

基于 AM-LFM 分解的微动信号提取

贺思三^① 周剑雄^① 赵会宁^② 付强^①

^①(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

^②(空军工程大学导弹学院 三原 713800)

摘要: 该文针对微多普勒信号与目标主体回波信号分离的问题,分析了包含微动结构的雷达回波模型,指出目标主体信号分量多普勒频率是固定的,而微多普勒信号的多普勒频率是时变的,且可用分段的线性调频信号拟合。在此基础上,提出了一种基于调幅-线性调频(AM-LFM)分解的微动信号分离算法,该算法根据调频率来判定各调幅-线性调频分量的对应结构,实现微多普勒信号提取。仿真及实测数据处理结果验证了算法的有效性。

关键词: 信号分离; 微多普勒; 目标主体; Chirplet; 调幅-线性调频

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)03-0554-05

DOI: 10.3724/SP.J1146.2009.00444

Micro-Doppler Signal Extraction Based on AM-LFM Decomposition

He Si-san^① Zhou Jian-xiong^① Zhao Hui-ning^② Fu Qiang^①

^①(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

^②(The Missile Institute of the Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

Abstract: The issue of micro-Doppler signal separation from collected data of targets with micro-motion structures is addressed. The signal mode for target with micro-motion structures is analyzed and the results show that the Doppler frequency of main body is constant and the micro-Doppler frequency is time varying, which can be fitted by a series of piecewise linear frequency modulation signal. A method, which decomposes radar signal to AM-LFM (amplitude modulation-linear frequency modulation) components and determines each component's corresponding structure by frequency modulation rate, is proposed to extract micro-motion echoes from the main body echoes. Simulated and experimental results verify the correctness of proposed method.

Key words: Signal separation; Micro-Doppler; Main body; Chirplet; AM-LFM

1 引言

目标或目标部件除质心平动以外的振动、转动等微小运动统称为微动,如直升飞机的螺旋桨,舰船上的机械扫描雷达等等。微动信息反映了目标的几何结构和运动特征,并对雷达信号进行微多普勒调制,为雷达目标特征提取和目标识别提供了新的途径^[1]。当目标包含微动结构时,微动结构回波和目标主体回波信号叠加在一起,增加了微动特征分析的难度^[2,3];同时,在2维成像中,由于微多普勒的变化特性与目标主体回波的多普勒变化特性不一致,将对2维成像结果造成污染^[4-7]。因此,有必要从回波中提取出微多普勒信号,一方面有利于进一步的微动参数估计,另一方面可以提高2维成像中目标主体结构的成像质量。

为提高微多普勒信号分析时信杂比,文献[2]利用经验模式分解技术分析了强杂波背景下静止卡车发动机的微多普勒特征;文献[3]对信号进行小波变

换,去除低频分量后利用时频变换对高频分量进行分析,提高微多普勒信号信杂比。以上两种算法都认为目标主体回波信号主要对应低频分量,而微多普勒信号主要对应高频分量,它们适用于微多普勒谱范围与目标主体回波多普勒谱范围重叠不大的情况。为了消除微动对2维成像造成的污染,文献[4,5]对回波信号进行Chirplet分解,根据中心频率与调频率的大小,在信号域实现微多普勒信号的分离,对实测数据达到了较好的分离效果。但Chirplet函数是高斯包络的线性调频信号,包含4个未知参数,分解算法运算量巨大。文献[6]在不同子孔径长度下对回波进行2维成像,对成像单元在不同孔径长度、不同时刻的成像幅度进行统计分析,从而判断这一个散射单元对应结构,在图像域实现微动结构与目标主体结构的分离。由于有些成像单元是微动结构和主体结构共同存在的,而此方法并不能对这些单元的能量进行分离,最后得到的目标主体回波信号与微多普勒信号之间相互耦合明显。文献[7]针对旋转这一微动模型,利用Hough变换在距离像序列中提取

