

目标微动特性研究进展

庄钊文,刘永祥,黎湘

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要: 目标特征控制技术的发展增加了目标探测与识别任务的技术难度. 随着先进传感器的测量能力和信号处理水平的提高,对目标微动特性的测量和分析正在成为当前目标探测与识别领域的新兴研究方向. 本文在目标微动的概念、目标微动对电磁波的调制效应、目标微动特征处理与分析技术进展、目标微动特性应用领域等方面做了比较深入的介绍和分析,最后对目标微动特性研究的发展趋势和技术难点进行了预测.

关键词: 微动; 微多普勒; 雷达目标; 时频信号处理

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 03-0520-06

The Achievements of Target Characteristic with Micro-Motion

ZHUANG Zhao-wen, LIU Yong-xiang, LI Xiang

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

Abstract: Technical progresses in controlling of target characteristic play the challenge to the tasks of target measurement and recognition. With the development of advanced sensors and time-frequency signal processing, some advancement in target micro-motion measurement and feature analysis gain more and more attentions in the field of target measurement and recognition. In this paper, some topics related to target characteristic with micro-motion are introduced and analyzed, such as the basic concept of micro-motion dynamics, the mechanism of modulation on electromagnetic wave induced by target with micro-motion, progresses in feature analysis of target with micro-motion, and the applied fields based on micro-motion dynamics. Some directions of further work in target characteristic with micro-motion and their technical difficulties are predicted at last.

Key words: micro-motion; micro-Doppler; radar target; time-frequency signal processing

1 引言

近年来,目标特征控制技术,如隐身、伪装等方面获得了快速发展,对目标探测与识别提出了更高的技术要求. 随着先进传感器的测量能力和时频信号处理水平的提高,对目标细节的描述和刻画,尤其是目标运动状态的精细刻画已成为一个新的技术热点. 近一个时期,目标微动特性在目标探测与识别领域的重要价值开始引起国内外学术界和工程界的关注. 本文将介绍在目标微动特性测量和特征分析方面取得的主要技术进展,分析其应用前景和发展趋势.

2 目标微动及其雷达特征概述

目标微动目前还没有一个严格的定义,一般将目标或目标部件除质心平动以外的振动、转动和加速运动等微小运动统称为微动 (Micro-motion, Micro-dynamics)^[1]. 微动在自然界普遍存在,如人的行走,桥梁的振动,天线

的转动,电动机的转动,直升机旋翼的转动,中段弹头的进动等^[2]. 在雷达观测条件下,微动的范围描述可以进一步推广,将目标或目标部件在雷达视线方向上的小幅(相对于目标与雷达的径向距离)非匀速运动或运动分量统称为微动. 对于点目标,微动表现为运动的非匀速性;对于扩展刚体目标,微动表现为目标各部分的不同运动状态;对于扩展非刚体目标/分布式目标,微动表现为多目标或目标各部件之间的不同运动形式. 可以说,目标微动表征了目标运动状态的细节.

目标微动状态下对电磁波的调制效应主要包括多普勒特征、回波功率调制特征以及成像特征等. 从多普勒效应来看,若点目标径向存在非匀速运动,则多普勒频移是时变的,表现在频谱上就是存在频谱旁瓣或展宽;对于非刚体运动目标,目标各部件的不同运动状态也会使其回波频谱存在频谱旁瓣或展宽,这种现象称为微多普勒效应 (Micro-Doppler Effect)^[2],也称为时频像 (Time-frequency Profile),描述微动引起的瞬时多普勒效

收稿日期:2006-06-20;修回日期:2006-11-03

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60402032)

应. 微多普勒是从频率上描述了目标微动的雷达特征, 反映了多普勒频移的瞬时特性, 表征了目标微动的瞬时径向速度. 在微多普勒的基础上, 相继提出了微多普勒率和多普勒谱等概念, 其中微多普勒率反映了多普勒变化率的瞬时特性, 表征目标微动瞬时径向加速度; 多普勒谱则体现了多普勒在时间和空间的积累, 表征一定观测时间内目标各部件微动径向速度的分布. 目标微动的雷达回波功率调制特征, 主要体现为 RCS 时间序列, 表征目标的姿态变化引起的 RCS 起伏. 目标微动的成像特征, 主要指目标雷达成像以及利用雷达像能够获得的结构、尺寸和运动特征, 具体包括: 结构特征—转动或振动中心, 称为微动结构; 尺寸特征—转动半径或振动幅度, 称为微动尺寸; 运动特征—转动频率或振动频率, 称为微动频率等.

