

基于 ISAL 的含旋转部件目标成像及微动特征提取

何劲^{*①} 张群^{①②} 邓冬虎^① 李松^③

^①(空军工程大学电讯工程学院 西安 710077)

^②(复旦大学波散射与遥感信息国家教育部重点实验室 上海 200433)

^③(空军工程大学导弹学院 三原 713800)

摘要: 逆合成孔径激光雷达能实现对目标的高分辨2维成像,但如果目标中包含旋转部件,旋转部件回波带来的微多普勒效应会对目标的成像造成干扰。该文提出一种含旋转部件目标微多普勒特征提取及成像方法,首先利用匹配参考信号的方法对回波信号进行一定程度的非线性补偿,然后通过二值数学形态学方法提取频率-慢时间谱图中微多普勒特征曲线的信息,并利用微多普勒特征曲线的周期性进行曲线分离,实现对目标旋转部件微动参数的快速提取。在此基础上,对主体回波信号和旋转部件回波信号进行分离,完成对目标主体的2维成像。仿真实验验证了该文算法不仅能有效剔除目标旋转部件对逆合成孔径激光雷达成像的干扰,还能通过微多普勒特征的提取为目标识别提供新的途径。

关键词: 逆合成孔径激光雷达; 旋转部件; 微多普勒效应; 非线性补偿; 二值数学形态学

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)06-1284-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00726

Imaging and Motion Feature Extraction for the Targets with Rotating Parts in ISAL

He Jin^① Zhang Qun^{①②} Deng Dong-hu^① Li Song^③

^①(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

^②(Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (Ministry of Education), Fudan University, Shanghai 200433, China)

^③(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

Abstract: Inverse Synthetic Aperture LADAR (ISAL) can realize high resolution imaging for targets. However, if there are rotating parts in the targets, the echo from rotating parts would influence the imaging for targets. A micro-Doppler feature extraction and imaging method for the targets with rotating parts in ISAL is proposed. The echo is compensated by matched reference signal method firstly. Then, the micro-Doppler curves are separated from frequency-slow time spectrogram. The parameters of micro-Doppler curves are extracted fast based on the periodicity of the curves. Finally, the echo of rotating parts is separate from the echo of target body, and the 2-D imaging for target is realized. Simulation shows that the proposed method can not only filter out the pollution caused by rotating parts in ISAL imaging, but also provide new information for the target identification.

Key words: Inverse Synthetic Aperture LADAR (ISAL); Rotating part; Micro-Doppler effect; Non-linear compensation; Binary mathematical morphology

1 引言

光波波段合成孔径雷达利用大带宽的激光信号获得高分辨的目标距离像,利用雷达与目标的相对运动获得高分辨的目标方位像,打破了传统光学成像系统孔径对方位向分辨率的限制,得到了越来越

广泛的关注^[1,2]。2002年,美国海军研究实验室在实验室中完成了对目标的2维成像^[3]。2006年美国国防高级研究计划局资助的项目成功得到了机载合成孔径成像激光雷达的地面场景成像图^[4]。2007年, Karr等人^[5]进一步深入研究了合成孔径激光雷达对信号相位和频率稳定性的需求。国内也在这方面开展了许多研究^[6],文献[7]介绍了一种机载合成孔径成像激光雷达的成像算法,文献[8]研究了低信噪比情况下的稀疏多孔径逆合成孔径激光雷达成像方法。

2011-07-14 收到, 2012-02-20 改回

国家自然科学基金(60971100)和陕西省自然科学基金(2010JQ8007)资助课题

*通信作者: 何劲 hjelva@163.com

虽然国内外的研究人员已经在实验室内较为成功地实现了基于(逆)合成孔径激光雷达的目标2维成像,但这些研究主要针对的是刚体目标,如果目标中包含了旋转部件(如直升机的旋翼,机载、舰载旋转雷达等),旋转部件的回波引起的微多普勒效应会对2维成像造成干扰^[9],因此,开展基于逆合成孔径激光雷达(Inverse Synthetic Aperture LADAR, ISAL)的含旋转部件目标成像研究具有重要的意义。微多普勒效应分析和特征提取技术在单频信号和线性调频信号体制雷达中已经得到了较为广泛的研究^[10-13],其中,最典型的微多普勒特征提取方法包括信号域的chirplet分解^[14]和图像域的扩展Hough变换^[15]等。与微波雷达不同,ISAL大多采用可调谐激光器发射的线性调频光束作为信号辐射源。可调谐激光器发射的信号为线性调频连续波信号,它的非线性调频特性会导致ISAL成像的距离分辨率降低,所以需要在成像前先完成非线性补偿。目前大多数ISAL成像实验中都采用了匹配参考信号的方法来解决这一问题。但由于目标中的旋转部件通常离主体参考点较远,匹配参考信号的方法很难对其回波进行完全补偿,而且,即使完成了较好的补偿,旋转部件回波引起的微多普勒效应也会对主体的成像造成干扰。针对这一问题,本文提出了一种针对ISAL的含旋转部件目标微多普勒参数提取及2维成像方法。首先通过匹配参考信号的方法对目标回波进行一定程度的补偿,再利用旋转部件回波体现的正弦曲线特性,分离频率-慢时间2维谱图域上的曲线,并结合二值数学形态学方法实现对曲线的角频率、振幅、初相等参数的快速提取,完成对主体部分回波的提取及2维成像。仿真实验证明本文算法不仅能有效剔除目标旋转部件对ISAL成像的干扰,还能通过微多普勒特征参数的提取为目标识别提供新的途径。