其对应的正弦曲线, 从而实现微多普勒信号与主体回波信号分离。该方法不能推广到其它类型微动结构的信号分离, 且在利用Hough变换提取4参数正弦曲线时运算量巨大。

本文试图寻找一种效果好、计算量少的微动信号分离算法。注意到文献[4]在对信号进行Chirplet分解后实际有用的信息是调频率这一参数, 而确定Chirplet基函数高斯包络的标准差与时间中心对微动信号分离并没有贡献, 反而增加了参数估计的难度及计算量。由此, 本文提出了一种对调幅包络没有限制的调幅-线性调频(AM-LFM)分解的微动信号分离算法, 它在对信号进行AM-LFM分解后, 根据调频率的大小判断各分量对应结构。仿真及实测数据实验结果表明, 本文方法性能优于基于Chirplet分解方法, 且计算量大大降低。

2 信号模型分析

不失一般性, 本文在 2 维成像条件下, 分析包含一个旋转散射中心的目标的雷达回波。在传统的刚体目标 2 维成像中, 认为成像期间目标匀速转动且转动角度比较小, 对信号进行平动补偿后, 包含旋转散射中心的雷达目标回波可表示为^[4]

$$E(f, t) = E_B(f, t) + E_R(f, t) \quad (1)$$

$$E_{Bm}(f, t) = \sum_{m=1}^M \delta_m \exp \left\{ -j \frac{4\pi f}{c} [x_m + y_m \omega t] \right\} \quad (2)$$

$$E_R(f, t) = \delta_R \exp \left\{ -j \frac{4\pi f}{c} [x_c + y_c \omega t + r_c \cos(\omega_c t + \varphi_0)] \right\} \quad (3)$$

其中 f 表示频率, M 表示目标主体散射中心个数, δ_m 为散射系数, (x_m, y_m) 为散射中心坐标; (x_c, y_c) 表示旋转散射中心旋转中心的位置, r_c 为旋转半径, φ_0 表示 $t=0$ 时刻旋转散射中心的初始相位值; ω 表示目标主体的旋转速率, ω_c 表示旋转散射中心的旋转速率, 且有 $\omega_c \gg \omega$ ^[4]。

对式(2)信号相位求偏导, 可得目标主体第 m 个散射中心的多普勒频率为

$$f_{dm}(t) = -\frac{2f}{c} y_m \omega \quad (4)$$

旋转散射中心的旋转速度远大于主体旋转速度, 其多普勒频率为

$$f_{dR}(t) = -\frac{2f}{c} [y_c \omega - \omega_c r_c \sin(\omega_c t + \varphi)] \quad (5)$$

从式(4), 式(5)可以看出, 目标主体散射中心对应多普勒频率是时不变的, 在时间-多普勒平面上表现为一些平行于时间轴的直线, 而旋转微动结构对应为一条正弦曲线, 但可通过多个短时线段拟合, 且由于微多普勒的时变性, 这些拟合的线段在大多

数时间段上的斜率不为零, 如图 1 所示。图 1 中的每一个线段对应一个短时 LFM 信号分量, 线段的斜率对应调频率大小, 也即微多普勒信号可以用一系列幅度调制的调频率不为零的 LFM 信号表示。

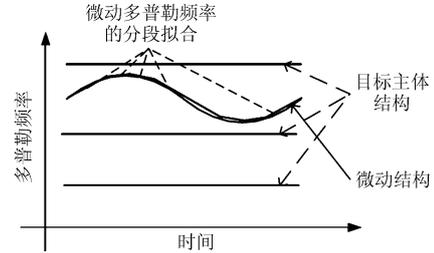


图 1 信号的瞬时多普勒分析

综上所述, 雷达接收信号可以表示为

$$\begin{aligned} E(f, t) &= E_B(f, t) + E_R(f, t) \\ &= \sum_{m=1}^M \delta_m \exp[-j4\pi f(x_m + y_m \omega t) / c] \\ &\quad + \sum_{l=1}^L a_l(t) \exp[j(\alpha_l t + \beta_l t^2 / 2)] \\ &= \sum_{i=1}^P a_i(t) \exp[j(\alpha_i t + \beta_i t^2 / 2)] \end{aligned} \quad (6)$$

其中 α_i 与 β_i 分别为初始频率和调频率, $a_i(t)$ 为复调幅函数, 可认为是一慢变化的低通信号。目标主体信号分量有 $\beta_i = 0$, 微动信号分量有 $\beta_i \neq 0$, 因此, 可以对信号回波进行 AM-LFM 分解, 通过各分量调频率的大小对目标主体回波信号与微动结构回波信号进行分离。