根据目标微动对电磁波的调制效应分析可知, 利用先进的时频信号处理手段, 可以从微动目标的雷达回波中提取和估计目标微动信息. 一般的, 微动点目标的电磁回波包含了点目标的速度信息. 对于扩展刚体目标, RCS 调制序列反映了目标姿态的变化, 而目标姿态变化是由微动规律决定的, 由此可以根据微动目标的 RCS 时间序列反演微动规律. 在微动目标的成像方面, 可以综合利用多个时刻微动目标的成像结果估计目标的微动结构、微动尺寸和微动频率.

3 目标微动特征的分析与处理技术

微动本质上是一种非匀速运动或非刚体运动, 目标微动特征信号具有非线性和非平稳的特点, 因此目标微动特征分析和处理的核心问题是时变信号处理, 主要包括以下技术和方法:

时频分析技术, 时频分析技术是目标微动特征分析和处理中使用最广泛的技术, 其着眼于真实信号组成成份的时变谱特征, 通过构造时间和频率的密度函数, 将信号以二维的时间-频率密度函数形式表示出来, 以揭示信号中所包含的频率分量及其演化特性. 已用于微多普勒信号分析和处理的时频分析技术包括 Wigner-Ville 分布, Gabor 变换, 小波分析技术和自适应时频分析技术等.

独立成分分析技术, 时域和空域联合独立成分分析技术将目标微动特征信号分解成独立的基函数的线性组合, 每个基函数对应一种微动特性, 组合系数表征了空时微多普勒特征. 例如经验模式分解技术 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 就是将目标微动特征信号频率调制模式分解成不同的调制模式的叠加.

匹配傅立叶变换技术, 若已知微多普勒信号的形式, 可根据先验信息设计对应的指数基函数代替傅立叶变换基函数, 将微多普勒信号进行分解, 这种技术可

称为匹配傅立叶变换技术. 例如对于正弦振动激励的微多普勒信号, 可用正弦调制指数基函数分析.

参数搜索技术, 若目标微动可用多项式运动规律表示, 如匀加速运动或多阶运动等, 则可用运动参数搜索技术, 本质上仍然是一种基函数展开技术, 将特征信号表示成多项式相位信号之和, 使用遗传算法等搜索技术, 通过最优匹配理论搜索运动参数.

4 目标微动特征的研究现状及其应用领域

多普勒现象敏感于工作频率, 微动和微多普勒的概念首先是从相干激光雷达系统中引出, 随着现代信号处理技术特别是时频分析技术发展, 使得微多普勒现象在雷达中也可实际观测到, 自 2000 年起, 陆续出现了关于雷达目标微动特征和微多普勒信号分析抽的报道.

4.1 空间目标探测与识别中的微动特征

典型的弹道导弹飞行过程如图 1 所示, 弹道导弹从发射到攻击一般经历弹箭分离、诱饵释放、惯性飞行以及再入等特征事件, 由于弹箭分离以及诱饵释放时对弹头的横向干扰, 弹头在中段和再入段飞行过程中存在微动^[3].

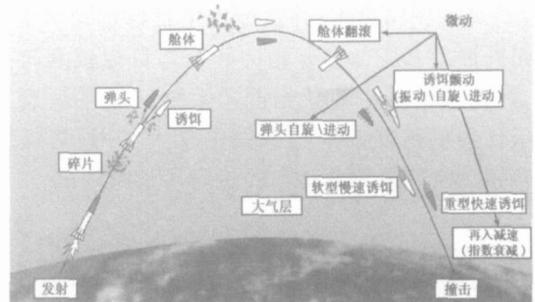


图 1 典型的弹道导弹飞行过程

从美国导弹防御系统雷达技术及目标识别的发展进程看 (如图 2), 20 世纪 80 年代至今基于运动特征的分辨算法是研究重点, 超宽带雷达的微动测量和基于带外推技术的微动特征提取尤其是值得关注的焦点^[4].