2 基于 ISAL 的含旋转部件目标回波信号分析

由于可调谐激光器发射的激光信号不是一个理想的线性调频信号,存在高阶的相位误差,所以会引入非线性误差。可调谐激光器发射的激光信号模型可以表示为

$$s(t) = \text{rect}(t/T_p) \cdot \exp(j2\pi\Phi(t)) \quad (1)$$

其中 $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形窗函数,当 $|t| \leq T_p/2$ 时 $\text{rect}(t/T_p) = 1$, $|t| > T_p/2$ 时 $\text{rect}(t/T_p) = 0$, T_p 为脉冲重复间隔。相位 $\Phi(t) = f_c t + \mu t^2/2 + k_3 t^3 + \dots + k_i t^n + \dots$, $k_i = 1, 2, \dots, n$, f_c 表示信号的载频, $\mu = \Delta f/T_p$ 表示信号的调频斜率,信号带宽 $B = \mu T_p$ 。

分离发射信号,并延时 $\tau_{\text{refl}} = 2R_{\text{refl}}/c$, R_{refl} 为时延等效距离,可以得到本振信号为

$$s_{\text{ref}}(t) = \text{rect}\left(\frac{t - \tau_{\text{refl}}}{T_p}\right) \cdot \exp(j2\pi\Phi(t - \tau_{\text{refl}})) \quad (2)$$

假设回波信号的时延为 $\tau_1 = 2R_1/c$, R_1 为目标时延等效距离,以三次相位误差为例进行分析,利用本振信号对回波信号进行外差处理,可以得到外差后的目标通道信号为

$$s_{\text{if1}}(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}\mu\left(t - \frac{2R_{\text{refl}}}{c}\right) \cdot \Delta R_1\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}f_c\Delta R_1\right] \exp\left[j\frac{4\pi}{c^2}\mu\Delta R_1^2\right] \cdot \exp\left[j\frac{36\pi k_3}{c^3}(R_1^3 - R_{\text{refl}}^3)\right] \cdot \exp\left[j\frac{24\pi k_3}{c^2}\Delta R_1^2 t\right] \exp\left[-j\frac{12\pi k_3}{c}\Delta R_1 t^2\right] \quad (3)$$

其中 $\Delta R_1 = R_1 - R_{\text{refl}}$ 。

式(3)中共包含6个相位项,其中第1项为距离项;第2项为线性相位项;第3项为残余视频相位(RVP)项;后3个相位项是由三次相位误差项引起的,其中的常数相位和关于 t 的一次相位不会对1维距离成像产生影响,但是关于 t 的二次相位会造成1维距离像的展宽,导致距离像分辨率恶化,但可以利用基于参考通道技术的补偿方法进行相位补偿^[16]。

如果目标中包含旋转部件,旋转点的运动状态如图1所示, O 点为参考点,雷达与参考点 O 的初始距离为 R_0 , P 点为旋转点,以旋转频率 ω 绕旋转中心 C 点旋转,旋转半径 r 。

假设在 t 时刻,雷达与参考点 O 的距离变为 R_1 , P 点旋转至位置 P' ,雷达与旋转中心的距离远大于旋转半径,雷达与旋转点之间的径向距离可以近似表示为

$$R_{Pt} \approx R_1 + R_{OC} + r \cos(\omega t + \theta_0) \quad (4)$$

其中 R_{OC} 为旋转中心到参考点的径向距离, θ_0 为初始相位。将式(4)代入式(1),可以得到旋转点的回波信号为

$$s_P(t) = \text{rect}\left(\frac{t - (2R_{Pt}/c)}{T_p}\right) \cdot \exp\left[j2\pi\Phi\left(t - \frac{2R_{Pt}}{c}\right)\right] \quad (5)$$