3 基于 AM-LFM 信号分解的微多普勒信号分离

在估计 AM-LFM 信号参数时, 利用 LFM 信号参数估计方法先估计出信号主要分量的调频率与初始频率, 然后对信号进行相位调制, 并对解调后信号低通滤波估计调幅函数。对多分量 AM-LFM 信号, 可基于 Relax 思想对信号进行分离。本文所用多分量 AM-LFM 信号参数估计流程如下^[8]:

(1) 设置调频率范围及量化精度, 得到待检测调频率集合 $\gamma = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N]$; 设置剩余信号为 $x(t) = s(t)$;

(2) 针对每个待检测调频率, 对信号 $x(t)$ 乘以线性调频因子 $\exp(-j\gamma_j t^2 / 2)$ 后进行傅里叶变换, 记录频谱最大峰值的幅度与频率位置 $[A_j, \omega_j]$;

(3) 设 $\{A_j\}$ 最大值对应序号为 k , 则其对应的 ω_k, γ_k 即为估计出来的初始频率和调频率;

(4) 令 $y(t) = x(t) \exp(-j(\omega_k t + \gamma_k t^2 / 2))$, 对 $y(t)$ 低通滤波后, 所得信号 $a_k(t)$ 即为对应调幅函数。在

本文中低通算法如下：对 $y(t)$ 进行傅里叶变换后，取主瓣峰值宽度的1.5倍作为低通滤波器的通带范围，直接用矩形窗函数截断，然后逆傅里叶变换后所得信号即为滤波后信号。

(5) 令 $x(t) = x(t) - a_k(t) \exp(j(\omega_k t + \gamma_k t^2 / 2))$ ，重复步骤(2)-步骤(4)，直至满足终止条件。终止条件可设定为剩下的能量误差不超过某一门限，如1%，或分解次数达到设定的最大分量值。

根据第2节分析可知，对各频点回波进行 AM-LFM 分解后设置门限 γ_g ，认为调频率绝对值小于 γ_g 的 AM-LFM 分量对应目标主体信号，而调频率绝对值大于 γ_g 的分量对应微多普勒信号，实现目标主体信号与微多普勒信号的分离。

4 仿真与实测数据处理结果

4.1 2维成像中的微多普勒分离

场景设置与文献[4]第1个仿真试验一致。目标主体包含5个散射中心，所在位置与散射系数分别为 $\{(0,0),5\}$, $\{(\pm 6, 0),1\}$, $\{(0, \pm 6),2\}$ ；一个散射系数为3.33的散射中心以6.67 Hz为周期绕原点旋转，旋转半径为0.2 m。雷达中心频率为10 GHz，带宽为800 MHz，帧与帧之间的重频 f_s 为1400 Hz，采集384个脉冲的数据进行2维成像，在此时间内，目标主体旋转 4° 。目标总体2维像、微动结构对应2维像及单频点信号时频图如图2所示，从图可以看出，微动造

成了2维像的模糊。

Chirplet 为高斯包络的线性调频信号，基函数时域形式为

$$h_k(t) = (\pi\alpha_k^2)^{-1/4} \cdot \exp\left\{-\frac{(t-c_k)^2}{2\alpha_k^2} + j\omega_k(t-c_k) + j\beta_n(t-c_k)^2\right\} \quad (7)$$

其中 β_n 为调频率， ω_k 为频率中心， c_k 为时间中心， α_k 为标准差。在估计 Chirplet 参数时，通过 2 次相位函数峰值检测来同时获得调频率、时间中心和标准差估计，具体流程可参考文献[9]。

令调频率 $k = 2\pi f_s / \Delta T$ ，其中 ΔT 为 2 维像成像时间， K 恰好对应了在时频图上斜率为 1 的调频率值。设置调频率 β 的搜索范围为 $[-5k, 5k]$ ，判别门限大小为 $\gamma_g = 0.02K$ 。分别利用 Chirplet 分解与 AM-LFM 分解对各频点的微动信号与目标主体回波信号进行分离，所得分离的微动信号时频图如图 3，图 4 所示。

