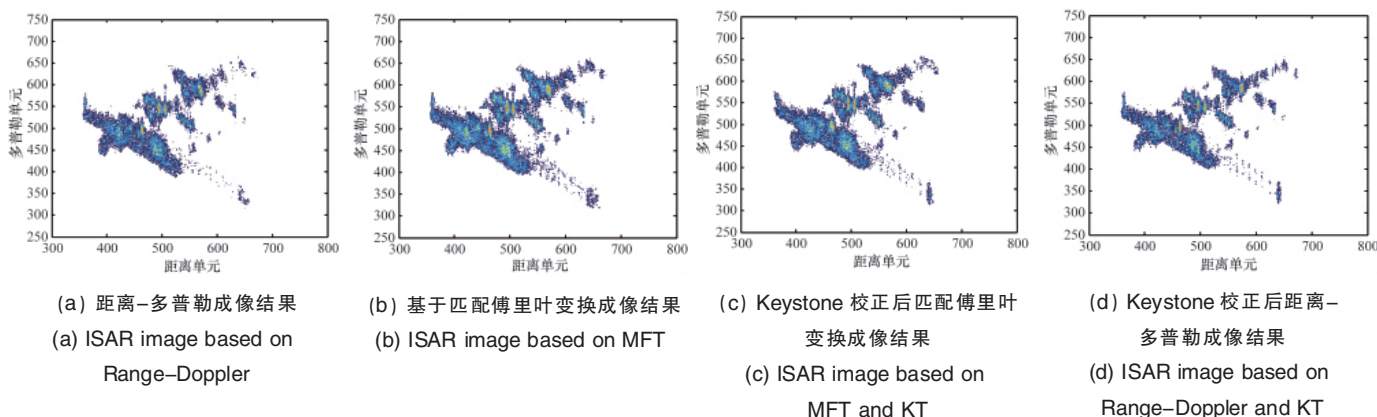


图 6 目标的 ISAR 成像结果
Fig. 6 ISAR images of target by different methods

2.3 雷达目标微动参数估计

微动参数是描述微动特性的主要途径,对目标属性刻画及识别具有重要意义。微动参数估计的主要途径有基于频谱、RCS、时频图、高分辨像及基于信号参数化估计方法等。微动的周期性使得雷达回波具有周期平稳性,此类统计特性呈周期或多周期平稳变化的信号称为循环平稳或周期平稳信号,通过非线性变换可以提取出信号中隐含的周期,并且具有良好的抗干扰和抗噪性能。

基于微动目标回波的周期平稳特性,推导出了微动目标雷达回波循环谱密度 (Cyclo-stationary spectrum density, CSSD)^[17],见式(4),据此提出了基于循环谱密度统计量的微动周期估计方法。

$$S(f, \alpha) = \sum_m \sum_n J_m(A_0) J_n(A_0) \delta \left[f - \frac{1}{2} (m+n) f_c \right] \delta [\alpha - (m-n) f_c] \quad (4)$$

其中, $J_n(\cdot)$ 为第一类 Bessel 函数, f 为频率, α 为循环频率, A_0 为微动幅度, $f_c = \omega_0 / 2\pi$ 为微动频率, $m, n \in \mathbf{Z}$ 。由图 7(a) 可以看出,循环谱密度为 (f, α) 参数平面上的一系列峰值,取循环谱密度沿循环频率轴的切片来估计微动参数,如图 7(b),循环

频率峰值位于 $\alpha = 2nf_c$, 峰值间隔为 2 倍微动频率,通过峰值检测可估计出微动频率。

对于正弦调频的多分量信号,目前的时频分布不能达到理想的时频聚集性,高阶时频分布通过多项式核系数的参数设计可一定程度上逼近其瞬时频率,但仍存在偏差。针对该问题,通过分析高阶时频分布对正弦调频信号瞬时频率估计的偏差,推导了线性偏差系数公式模型^[12],该偏差系数由高阶时频分布的窗宽、多项式核系数、微动频率共同决定,通过偏差校正可提高微多普勒幅度的估计精度。由目标各散射中心的微多普勒分量可联合估计目标的微动幅度如振幅、进动角等。图 8(a) 是对一正弦调制微多普勒信号在不同信噪比下利用高阶时频分布图进行微多普勒幅度估计及校正的实验结果,可以看出,信噪比高时,估计偏差主要受时频分布影响,偏差校正的效果明显;当信噪比低时,估计偏差主要来源于噪声,此时偏差校正的效果不显著。图 8(b) 为利用进动锥体目标雷达回波通过逆 Radon 变换估计进动角的结果,对多组测量数据,校正前的进动角估计平均偏差为 4.43%,校正后的进动角估计平均偏差减小到 1.94%,可见偏差校正进一步提高了进动角的估计精度。