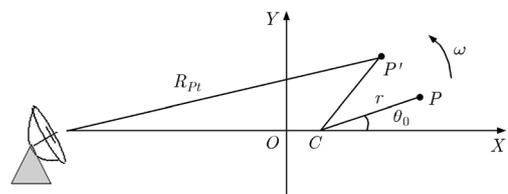


图1 旋转点目标的几何示意图

仍以式(2)所示的本振信号作为参考信号,以三次相位误差为例进行分析,对旋转点的回波信号进行差频处理,去除RVP项的影响,构造补偿函数进行补偿后,可以得到

$$\begin{aligned}
 s_{ifP-fd}(t) = & \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}\mu(R_{OC} + r\cos(\omega t + \theta_0))t\right] \\
 & \cdot \exp\left[j\frac{24\pi k_3}{c^2}\left((\Delta R_1 + R_{OC} + r\cos(\omega t + \theta_0))^2 - \Delta R_1\Delta R_2\right)t\right] \\
 & \cdot \exp\left[j\frac{4\pi}{c}\mu\left(\frac{2(R_{ref1} - R_{ref2})}{c}\Delta R_1 + \frac{2R_{ref1}}{c}(R_{OC} + r\cos(\omega t + \theta_0))\right)\right] \\
 & \cdot \exp\left[j\left(\frac{36\pi k_3}{c^3}(R_1^3 - R_{ref1}^3) - \frac{36\pi k_3}{c^3}(R_2^3 - R_{ref2}^3)\frac{\Delta R_1}{\Delta R_2}\right)\right] \quad (6)
 \end{aligned}$$

对式(6)进行关于 t 的傅里叶变换后,可以在频率-慢时间谱图中得到由旋转部件回波引入的微多普勒曲线。虽然微多普勒曲线的基线位置和振幅会受到高阶相位系数的影响,但其仍然具备正弦曲线的特征。由于微多普勒曲线的存在会对主体目标的2维成像造成干扰,在对目标主体回波进行2维成像之前,需要先剔除微多普勒曲线的影响。

3 目标微动参数提取及2维成像

匹配参考信号方法主要补偿的是信号 $s_{if1}(t)$ 中关于 t^2 的相位项,由于每一次成像过程中补偿函数的取值是唯一的,若目标中包含 L 个散射点,当散射点 l_1 的回波能得到完全补偿,其它散射点回波补偿结果的好坏将取决于它们与 l_1 之间的距离,与 l_1 的距离越远,补偿效果越差^[17,18]。由于旋转部件的旋转中心与目标参考点之间的距离通常较远,且旋转部件的散射点与旋转中心还有一定的距离,匹配参考信号的方法不可能完全补偿旋转部件散射点回波信号在谱图域中出现展览问题,因此,如果在信号域中直接采用chirplet分解等方法提取微多普勒曲线的参数,其准确性会受到影响。针对这一问题,本文提出了一种在图像域中提取ISAL目标微多普勒参数的方法。

旋转部件的回波通常与主体部分回波混在一起,所以在提取微多普勒参数时,首先需要获得完整的微多普勒曲线。因此,我们将包含初始相位值的谱图保存到一个新的矩阵中,再利用慢时间积分法^[19]剔除谱图中的主体回波信息,得到只保留有微

多普勒曲线的新“谱图”。

由于得到的微多普勒曲线仍存在一定的展览效应,直接提取其参数的准确性不高,我们将仅包含微多普勒曲线的谱图转换为二值图像,通过边缘检测技术提取曲线的边缘信息。检测出曲线的边缘信息后,每一条“粗”的微多普勒曲线会变成两条“细”的微多普勒曲线,“细”微多普勒曲线的角频率、半径、初相等参数与“粗”微多普勒曲线均一样,但对它们进行参数检测将可以保证较高的检测准确性。下一步是采用图像域的微多普勒参数提取方法提取曲线的参数,最典型的图像域微多普勒特征提取方法是扩展Hough变换^[15],但是,ISAL目标微多普勒曲线的展览会对扩展Hough变换的提取准确性带来影响,而且这种方法需要对微多普勒曲线的角频率、半径、初相以及正弦曲线在频率轴的位置这4维参数进行联合搜索,计算量比较大,速度比较慢。因此,本文在对微多普勒曲线进行二值图像处理的基础上,进一步利用不同频率曲线具有不同周期的性质实现对曲线参数的快速提取,不仅保证了参数提取的准确性,还有效提高了计算效率。

由于旋转部件回波信号在频率-慢时间2维谱图域上体现的是正弦曲线的特征,可以将其表达式写为

$$f = A \sin(\omega t + \varphi) + d \quad (7)$$

其中 A 为曲线在频率-慢时间谱图内的振幅, ω 为旋转角频率,且 $\omega = 2\pi/T$, T 是周期, φ 为曲线在谱图上体现的初始相位, d 为基线,它描述了曲线在谱图中频率轴的位置。

首先对不同频率的曲线进行分离。由于在频率-慢时间谱图上具有相同频率的点(在谱图中体现为行),必然有其周期性。因此,可以将每一个行中的点按照所有可能的周期进行排列,并取出所有可能的周期。这样每一行都有一个或一组的排列可能,及其相应的周期。利用每一行得到的周期数据,映射到1维参数 ω , 这样具有相同频率的所有排列组合,将被累加器收敛于一个局部最大值。从而获得所有曲线的角频率 ω 。与此同时,可以获得角频率 ω 所对应的每一个点,从而将不同频率的曲线分离开来。