从图 3，图 4 可以看出，两种算法都能有效地对目标主体回波信号和微多普勒信号进行分离。为了定量地比较分离结果的好坏，将分离后得到的微动信号与目标主体信号进行 2 维成像，并将所得 2 维像及微多普勒信号时频图与各自的理想图像进行相关处理：

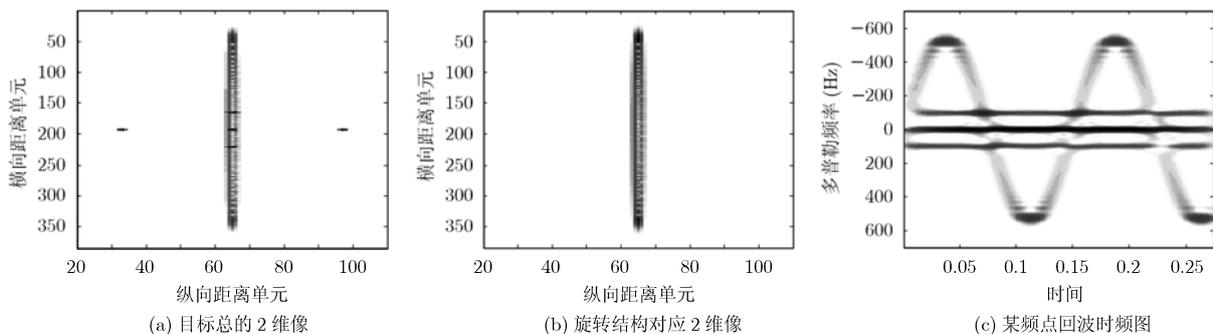


图2 目标原始信号

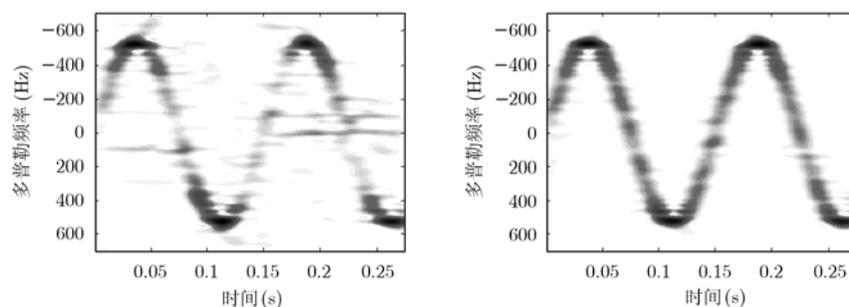


图3 某频点微动信号时频图(基于 Chirplet 分解) 图4 某频点微动信号时频图(基于 AM-LFM 分解)

$$\text{Corr} = \frac{\sum_n \sum_m |\text{Orig}(n, m)| |\text{Decomp}(n, m)|}{\sqrt{\sum_n \sum_m |\text{Orig}(n, m)|^2} \sqrt{\sum_n \sum_m |\text{Decomp}(n, m)|^2}} \quad (8)$$

其中 $\text{Orig}(n, m)$ 表示原始的理想信号, $\text{Decomp}(n, m)$ 表示分解后的信号。对分离信号与原始信号的相关性分析结果如表1所示。表1中, “微多普勒信号时频图相关性” 为各频点时频图相关性均值。

表 1 2 维成像中微多普勒信号分离性能比较

	主体像相关性	微动像相关性	微多普勒信号时频图相关性	耗时 (s)
基于 Chirplet 分解	0.9875	0.8684	0.8772	18427
基于 AM-LFM 分解	0.9962	0.9722	0.9427	157.2

本文算法与文献[4]基于 Chirplet 分解的微多普勒信号分离算法基本思想都是对信号进行具有 2 次相位调制的信号分量分解, 通过调频率来判断各分量的对应结构。从表1可以看出, 在分离信号与原始信号的相关性及运算时间方面, 本文所提算法效果均要好于文献[4]方法, 这可以从以下几个方面进行解释:

(1) Chirplet 信号除相位 2 次调制外, 还包含标准差与时间中心参数, 参数较多, 分解方法运算量大^[4-9]。而本文算法在估计出调频率与初始频率后, 直接对解相位调制信号低通滤波, 得到调幅估计, 降低了运算量。在进行 Chirplet 分解时, 本文所用算法为文献[9]中的快速算法, 其运算量集中在 2 次项函数的计算上, 它在每个待检测调频率的计算量为 N^2 量级, 其中 N 为信号的点数; 而本文在进行 LFM 信号解调时, 也需对每个待检测点进行计算, 每点的计算量为 $N \log_2 N$ 量级, 运算量大大减少。

(2) Chirplet 信号形式严格, 要求其包络必须为高斯调制的, 而 AM-LFM 模型则对信号没有限制。对于相位 2 次调制的非高斯包络信号分量, Chirplet 分解需要多个分量来拟合, 而 AM-LFM 分解只需 1 个分量就可对信号进行拟合。在仿真时, 设定最大分解项为 100 项, 此时 Chirplet 分解只能模拟信号 90% 左右的能量, 而 AM-LFM 在分解到 30 项时候已经能模拟信号 99% 以上的能量。

(3) 对于包络为非高斯调制的固定目标信号, Chirplet 分解将其分解为几个标准差比较小的

Chirplet 分量, 而标准差越小, 信号持续时间越短, 对应调频率估计误差方差越大, 从而可能导致将目标主体回波信号的部分分量判断为微动结构。如图 3 分离的微多普勒信号时频图中存在一些与时间轴平行的分量, 它们应该属于目标主体信号。

需要说明的是, 在上述仿真试验中没有考虑噪声的影响。对于高斯白噪声, 其调频率的概率分布是均匀的, 而微动信号调频率判断门限范围远大于主体信号对应调频率范围, 因此大部分的噪声能量将混入微动信号中, 仿真结果也验证了这一点, 但由于篇幅原因, 在此不给出详细的仿真结果。

4.2 实测数据处理结果

所用观测雷达为频率步进雷达, 雷达频率范围为 34 GHz-34.512 GHz, 频率步进间隔为 0.5 MHz, 一帧对应 1024 个频点, 脉冲重复频率为 50 kHz, 对应帧与帧之间的重复频率为 48.83 Hz, 共获得了 56 帧目标一维距离像, 对应 $\Delta T = 1.147$ s。测试目标为一双角反射器旋转体, 旋转体由两个角反射体构成, 用一个杠杆连接, 杆中心固定在旋转电机上。在测量时, 双角反射器旋转体放在地面上, 在此条件下, 地面杂波固定, 可以将其等效为目标主体结构, 对应式(2)中 $\omega = 0$ 。测量数据所得一维距离像序列如图 5 所示。

在图 5 中可隐约看到两条对称的正旋曲线夹杂在一系列直线中, 这些直线对应地面固定杂波, 正弦曲线对应两个旋转角反射器的旋转微动回波信号。设置调频率 β 的搜索范围为 $[-5\text{k}, 5\text{k}]$, 判别门限大小为 $\gamma_g = 0.1 \text{ k}$, 分别利用 Chirplet 分解与 AM-LFM 分级对微动信号与目标主体回波信号进行分离, 分离得到目标微动结构的 1 维距离像序列如图 6 所示, 从结果可以看出, 基于 Chirplet 分解的方法将一些地面杂波分量判断为了微多普勒信号, 而本文方法分离效果明显好于基于 Chirplet 分解方法。