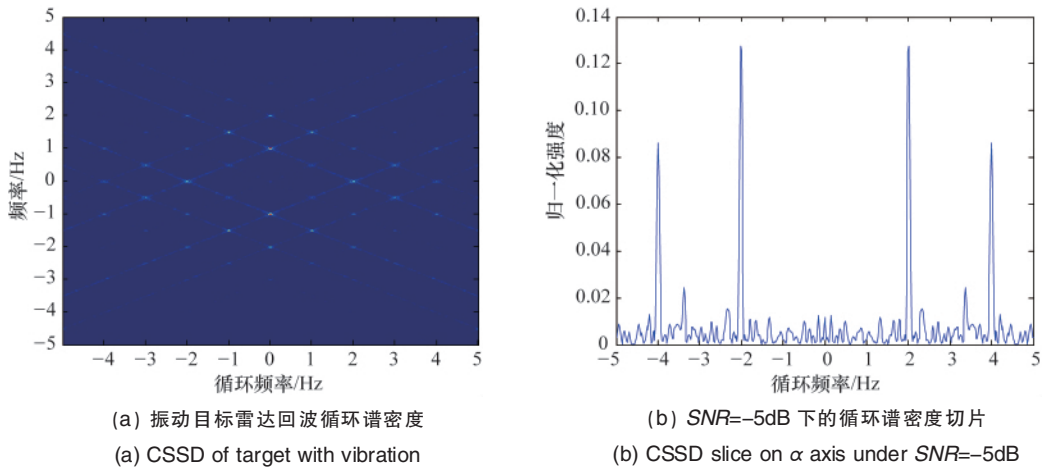


图 7 振动目标雷达回波的循环谱密度及其沿 α 轴切片
Fig. 7 CSSD of target with vibration and its slice on α axis

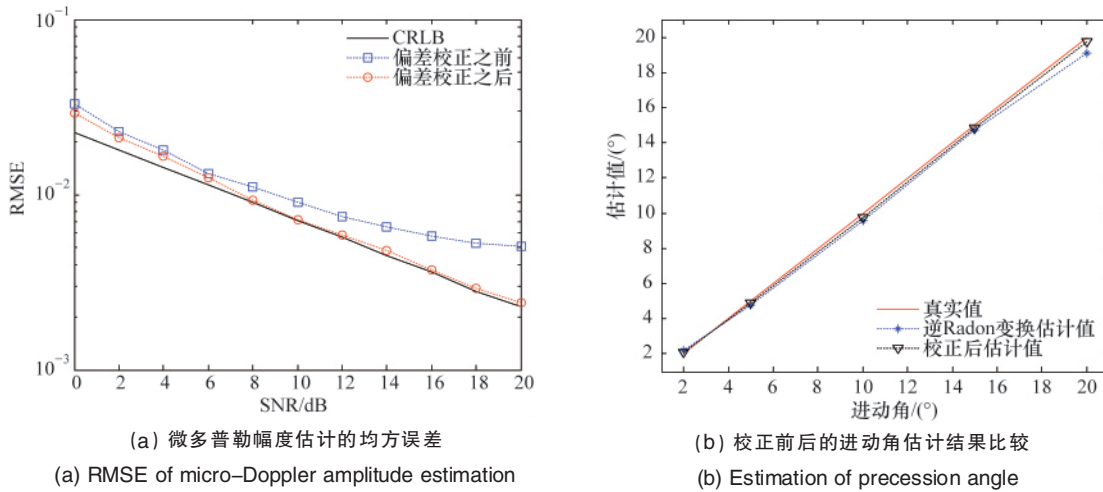


图 8 时频分布偏差校正对进动锥体目标参数估计的影响
Fig. 8 Revision of TFD and its influence on parameters estimation of target with precession

3 微动特性测量与雷达波形设计

雷达对目标微动特性的测量主要通过精密测速、测距或 RCS 调制等途径实现,如何使雷达保持常规功能的基础上具备微动测量能力是目前雷达界关心的一个热点问题。微动和微多普勒之间的理论对应关系是显而易见的,要实现对微动特性的有效测量,关键在于基于雷达系统能够开发出能够实时精确测量和分辨提取这些微多普勒信号的技术,以美国目前反导系统中最先进的海基 X 波段多功能雷达为例,除了具备 15cm 分辨率的成像能力外,还具备 1.5cm 的测距精度,1.5cm/s 的测速精度,标志着新一代先进雷达系统应该具备高分辨成像、高精度测距和测速能力。本节以一种正交频分复用(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing,OFDM)信号形式为对象,分析 OFDM 雷达信号与雷达性能之间的关系,然后以微动目标特征提取为目的对 OFDM 雷达信号参数进行设计,使 OFDM 雷达回波更容易“表现出”微动特征。