进一步分离具有相同频率不同基线的曲线。假设 $f_1 = A \sin(\omega t_1 + \theta) + d$, $f_2 = A \sin(\omega t_2 + \varphi) + d$, 且 $t_2 - t_1 = \pi/\omega$, 那么必然有 $d = (f_1 + f_2)/2$ 。首先确定谱图上具有相同频率的点所在的某 f'_1 行,查找另一 f'_2 行,使得 f'_1 和 f'_2 行上的点在慢时间 τ 轴的位置相差的正好是半个周期,那样就生成一个 $d = (f'_1 + f'_2)/2$ 。利用这一特性,将具有相同角频率 ω 的

曲线上的所有点, 映射到参数 d 上, 这样相同角频率 ω , 且具有相同基线的所有点, 将同样被收敛于一个局部最大值。与此同时, 由于曲线的基线必然是旋转中线在谱图上的直线谱。而在前一部分很容易得知在谱图中哪里是直线谱, 这样仅仅需要比较在直线位置上的累加器数值。从而将相同角频率, 却不同基线的曲线分离开来。

下一步是计算目标的旋转半径, 依据式(7)可以假设:

$$z_1 = f - d = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

$$z_2 = \frac{1}{\omega} \frac{df}{dt} = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (9)$$

从式(8)与式(9)可以得出 $A = \sqrt{z_1^2 + z_2^2}$ 。首先确定谱图上具有相同频率的点所在的某 f'_1 行, 查找另一 f'_2 行, 使得 f'_1 和 f'_2 行上的点在慢时间 τ 轴的位置相差很小。定义差值所组成的数组映射到慢时间上为 $\Delta\tau$, 那么,

$$z_2 = \frac{1}{\hat{\omega}} \frac{f'_2 - f'_1}{\Delta\tau} \quad (10)$$

$\hat{\omega}$ 为之前所估计得到的角频率值。这样, 在相同角频率、相同基线以及相同半径的点将收敛于一个局部最大值。而在计算 d 时出现的特殊状况, 将不会收敛于一个局部最大值, 从而将这种状况排除。这样可以提取出相同角频率和相同基线的半径。

对于初始相位 φ , 则采用穷搜索的办法, 对其所有可能的值进行遍历。即查找一个

$$\hat{\varphi} = \min_{\hat{\theta} \in (0, 2\pi)} \left\{ |f - \hat{A} \sin(\hat{\omega}t + \hat{\varphi}) - \hat{d}| \right\} \quad (11)$$

式中 $\min_{\hat{\theta} \in (0, 2\pi)} \{ \}$ 表示让括号内最小的 $\hat{\theta}$ 值, 而 $(\hat{A}, \hat{\omega}, \hat{d})$

分别表示之前所估计得到的半径、角频率和基线值。这样满足 $(\hat{A}, \hat{\omega}, \hat{d})$ 的所有点也会在 $\hat{\theta}$ 上收敛于一个局部最大值, 从而获得初始相位的估计值。在得到目标微多普勒曲线的参数后, 我们可以重构微多普勒曲线的参数方程, 在原始谱图中将相应的位置置零以剔除微多普勒曲线对主体回波的影响。

4 仿真实验

4.1 旋转目标微多普勒特征参数提取

先对一组旋转散射点的微多普勒特征参数进行提取, 以验证本文微多普勒特征提取方法的正确性。假设激光器波长调谐范围为 1530–1560 nm, 波长调谐速度为 10 nm/s, 激光脉冲宽度为 0.03 s, 则其调频带宽约为 3×10^{11} Hz, 脉冲重复频率为 256 Hz, 系统采样率为 960 kHz。目标模型如图 2(a)所示, Q 点为参考点, C_1 点和 C_2 点为两个旋转中心, $R_{QC_1} = -0.18$ m, $R_{QC_2} = -0.27$ m。有 4 个旋转散射点, 散射点的散射系数均为 1, 其参数如表 1 所示。为

验证算法的抗噪性, 回波信号中加入了高斯白噪声, 信噪比为 -5 dB。

表 1 各旋转点的参数表

旋转点	旋转中心	半径 (m)	频率 (Hz)	初始相位 (rad)
1	C_1	0.02	4	0
2	C_1	0.01	2	$\pi/2$
3	C_2	0.01	5	$\pi/3$
4	C_2	0.03	3	0