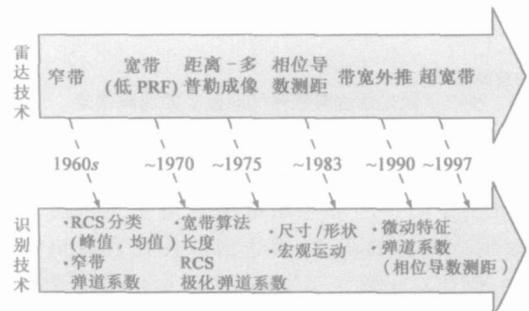


图 2 美国导弹防御系统雷达技术和目标识别技术的进展^[4]

文献披露,洛克希德·马丁相干技术在激光雷达领域处于世界领先地位,研究与开发相干探测成像传感器,实现微多普勒成像(Micro-Doppler Imaging),并利用成像序列估计目标的运动状态^[5]。马克资源公司自20世纪70年代开始研究使用雷达测量分辨弹头和诱饵,称为雷达目标运动分辨(Target Motion Resolution, TMR),也称为相位导数测距(Phase Derived Range, PDR)或多普勒时间密度(Doppler Time Intensity, DTI)处理,可以得到目标的轨道特征、速度与加速度特征(再入时的减速特性)以及微动特征(如弹头的自旋、进动、章动以及抖动等),微动特征是中段目标特性的重要方面,可望为目标识别难题提供新的解决手段^[6]。美国导弹防御局2004年资助了一项“S波段雷达微多普勒特征用于弹道导弹识别”的创新研究,使得宙斯盾防御系统的AN/SPY-1相控阵S波段雷达能利用微多普勒特征识别威胁目标^[7]。

1990年3月29日和10月20日美国进行了两次Firefly试验,验证利用微动特性进行弹道导弹中段真假目标识别的可行性。试验过程中,诱饵装在存储罐中,自旋弹出后膨胀成2米的锥体气球,可控锥体气球模拟了几种不同的进动过程,如图3,利用Firepond激光雷达对整个过程进行了观测,激光成像雷达成功的观测到700km以外的诱饵过程,并估计出了目标运动参数。^[8]波音公司开展了基于微多普勒的非合作目标识别与分类研究,开发的微多普勒激光雷达系统已经在新概念技术演示计划的精确瞄准与识别中投入实用,其机载样机在毛伊岛空间监测基地已经进行了试验测试^[9]。

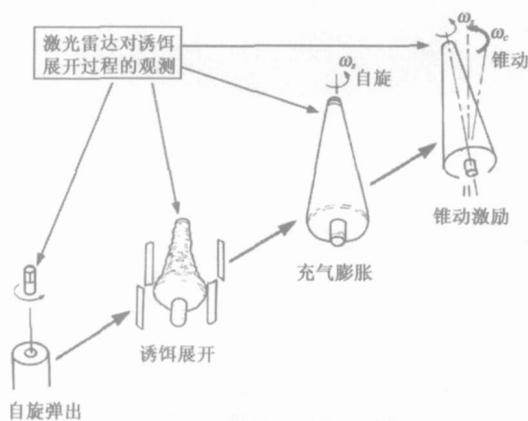


图3 激光雷达对锥体气球微动的观测试验

3.2 空中目标探测与识别中的微动特征

当雷达观测直升机、螺旋桨飞机、喷气式飞机等空中目标时,在一定的姿态角范围内由于飞机旋转运动部件对雷达回波的调制,雷达回波往往含有周期性调制成分。例如对于喷气引擎飞机,雷达信号的调制现象来自于喷气发动机压缩叶片的旋转,表现出活动部件的周期调制谱线对应着引擎的旋转频率。