3.1 OFDM 雷达信号特点分析

OFDM 是通信领域中的一项技术,1998 年,Jankiraman 等^[18]将其引入到雷达波形设计中,信号由几个窄带的线性调频通道组成,各通道同时发射相互正交的子载频信号,每个子载频上采用频率调制或者相位编码方式获得大的时宽带宽,各通道输出信号在接收机中合成后来获得高分辨特性。OFDM 雷达波形设计灵活,单脉冲就能实现宽带合成,具备高距离分辨能力,多脉冲积累滤波后还可获得多普勒分辨能力,与雷达传统波形相比具有高脉冲压缩比、强抗干扰能力和环境适应能力等优点,其存在的缺点是发射波形的包络峰均(Peak-to-Mean Envelop Power Ratio,PMEPR)比较高,邻道干扰带来能量损失等。目前,OFDM 雷达信号处理研究主要集中在波形设计、多普勒处理、脉冲压缩等,实现目标检测、测速、成像等多种功能。

一般来说,OFDM 相参脉冲信号可表示为

$$s(t) = \exp[j2\pi f_0 t] \sum_{m=0}^{M-1} u(t-mT_r) \quad (5)$$

其中, f_0 为发射中心载频, M 为脉冲个数, T_r 为脉冲重复周期, $u(t)$ 为复包络^[19]:

$$u(t) = \sum_{n=0}^{N-1} w_n G\left(\frac{t-T_p/2}{T_p}\right) \exp(j2\pi n \Delta f t) \quad (6)$$

其中, N 为子载频个数, w_n 为第 n 个子载频的频率加权系数, T_p 是脉冲宽度, Δf 是相邻子载频间的频率间隔, $G(\cdot)$ 为单位矩形窗函数。由于各子载频间要保持相互正交, 故有 $\Delta f = 1/T_p$ 。OFDM 雷达信号基本参数包括: 子载频个数 N 、中心载频 f_0 、子载频间隔 Δf 、子载频加权系数 w_n 、脉冲重复周期 T_r 和脉冲宽度 T_p , 这些参数决定了雷达基本性能, 约束关系见图 9 所示。

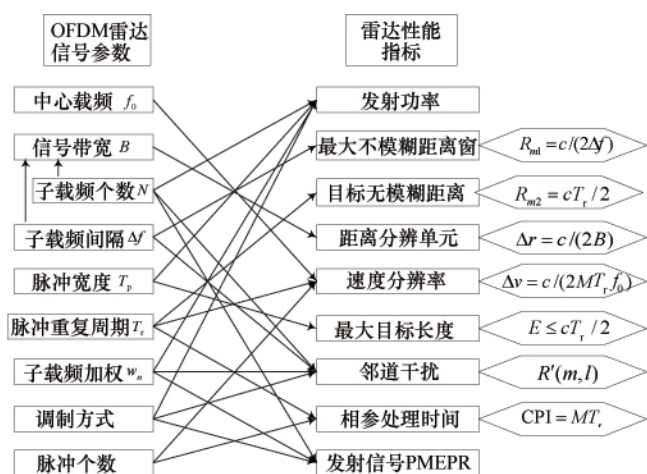


图 9 OFDM 波形参数与雷达性能间的约束关系

Fig. 9 Relationship between parameters of OFDM signal and radar performance

3.2 面向微动特征获取的 OFDM 信号参数设计

雷达信号参数设计主要解决两个问题: 一是保持雷达的基本性能; 二是在此基础上通过参数的调整, 满足特定的任务需求或技术指标, 在本文主要是能够更容易获取微动特征或者获得更显性的微动特征。微动调制效应是微动特征提取的基础, 需要揭示微动调制特征与 OFDM 信号参数、微动目标参数之间的内在联系, 然后有针对性地进行 OFDM 信号参数设计。

3.2.1 微动调制特征与 OFDM 信号、微动目标参数的关系

根据微动调制效应分析可知, 微动调制特征主要有宽带调制特征和微多普勒调制特征, 它们跟 OFDM 信号参数、微动目标参数之间有紧密联系, 对于雷达测量而言, 需要考虑微动目标的主要参数有微动径向幅度 B_i 、角频率 ω_i 、径向长度 L 、初相 φ_i (暂不考虑结构、材料等引起的 RCS 调制特性)。