图2(b)为对4个旋转点回波信号进行差频处理, 并利用匹配参考信号方法进行补偿后得到的谱图, 各条曲线仍存在一定的展宽现象。进一步对图2(b)进行二值处理和边缘检测, 得到的结果如图2(c)所示, 4条“粗”的曲线已经变为8条“细”的曲线。利用本文方法进行参数检测的结果和计算时间如表 2所示, 各条曲线的参数在信噪比为 -5 dB 时都被较为准确地检测到, 说明本文算法具有较好的抗噪性。图2(d)–图2(f)分别为图2(c)中频率为 4 Hz 的两条曲线振幅、相位和基线位置的收敛结果。为验证本文算法的优势, 仿真中将本文算法与扩展Hough变换进行了比较, 如果不进行边缘检测直接利用扩展Hough变换提取曲线参数, 会检测出19条曲线, 与真实情况不符, 这说明在检测ISAL目标微多普勒特征时二值处理和边缘检测的必要性。进一步地, 在完成二值处理和边缘检测后, 用两种方法都可以有效检测出曲线参数, 但通过比较计算时间可以发现, 本文算法在计算效率上有了较大程度的提高。

4.2 散射系数起伏影响分析

进一步分析散射系数起伏变化对本文算法的影响, 假设旋转散射点按正弦曲线的规律以 4 Hz 的频率起伏变化, 当变化范围为 0.4–1 时, 得到的微多普勒曲线频率-慢时间谱图和边缘检测后的微多普勒曲线分别如图 3(a)和图 3(b)所示。对图 3(b)最上方旋转频率为 4 Hz 的曲线进行检测, 得到的收敛结果分别如图 3(c)–图 3(e)所示。可以看出, 当散射系数起伏变化范围为 0.4–1 时, 振幅、相位、基线位置等参数能较好地收敛, 这说明本文算法具有较好的鲁棒性, 在散射系数起伏变化较大的情况下, 仍然能实现对曲线参数的检测。

4.3 含旋转部件目标微多普勒特征参数提取及 2 维成像

假设激光器参数与实验(1)相同, 目标模型如图 4(a)所示, 用于模拟直升机尾翼旋转对主体目标成像的影响。假设雷达与模型的初始距离为 2 km, 模

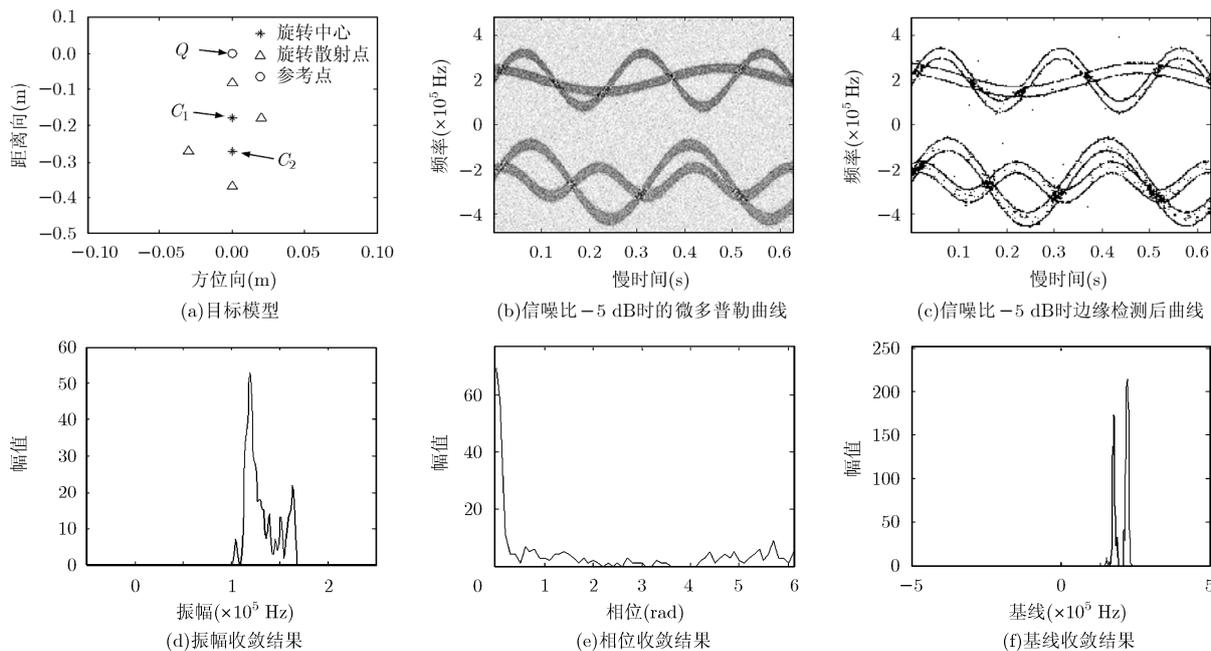


图2 旋转点微多普勒参数分析及提取

表2 各旋转点的微多普勒参数提取结果

旋转点	振幅(10^5 Hz)	角频率(rad)	初始相位(rad)	基线位置(10^5 Hz)	本文算法计算时间(min)	Hough 变换计算时间(min)
1	1.211	25.132	0.027	2.274	0.0381	2.1938
	1.211	25.132	0.027	1.798	0.0375	2.2123
2	0.523	12.566	1.572	2.241	0.0402	2.2663
	0.523	12.566	1.572	1.812	0.0396	2.2567
3	0.645	31.415	1.049	-2.225	0.0392	2.2114
	0.645	31.415	1.049	-2.083	0.0390	2.2209
4	1.676	18.849	0.028	-2.213	0.0401	2.2633
	1.676	18.849	0.028	-2.810	0.0405	2.2684