美国陆军研究实验室使用92GHz连续毫米波雷达对Mi-24“雌鹿”D型直升机进行了微多普勒测量,分析了直升机目标的多普勒频谱构成,包括喷气发动机的调制效应(Jet Engine Modulation, JEM)、主旋翼和尾旋翼的多普勒谱等,并测量了不同视角的微多普勒特征^[10]。Marple使用X波段雷达测量了荷兰BO-105双引擎直升机,并利用时频分析技术从回波信号中提取了主旋翼和尾旋翼的微多普勒成分,在信噪比相差70dB的动态信号范围内有效提取出微多普勒成分,这为直升机的探测和识别提供了新的有效的途径^[11]。

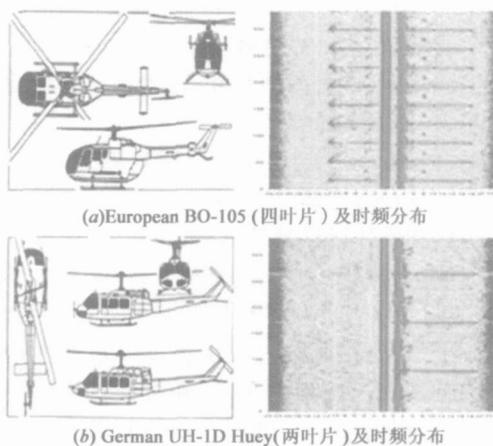


图4 不同类型直升机的时频分析比较

波音公司开发了多功能光学系统试验台,包括微多普勒相干探测激光雷达、中波和长波红外摄像机、可视CCD摄像仪等,测试表明相干探测激光雷达可以通过测量飞机发动机的振动特征来识别目标。在微多普勒特征提取方面,其分辨率可以达到0.3Hz,对X波段雷达其微径向速度分辨力能够达到5mm/s量级,这对稀薄大气层内各类飞行器的检测、分辨、跟踪与识别是极为有用的特征^[12]。

3.3 地面目标探测与识别中的微动特征

微动特性提供了一种新的研究目标特性的手段,例如汽车引擎产生的振动可以从汽车表面探测到,根据表面振动形成的微多普勒特征可以分辨坦克与汽车,甚至可根据微多普勒特征估计引擎转速来进一步确认发动机类型。“辐射亡命徒”先期技术演示计划(Radiant Outlaw ATD)已经演示了综合利用形状和振动微多普勒处理可靠地识别舰船目标,地面目标外场测量表明微多普勒提取技术对于地面车辆目标识别也具有非常重要的意义^[13]。美国的联合监视目标攻击雷达系统(Joint STARS)利用了SAR和GMTI雷达双模式工作,即利用SAR成像发现静止目标,利用GMTI发现敌方的运动目标,再利用精细的雷达目标微动特征分辨,对地面坦克、装甲车、移动导弹发射架、人员和动物等进行探测与识别^[14]。