(1) 高分辨距离像调制特征与 B_i 的关系。HRRP 调制特征与信号带宽 B 、微动径向幅度 B_i 关系密切。径向幅度 B_i 小于距离分辨单元 Δr 时, HRRP 序列峰值位置不随时间改变, 此时的微动调制特征主要体现在 HRRP 序列的相位上。

径向幅度 B_i 大于距离分辨单元 Δr 时, HRRP 序列峰值位置呈现出变化, 反映出微动的规律。径向幅度 B_i 所占距离分辨单元 Δr 的个数越多, HRRP 峰值位置序列的变化越清晰, 微动规律刻画得越精细。

(2) 微多普勒调制特征与 f_0 、 B_i 、 ω_i 、 T_r 、 M 的关系。微多普勒调制特征主要考虑微多普勒时频分辨率与时间频率范围两个因素。时频分辨率与时频分析工具有关, 在此不详细讨论, 时间频率范围主要与雷达采样频率、脉冲积累时间、中心频率等相关, 须满足以下 3 个条件:

① $\max\{f_{\text{ad}}\} \leq \frac{1}{2T_r}$, 即微动产生的时变微多普勒幅度不超过时频平面的频率范围。

② $T_r \geq 2\pi/\omega_i$, 即脉冲积累时间不小于一个微动周期, 以保证观测完整的微动过程。

③ $1/T_r \geq \omega_i/\pi$, 即微多普勒的采样频率 $f_s = 1/T_r$ 满足采样定理。

以上只是对微动调制特征的基本分析, 实际上, 该过程相当复杂, 如雷达信号相参性、目标散射特性等多种因素都需要纳入综合考虑。

3.2.2 面向微动特征获取的 OFDM 信号参数设计

雷达信号参数设计是一个复杂的过程, 参数的选择会直接影响到雷达系统性能, 甚至有时参数选择导致雷达性能指标产生矛盾, 因此需要在满足基本性能基础上进行折中考虑。本小节对 OFDM 雷达信号参数进行设计, 在保证雷达性能基础上, 使 OFDM 回波的微动调制特征更加“明显”, 有利于微动目标特征提取。可采取以下步骤^[20]。

(1) 中心载频 f_0 。 f_0 越大, 微多普勒越大, 在后续处理时产生的相对误差小, 因此, 在满足要求的中心载频取值区间内, 较大的 f_0 值利于微多普勒特征的精确提取。

(2) 信号总带宽 B 。 B 决定了距离分辨率 Δr , 距离分辨率与微动径向幅度 B_i 的相对大小决定着宽带 HRRP 调制的表现形式。从微动信号处理角度考虑, 以下两种情形比较有利于微动特征的提取, 一为 B_i 是 Δr 的十几或者几十倍, 此时 HRRP 序列的峰值位置呈现出明显的变化规律, 有利于进行特征提取; 二是 Δr 大于 B_i , 此时微动不会引起 HRRP 序列的峰值位置变化, 通过分析距离单元内的信号相位可以获取微动特征。需要说明的是, 对于这两种情形中, 需要采用不同的技术途径来实现微动目标二维雷达成像。

(3) 脉冲重复周期 T_r 和相参处理时间 t_{CPI} 。 T_r 和 t_{CPI} 主要跟微多普勒调制有关, 直接影响着微多普勒特征提取方法的有效性。

(4) 其他信号参数, 如子载频间隔 Δf 、脉冲宽度 T_p 、调制方式、子载频加权系数 w_n 等, 决定着雷达作用距离、邻道干扰等性能, 需要结合雷达性能指标要求和工作场景综合考虑。

图 10 给出了针对微动目标特征提取的 OFDM 雷达信号参数设计流程。

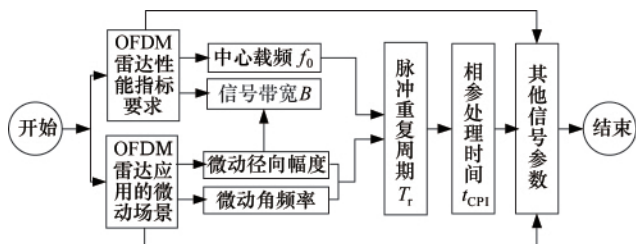


图 10 面向微动特征获取的 OFDM 信号参数设计流程

Fig. 10 Sketch of OFDM waveform designing oriented to micro-motion feature extraction

4 结论及展望

微动特性研究目前在国内外还处于起步阶段,本文重点介绍了在微动调制效应、微动特征提取及微动测量方面取得的研究成果,包括如下几个方面。

(1) 在微动目标雷达回波调制分析方面,揭示出目标微动对雷达回波具有多分量非线性调频调幅的调制规律,建立了微动对线性调频和阶梯变频两种典型宽带信号的调制模型,并分析了微动目标和雷达信号对调制效应的影响。微动调制规律的揭示是微动特性分析的基础性成果,对微动特征提取、微动测量及波形设计等研究提供支撑。