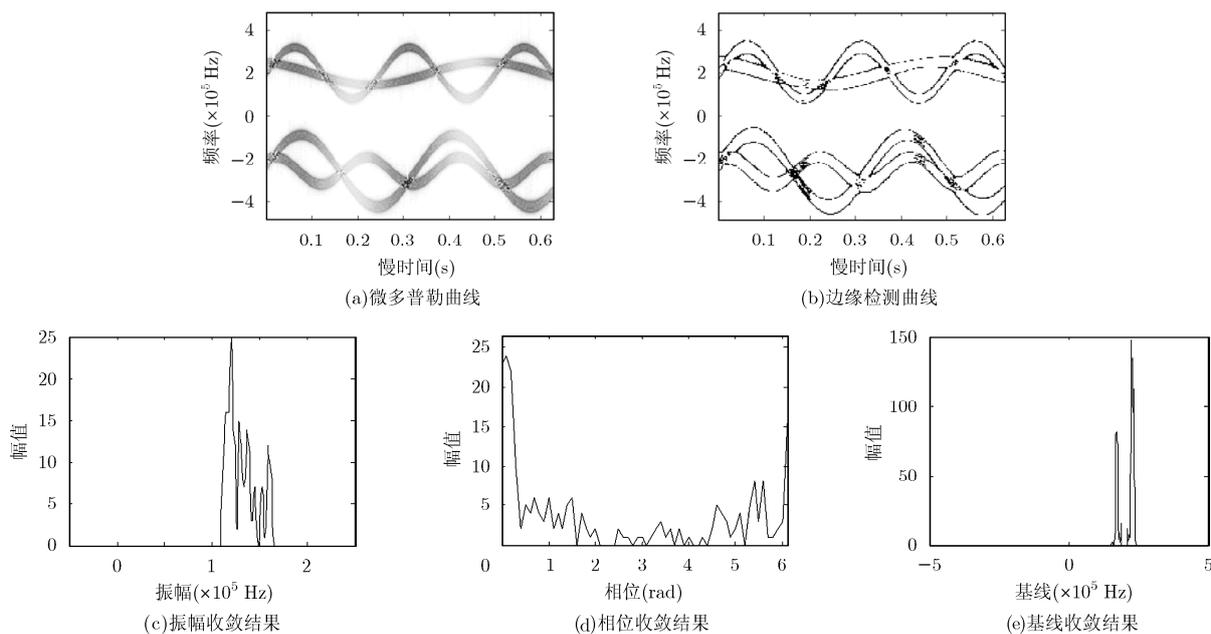


图3 旋转散射点散射系数起伏变化幅度为0.4-1时的微多普勒曲线特征和振幅、相位和基线位置收敛结果

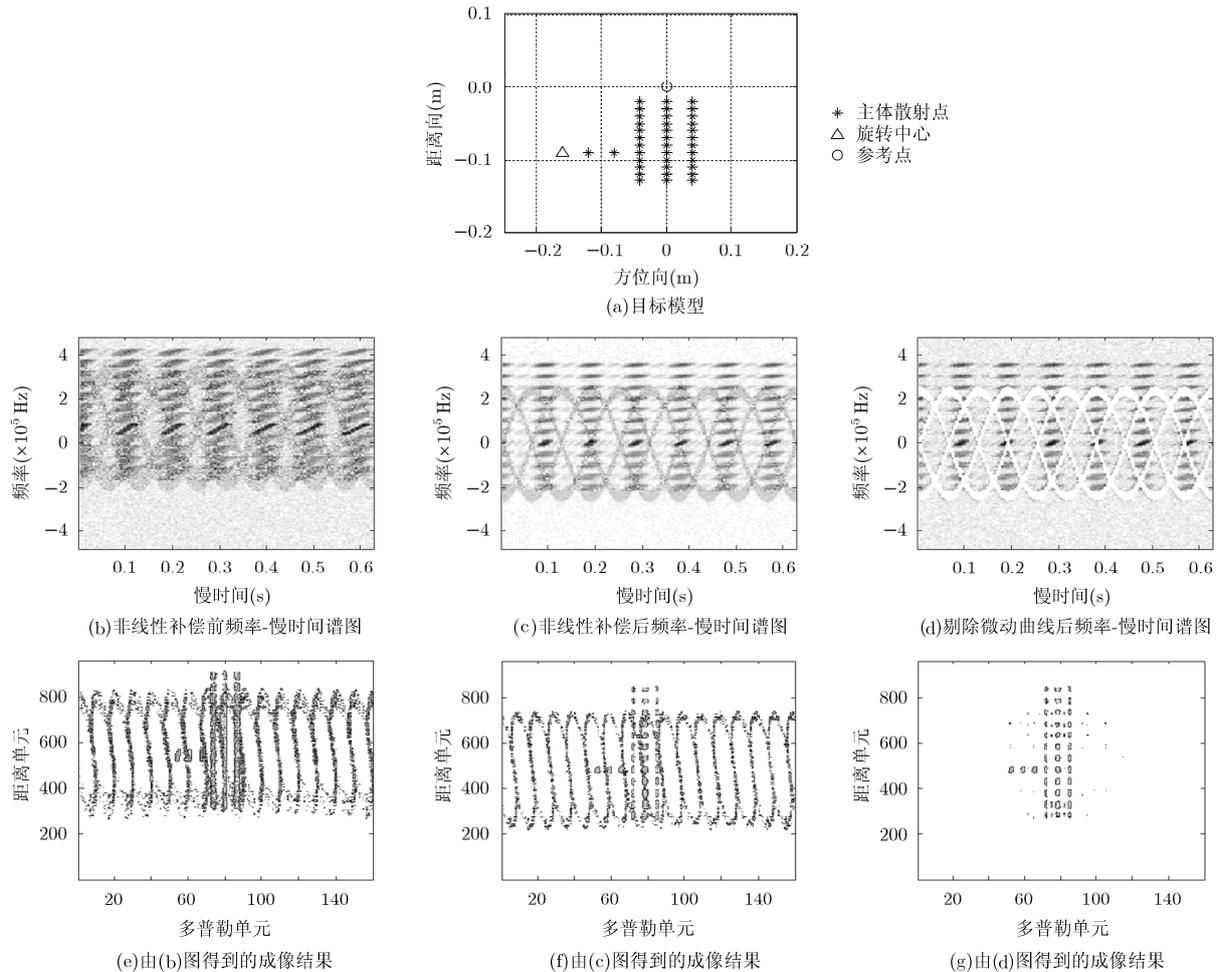


图4 含旋转部件目标微多普勒特征分析及参数提取结果

型与雷达之间的相对速度为 5 m/s，模型中共包含 39 个主体散射点和 4 个旋转散射点，旋转散射点以 4 Hz 的旋转频率、0.04 m 的旋转半径绕旋转中心微动，其初始相位分别为 $0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$ ，回波信号的信噪比为 -5 dB。以 A 点为补偿中心进行非线性补偿，即信号通道的距离差 $\Delta R_1 = 0.02$ m，选取参考通道距离差 $\Delta R_2 = 0.005$ m，对补偿函数进行估计，可以估计出补偿函数约为 4.01。对所有散射点的回波差频信号进行非线性补偿后，频率-慢时间谱图如图 4(b)和图 4(c)所示。可以看出，目标 1 维距离像展宽情况得到了较大程度改善，但各个散射点的改善程度是存在一定区别的，与 A 点之间径向距离越远的点补偿效果越差。

完成非线性补偿后，需要对微多普勒特征参数进行提取。利用慢时间积分法去除主体回波，并进行二值处理和边缘检测后，利用本文方法对曲线进行检测得到的结果如表3所示。利用表3中的微多普勒曲线参数进行曲线重构，并将原始谱图中相应位置置零后的结果如图4(d)所示。对图4(b)-图4(d)分