5 结束语

当目标包含微动结构是, 目标主体回波和微动

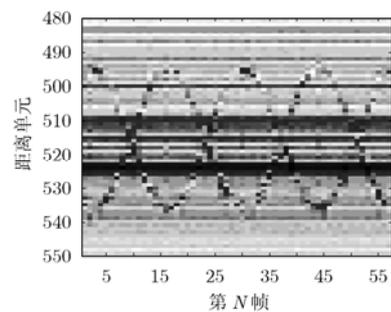


图 5 原始回波 1 维距离像序列

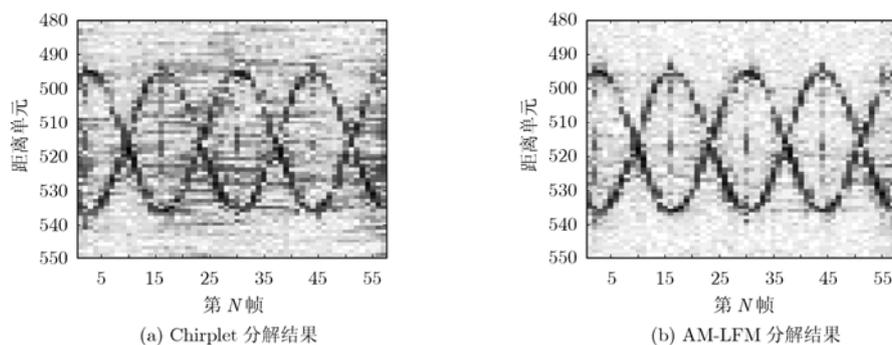


图 6 分离得到的微动目标距离像序列

回波是混叠在一起的,对微动特征分析与目标主体 2 维成像造成不利影响。本文提出了基于 AM-LFM 分解的微多普勒信号提取方法,与基于 Chirplet 分解的方法相比,由于没有包络为高斯调制的限制,本文算法减少了信号分解时的计算量,且最后分离效果好。仿真与实测数据验证了本文算法的有效性。

需要指出的时,本文的分析及仿真以旋转微动结构为例进行说明的,而其它微动模型的多普勒频率也是随时间的变化而变化的^[1],具有与旋转微动结构相似的特性,因此上述分析结果对其它微动模型具有普适性。本文算法只适用于在观测时间内,目标主体部分速度变化率不大的情况,如匀速平动或小角度转动,当目标主体运动形式复杂时,如何分离微多普勒信号值得进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Chen V C, Li F, Ho Shen-Shyang, and Wechsler H. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation Study [J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2-21.
- [2] Cai Cheng-jie, Liu Wei-xian, Fu J S, and Lu Li-long. Empirical mode decomposition of micro-Doppler signature [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Radar, Washington, USA, May 2005: 895-899.
- [3] Thayaparan T and Abrol S, *et al.* Analysis of radar micro-Doppler signatures from experimental helicopter and human data [J]. *IET Radar Sonar Navig*, 2007, 1(4): 289-299.
- [4] Li J and Ling H. Application of adaptive chirplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating parts [J]. *IEE Proc.-Radar Sonar Navig*, 2003, 150(4): 284-291.
- [5] Lin Bin, Wan Jian-wei, and Yao Kang-ze, *et al.* ISAR based on micro-Doppler analysis and Chirplet parameter separation[C]. Synthetic Aperture Radar 2007, Huang Shan, China, APSAR 2007: 379-384.
- [6] Stankovic L S, Djurovic I, and Thayaparan T. Separation of target rigid body and micro-Doppler effects in ISAR imaging [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(4): 1496-1506.
- [7] Zhang Qun, Tat Soon Yeo, and Hwee Siang Tan, *et al.* Imageing of a moving target with rotating parts based on the hough transform [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 291-299
- [8] 刑孟道, 保铮, 冯大政. 基于瞬时幅度和调频率估计的机动目标成像方法[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2001, 28(1): 22-26.
Xing Meng-dao, Bao Zheng, and Feng Da-zheng. Dynamic ISAR imaging of the maneuvering target based on the instantaneous amplitude and chirp rate estimation [J]. *Journal of Xidian University (Natural Science)*, 2001, 28(1): 22-26.
- [9] 王勇, 姜义成. 一种自适应 Chirplet 分解的快速算法[J]. *电子学报*, 2007, 35(4): 701-704.
Wang Yong and Jiang Yi-cheng. A fast implementation of adaptive Chirplet decomposition [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(4): 701-704.

贺思三: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理、微动特征提取、非平稳信号分析等。

周剑雄: 女, 1977年生, 副教授, 研究方向为雷达信号处理、高分辨雷达成像、自动目标识别。

赵会宁: 女, 1979年生, 讲师, 研究方向为雷达信号处理、雷达干扰与抗干扰。

付 强: 男, 1962年生, 教授, 研究兴趣为精确制导智能信息处理与系统设计。