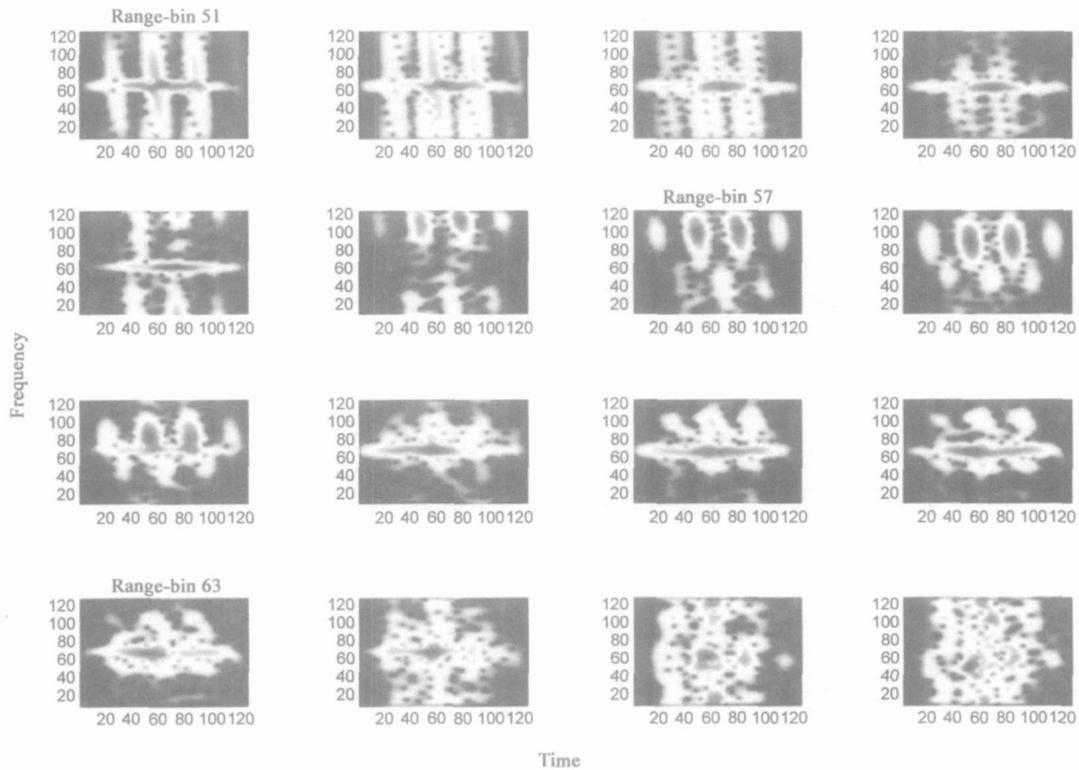


图 5 直升机飞行过程中的雷达成像结果

得克萨斯大学奥斯汀分校设计和制造了微多普勒数据采集雷达,研究微多普勒特征提取及目标识别.雷达工作频率从 4GHz ~ 10GHz 可调,为零差频(Homodyne) I/Q 双通道探测模式.该雷达提取了行人步法产生的微多普勒率,为分析非刚体目标的微多普勒和其它复杂目标多散射现象提供了条件^[15].在图 6 中可以看出,躯体(胸膛)多普勒频移近似为常量,手臂的微多普勒频移近似为正弦形式,并且可以估计出摆臂频率约 1.2Hz.

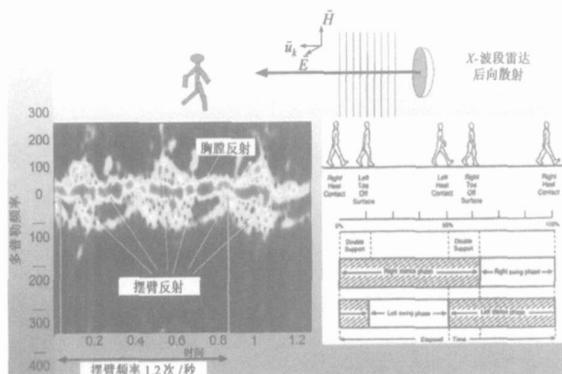


图 6 人行走的多普勒率变化

新加坡南洋理工大学使用经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)技术提取出了静止卡车发动机的微多普勒特征^[16],实验中雷达置于距目标 10 米处,工作频率为 100 ~ 900MHz,实验表明当雷达工作在

低载频时,微多普勒处于 $\pm 30\text{Hz}$ 附近,如图 7,乔治亚理工学院使用 X 波段零差频雷达,通过分析有大型车辆通过桥梁时的微多普勒特征,获取桥梁的共振频率信息,预测桥梁寿命.依据载重、货物布置和吸振装置不同,拖车的自然共振频率约为 1 ~ 5Hz^[17].

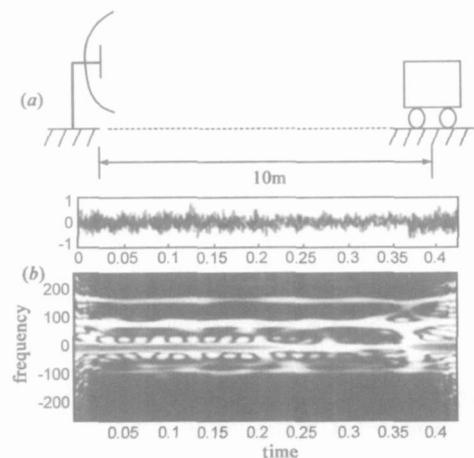


图 7 静止卡车的测量以及发动机的微多普勒特征

另外,雷达探测仪照射人体时,回波信号包含了人体运动调制的多普勒频率^[18],在 X 波段人体呼吸所产生的多普勒频率大约在 0.12 ~ 1Hz 范围内,通过检测多普勒频率就能够提取出人体的生命参数(如呼吸或心跳),该技术可用于地震、雪灾等情况下生命定位探测等.