别进行2维成像处理，得到的结果如图4(e)-图4(g)所示，可以看出，旋转部件引起的微多普勒效应对目标主体的成像造成严重的干扰，而利用本文方法剔除微多普勒曲线后，微多普勒效应的影响基本消除。

5 结论

当目标中包含旋转部件时，旋转部件的回波会

表3 旋转部件的微多普勒参数提取结果

旋转点	振幅 (10^5 Hz)	频率(rad)	初始相位 (rad)	基线位置 (10^5 Hz)
1	2.385	25.132	0.017	0.391
	2.385	25.132	0.017	-0.245
2	2.385	25.132	1.572	0.391
	2.385	25.132	1.572	-0.245
3	2.385	25.132	3.143	0.391
	2.385	25.132	3.143	-0.245
4	2.385	25.132	4.712	0.391
	2.385	25.132	4.712	-0.245

对目标主体的成像造成干扰,理论分析和实验结果表明,这一干扰在采用非线性调频激光器的ISAL成像过程中体现得尤为明显。为克服这一问题,本文提出了一种基于ISAL的含旋转部件目标成像及微多普勒特征提取方法,实现了对雷达回波信号在频率-慢时间2维谱图域上微多普勒曲线参数的快速提取,并完成对主体回波信号与旋转部件回波的分离以及对主体部分的2维成像。