(2) 在雷达目标微动特征提取方面,基于参数化模型建立了微动特征信号分离与获取的技术途径,针对复杂微动目标实现了较稳健的 ISAR 成像,并提出微动周期、微动幅度等参数的估计方法。这些结构、尺寸、运动特征信息较全面地描述了目标属性,为后续目标探测与识别提供依据。

(3) 在微动测量及波形设计方面,以 OFDM 雷达信号为对象,分析了波形参数与雷达性能之间的关系,揭示出微动调制特征与 OFDM 信号、微动目标之间的内在联系,并给出了面向微动特征获取的 OFDM 雷达波形参数设计方案。这些对于推动微动特性研究成果应用于不同领域具有重要意义。

总体看,上述成果对深入认识雷达目标微动特性是有益的,后续工作重点将集中在微动测量雷达设计、微动目标识别等方面,并推动微动特性向应用研究方向发展。

参考文献 (References)

- [1] 庄钊文, 刘永祥, 黎湘. 目标微动特性研究进展[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 520-527.
Zhuang Zhaowen, Liu Yongxiang, Li Xiang. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(3): 520-527.
- [2] Chen V C. The micro-Doppler effect in radar[M]. Boston: Artech House, 2011.
- [3] Chen V C, Li F, Ho 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.
- [4] Chen V C, Ling H. Time-frequency transforms for radar imaging and signal analysis[M]. Boston: Artech House, 2002.
- [5] Thayaparan T, Abrol S, Riseborough E. Analysis of radar micro-Doppler signatures from experimental helicopter and human data [J]. *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, 2007, 1(4): 289-299.

- [6] Stankovic L, Djurovic I, Thayaparan T. Separation of target rigid body and micro-Doppler effects in ISAR imaging [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 42(4): 1496-1506.
- [7] 刘永祥, 黎湘, 庄钊文. 空间目标进动特性及在雷达识别中的应用[J]. 自然科学进展, 2004, 14(11): 1329-1332.
Liu Yongxiang, Li Xiang, Zhuang Zhaowen. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(11): 1329-1332.
- [8] Camp W W, Mayhan J T, O'Donnell R M. Wideband radar for ballistic missile defense and range-Doppler imaging of satellites [J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 2000, 12(2): 267-280.
- [9] Liu Y X, Li X, Zhuang Z W. Estimation of micro-motion parameters based on micro-Doppler [J]. *IET Signal Process*, 2010, 4(3): 213-217.
- [10] Liu Y X, Li X, Zhuang Z W. Instantaneous frequency estimation of multi-component signal based on complex-argument distribution[C]// IEEE International Conference on Signal Processing, Beijing, China, Oct 24-28, 2010.
- [11] 陈行勇. 微动目标雷达特征提取技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
Chen Hangyong. Research on radar signature extraction from target with micro-motions [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [12] 李康乐. 雷达目标微动特征提取与估计技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
Li Kangle. Research on feature extraction and parameters estimation for radar targets with micro-motions [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [13] Chen H Y, Liu Y X, Li X, et al. Mathematics of synthesizing range profile[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(5): 1950-1955.
- [14] 胡杰民. 复杂运动目标高分辨雷达成像技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
Hu Jiemin. Research on high resolution radar imaging technology for target with complex motion [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [15] 曹敏. 空间目标高分辨雷达成像技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
Cao Min. Research on high resolution radar imaging technology for space targets [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [16] Huo K, Liu Y X, Li X. A novel imaging method for fast rotating targets based on the segmental pseudo Keystone transform[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 39(4): 1464-1472.
- [17] Li K L, Liu Y X, Li X, et al. Estimation of micro-motion parameters based on cyclostationary analysis [J]. *IET Signal Processing*, 2010, 4(3): 218-223.
- [18] Jankiraman M, Wessels B J, van Genderen P. Design of a multifrequency FMCW radar [C]//The 28th European Microwave Conference, Amsterdam, Holland, Oct 5-9, 1998.
- [19] Lellouch G, Tran P, Pribic R. OFDM waveforms for frequency agility and opportunities for doppler processing in radar [C]// IEEE Radar Conference, Rome, Italy, May 26-28, 2008.
- [20] 霍凯. 基于 OFDM 新体制雷达信号的微动目标特征提取研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
Huo Kai. Research on feature extraction for target with micro-motion based on new OFDM radar signals[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.

(责任编辑 代丽)