5 雷达目标微动特性研究的发展趋势

雷达目标的微动特征通过微时间(Micro-temporal)、微距离(Micro-range)和微频率(Micro-frequency)的概念,展示了时间-空间-频率三维特征空间的变化特性^[11],在此三维特征空间中,微多普勒/多普勒谱、高分辨距离像、ISAR像/SAR像可以分别视为时间-频率像(Time-frequency Profile)、时间-距离像(Time-range Profile)和距离-多普勒像(Range-Doppler Profile),是雷达目标三维特征空间的切片。目标微动特征反映了目标的电磁散射特性、几何结构特性和运动特性,为雷达目标探测和识别提供了新的途径。雷达目标微动特征提取是运动学与雷达信号处理交叉结合的一个新兴的研究方向,涉及运动建模,时频分析,变采样滤波,雷达成像理论和技术等,随着研究的不断深入,预计将在以下方面取得有价值的研究成果:

(1) 建立完善的雷达目标微动特征体系。目前,国外对雷达目标微动特征的分析和研究还主要集中在点目标微多普勒方面,在微动对电磁波的调制效应分析方面还未见系统的阐述,并且对微多普勒分析尚未形成统一的方法。通过建立完善的雷达目标微动特征体系,从频率、功率、极化、成像等方面描述雷达目标微动特性,将会为雷达目标的探测和识别提供新的途径。

(2) 建立系统的微多普勒提取技术。微多普勒是估计目标微动参数的前提,其关键在于瞬时频率的高精度估计,需要重点突破具有高时频分辨能力的时频分布及其高效计算。另外,目前研究主要集中在基于微多普勒的单目标微动特性分析,而基于多种微多普勒分量的多目标微动特性分析尚不多见,这对于微动目标分辨,包括刚体目标的多种运动成分分辨、非刚体目标的运动组件分辨、运动目标群的分辨等问题具有重要意义,为目标的精细描述提供技术基础。

(3) 具备稳健的目标微动成像能力。高分辨雷达已成为目标特性测量的主要手段,雷达目标的微动成像主要包括刚体/非刚体目标复杂运动状态下的ISAR成像,尤其对于目标各部件具有不同的平动和转动速度的非刚体目标ISAR成像,为微动目标的结构特性描述提供基础。目标微动成像能力的技术难点是不同的散射中心运动规律和不同的散射中心强度分布,存在复杂的时间、频率和距离的耦合,如多普勒效应就是时间量与频率量之间的复杂耦合,其解决途径是时-频解耦,具体而言,对于距离像要获得零多普勒纵向像估计,对方位像要获得零微多普勒横向像估计。

(4) 初步解决目标微动识别难题。从国外的研究进展分析,微动特性被视为目标独一无二的特征,在目标识别方面有独到的优势。为解决目标微动识别问题,需

要探索目标微动特性与目标物性参数的关系,如目标质量分布特征、惯量比特征、发动机特征等,为实现可靠的目标识别提供基础。另外,需要解决目标微动探测与识别系统开发中的实用化问题,面向系统的任务和功能,基于目标微动特性分析有针对性的开展相关技术方案的设计和实现。

参考文献:

- [1] Chen V C, Li F, Ho S, Wechsler H. Micro-doppler effect in radar-phenomenon, model and simulation Study[J]. IEEE Trans on AES, 2006, 42(1): 2 - 21.
- [2] Chen V C. Micro-Doppler effect of micro-motion dynamics: a review[A]. Proceedings of SPIE on Independent Component Analyses, Wavelets, and Neural Networks[C]. Orlando, USA: SPIE Press, 2003. 240 - 249.
- [3] Nunn E C. The US army white sands missile range development of target motion resolution [A]. Proceedings of IEEE Electronics and Aerospace Systems Conventions[C]. Arlington, USA: IEEE Press, 1980. 346 - 352.
- [4] Camp W W, Mayhan J T, O'Donnell R M. Wideband radar for ballistic missile defense and range Doppler imaging of satellites [J]. Lincoln Laboratory Journal, 2000, 12(2): 267 - 280.
- [5] Hannon S M, Thomson J A. Agile multiple pulse coherent radar for range and micro-Doppler measurement [A]. Proceedings of SPIE on Laser Radar Technology and Applications [C]. Orlando, USA: SPIE Press, 1998. 259 - 269.
- [6] Rihaczek A W, Hershkowitz S J. Radar Resolution and Complex-Image Analysis [M]. Boston: Artech House, 1996. 24 - 155.
- [7] S-band radar micro-Doppler signatures for BMD discrimination [DB/OL]. <http://www.acq.osd.mil/osbp/sbir/solicitations/sbir044/mda044.htm>, 2003-10-16/2004-08-24.
- [8] Hanson F, Beagher G. Discriminating interceptor technology program laser radar[A]. Proceedings of SPIE on Laser Radar Technology and Applications [C]. Orlando, USA: SPIE Press, 1999. 372 - 380.
- [9] Swirski Y, Wolowelsky K. Detection and delineation of buildings from airborne lidar measurements [A]. Proceedings of SPIE on Applications of Digital Image Processing XXVII[C]. Orlando, USA: SPIE Press, 2004. 149 - 156.
- [10] Nalecz M, Andrianik R R, Wojtkiewicz A. Micro-Doppler analysis of signal received by FMCW radar[A]. Proceedings of International Radar Symposium [C]. Dresden, Germany: IEEE Press, 2003. 231 - 235.
- [11] Marple S L. Sharpening and bandwidth extrapolation techniques for radar micro-Doppler feature extraction [A]. Proceedings of International Conference on Radar [C]. Adelaide, Australia: IEEE Press, 2003. 166 - 170.

- [12] Alfred B G, William E K. Development of coherent laser radar at Lincoln Laboratory[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2000, 12(2):383 - 396.
- [13] Wellman R J, Silvious J L. Doppler signature measurements of a Mi-24 Hind-D Helicopter at 92 GHz[R]. Adelphi, USA: Air Research Laboratory, 1998.
- [14] Barbaross S. Doppler rate filtering for detecting moving targets with synthetic aperture radars[A]. Proceedings of the SPIE on Millimeter Wave and Synthetic Aperture Radar[C]. Orlando, USA: SPIE Press, 1989. 140 - 147.
- [15] Ling H. Exploitation of micro-Doppler and multiple scattering phenomena for radar target recognition[R]. Austin, USA: The University of Texas at Austin, 2004.
- [16] Cai C J, Liu W X, Fu J S. Empirical mode decomposition of micro-Doppler signature [A]. Proceedings of International Conference on Radar [C]. Washington, USA: IEEE Press, 2005. 895 - 899.
- [17] Greneker E F, Geisheimer J L, Asbell D. Extraction of micro-Doppler data from vehicle targets at x-band frequencies[A]. Proceedings of SPIE on Radar Sensor Technique [C]. Orlando, USA: SPIE Press, 2001. 1 - 9.
- [18] Chen K, Huang Y, and Zhang J. Microwave life detection systems for searching human subjects under earthquake rubble or behind barrier [J]. IEEE Trans on Biomedical Engineering, 2000, 27(1):1052 - 1064.

作者简介:



庄钊文 男, 1958 年出生于福建泉州, 工学博士, 国防科学技术大学教授, 博士生导师, 中国电子学会会士. 主要从事智能信号处理、自动目标识别、卫星导航定位等领域的研究工作.

E-mail: zhaowenzhuang @nudt. edu. cn



刘永祥 男, 1976 年出生于河北唐山, 工学博士, 国防科学技术大学副教授, 中国电子学会高级会员. 主要从事信息融合、雷达目标识别等领域的研究工作.

E-mail: lyx. bible @sina. com. cn



黎湘 男, 1967 年出生于湖南长沙, 工学博士, 国防科学技术大学教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员. 主要从事精确制导、信息融合、目标识别等领域的研究工作.

E-mail: xiangli @nudt. edu. cn