参考文献

- [1] 郭亮, 邢孟道, 张龙, 等. 室内距离向合成孔径激光成像的实验研究[J]. 中国科学 E 辑, 2009, 39(10): 1678-1684.
- [2] Cao Chang-qing, Zeng Xiao-dong, Feng Zhe-jun, *et al.* Study on key techniques for synthetic aperture radar system[C]. Proc. of SPIE, 2008, 6829, DOI: 10.1117/12.746602.
- [3] Lucke L, Rickard L J, Bashkansky M, *et al.* Synthetic aperture radar: fundamental theory, design equations for a satellite system, and laboratory demonstration[R]. Washington: Naval Research Laboratory, 2002.
- [4] 邢孟道, 郭亮, 唐禹, 等. 合成孔径成像激光雷达实验系统设计[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 128-132.
Xing Meng-dao, Guo Liang, Tang Yu, *et al.* Design on the experiment optical system of synthetic aperture imaging radar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 290-294.
- [5] Karr J T, Glezen H J, and Lee E H. Phase & frequency stability for synthetic aperture radar[C]. Proc. of SPIE, 2007, 6712, DOI: 10.1117/12.729482.
- [6] 许楠, 刘立人, 鲁伟. 合成孔径激光成像雷达距离向等延时的信号处理结构和算法[J]. 电子学报, 2010, 38(6): 1405-1409.
Xu Nan, Liu Li-ren, and Lu Wei. Signal processing construction and algorithm of range equal delay in SAIL[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(6): 1405-1409.
- [7] 郭亮, 邢孟道, 梁毅, 等. 一种机载合成孔径成像激光雷达聚束模式成像算法[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1183-1190.
Guo Liang, Xing Meng-dao, Liang Yi, *et al.* Algorithm for airborne spotlight synthetic aperture imaging radar data processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6): 1183-1190.
- [8] 臧博, 张磊, 唐禹, 等. 逆合成孔径成像激光雷达低信噪比稀疏孔径成像方法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2808-2814.
Zang Bo, Zhang Lei, Tang Yu, *et al.* Study on sparse aperture of inverse synthetic aperture imaging radar with low SNR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 2808-2814.
- [9] 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.
Zhang Qun, Luo Ying, and He Jin. Review of the research on micro-Doppler effect of radar target[J]. *Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition)*, 2011, 12(2): 22-26.
- [10] Chen V C. Analysis of radar micro-Doppler signature with time-frequency transform [C]. Proc. Statistical Signal and Array Processing, Pocono Manor, PA, USA, 2000: 463-466.
- [11] Chen V C and Li F. Analysis of micro-Doppler signatures [J]. *IEEE Processings Radar, Sonar & Navigation*, 2003, 150(4): 271-276.
- [12] 李彦兵, 杜兰, 刘宏伟, 等. 基于微多普勒特征的地面目标分类[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2848-2853.
Li Yan-bing, Du Lan, Liu Hong-wei, *et al.* Ground targets classification based on micro-Doppler effect[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 2848-2853.
- [13] 罗迎, 张群, 封同安, 等. OFD-LFM MIMO 雷达中旋转目标微多普勒效应分析及三维微动特征提取[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(1): 8-13.
Luo Ying, Zhang Qun, Feng Tong-an, *et al.* Micro-Doppler effect analysis of rotating target and three-dimensional micro-motion feature extraction in OFD-LFM MIMO radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(1): 8-13.
- [14] Li J and Ling H. Application of adaptive chirplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating parts [J]. *IEEE Processings Radar, Sonar & Navigation*, 2003, 150(4): 284-291.
- [15] Zhang Q, Yeo T S, Tan H S, *et al.* Imaging 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.
- [16] Bashkansky M, Lucke L, Funk E, *et al.* Two dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Optic Letter*, 2002, 27(22): 1983-1985.
- [17] Steven M B and Jiseoph R B. Synthetic aperture imaging laser radar laboratory demonstration and signal processing[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(35): 7621-7629.
- [18] 刘国国, 吴谨, 朱炳祺, 等. 合成孔径激光雷达距离像分辨率非线性恶化与补偿[J]. 激光与红外, 2009, 39(9): 934-938.
Liu Guo-guo, Wu Jin, Zhu Bing-qi, *et al.* Nonlinear degradation and compensation on range resolution in synthetic aperture radar experiment[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(9): 934-938.
- [19] 罗迎, 池龙, 张群, 等. 用慢时间域积分法实现雷达目标微多普勒信息提取[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(8): 2055-2059.
Luo Ying, Chi Long, Zhang Qun, *et al.* Extraction of micro-Doppler information based on slow-time integration[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(8): 2055-2059.

何 劲: 男, 1984 年生, 工程师, 研究方向为雷达信号处理、雷达成像与计算机网络技术。
张 群: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理与雷达成像技术。
邓冬虎: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理与雷达成像技术。
李 松: 男, 1977 年生, 副教授, 研究方向为雷达信号处理与雷达成像技术。