

doi: 10.3788/gzxb20124105.0575

基于自适应窗的合成孔径激光雷达联合时频成像方法

吕旭光, 郝士琦, 冷蛟锋, 蔡晓春

(电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

摘要:传统距离-多普勒算法中观测期间多普勒频率为常量的假设在合成孔径激光雷达系统中不再成立. 根据合成孔径激光雷达回波信号模型, 推导计算了振动对合成孔径激光雷达回波相位的影响. 根据实际情况引入振动频率不超过 500 Hz、振幅不超过 0.2 mm 的机载平台微振动参量, 结果表明载机微振动对合成孔径激光雷达成像的方位分辨率影响很大, 而对距离分辨率影响不大. 采用时频分析成像方法, 能够有效克服传统距离-多普勒算法对时变信号处理的局限性. 分析比较 Wigner-Ville 分布、伪 Wigner-Ville 分布和平滑伪 Wigner-Ville 分布作为核函数的时频成像结果, 均无法兼顾成像分辨率和成像效率. 据此本文提出了一种基于自适应窗的联合时频成像方法, 根据变异系数和变异阈值的比较自适应地调整子区域窗口大小, 从而达到成像分辨率和算法效率的平衡优化. 仿真结果表明, 本算法对成像分辨率影响不大, 成像时间减少近 69.87%, 适用于合成孔径激光雷达对成像高分辨率和成像效率的要求.

关键词:合成孔径激光雷达; 激光成像; 自适应窗; 时频分析; 振动误差

中图分类号: O647.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)05-0575-6

0 引言

合成孔径激光雷达(Synthetic Aperture Ladar, SAL)是能够在远距离取得厘米量级分辨率的唯一的光学成像观察手段^[1-3]. 在 SAL 中, 发射信号采用激光, 激光的波长一般比微波波长短 3~5 个数量级. 对于相干雷达, 目标回波的相位对距离变化很敏感, 距离上半个波长的变化能引起相位 360° 的变化^[4], 因此相比于合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR), 平台的运动误差将对 SAL 造成更加严重的相位误差, 甚至微小的振动都将造成 SAL 图像分辨率的下降.

合成孔径成像的基本方法是距离-多普勒(Range-Doppler, RD)算法, 即利用宽带信号获得纵向距离的高分辨, 利用回波的多普勒带宽获得横向距离的高分辨^[5]. 传统的 RD 算法采用离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)作多普勒分析, 隐含了观测期间多普勒频率为常量的假设, 这类假设在平台作平稳飞行时可以满足. 在实际情况中不论是机载还是星载平台, 其平台内部的微振动都无法避免, 由于波长存在几个数量级的差异, SAR 系统中将微振动平台作平稳飞行的假设对于 SAL

系统不再满足, 如果仍然采用传统 RD 算法, 将会严重影响成像质量.

本文通过分析随机振动对 SAL 成像的影响, 发现对 SAL 成像的方位分辨率影响很大, 而对距离分辨率影响不大. 为此引入基于时频分析的成像方法, 在距离压缩中采用时频变换代替傅里叶变换, 能够有效克服随机振动对 SAL 成像的影响. 分析比较 Wigner-Ville 分布(Wigner-Ville Distribution, WVD)、伪 Wigner-Ville 分布(Pseudo WVD, PWVD)和平滑伪 Wigner-Ville 分布(Smoothed PWVD, SPWVD)三种时频成像结果, SPWVD 成像分辨率最高, 但其成像时间是 SAL 系统无法接受的, 而 PWVD 成像时间短, 但成像分辨率达不到 SAL 的精度要求, 针对 SPWVD 和 PWVD 的成像特点, 兼顾成像分辨率和成像时间的平衡优化, 本文提出了基于自适应窗的联合时频成像方法.

1 振动对 SAL 成像的影响分析

假设激光雷达是收发同置, 即发射和探测接收器是同一个孔径, 采用线性调频脉冲信号, 并通过光学外差探测方法提取回波中包含的目标信息. 解线调频后信号可表示为^[6]

基金项目:安徽省自然科学基金(No. 10040606Q61)资助

第一作者:吕旭光(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电信息处理技术. Email: ydksqh@163.com

责任作者/导师(通讯作者):郝士琦(1963-), 女, 教授, 主要研究方向为信号与信息处理. Email: liu_hsq@126.com

收稿日期: 2011-11-15; **修回日期:** 2012-01-04

$$s(\hat{t}, X_a) = C_0 \text{rect} \left[\frac{X_a}{L} \right] \cdot \text{rect} \left[\frac{\hat{t} - \frac{2}{c} R_i(t_m; R_0)}{T_p} \right] \exp [i\varphi(\hat{t}, X_a)] \quad (1)$$

式中 $C_0 = \frac{\eta_d q_e A_d \sigma}{h f_0}$, σ 为目标表面激光雷达散射截面, X_a 为 t_m 时刻激光雷达的方位位置, L 为合成孔径长度.

$$\varphi(\hat{t}, X_a) = -\frac{4\pi K}{c} \left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) R_{\Delta} - \frac{4\pi f_0 R_{\Delta}}{c} + \frac{4\pi K}{c^2} R_{\Delta}^2 \quad (2)$$

此时, $R_{\Delta} = R_i(t_m; R_0) - R_{\text{ref}}$, $R_i(t_m; R_0)$ 为 t_m 时刻激光雷达到某点目标的瞬时距离, R_{ref} 为信号解线调频的参考距离, 一般取 SAL 相位中心至目标场景中心的最短距离作为参考距离.

在 SAL 平台理想运动情况下采用 RD 算法对式(2)进行处理可获得图像; 如果平台运动是非理想状况, 则必须考虑振动引起的 R_{Δ} 的变化及其导致的相位误差对成像的影响.

在不考虑 SAL 平台速度变化的情况下, 假设振动发生在垂直于航线的法平面上, 振幅分别为 A_y 和 A_z , 两者具有同样频率 ω , 同时振动位移只有平动, 并且不考虑侧视角的变化.

如图 1 所示, 目标中心点为 P , SAL 理想位置

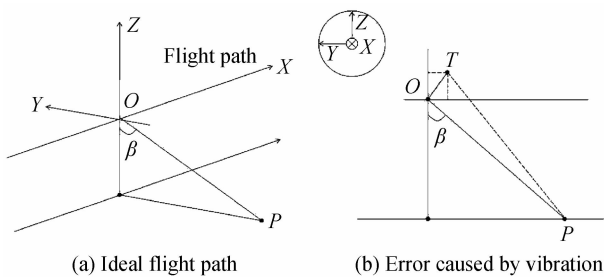


图 1 SAL 平台航迹的几何关系

Fig. 1 Geometry of track of SAL platform

为 O , 由于振动的影响, 真实位置为 T , 则

$$\begin{aligned} |OP| &= R_i(t_m; R_0) = L \\ |TP| - |OP| &= \left([L \sin \beta + A_y \sin(\omega t + \theta_1)]^2 + [L \cos \beta + A_z \sin(\omega t + \theta_2)]^2 \right)^{1/2} - L \approx \\ &A_y \sin(\omega t + \theta_1) \sin \beta + A_z \sin(\omega t + \theta_2) \cos \beta - \\ &\frac{[A_z^2 \sin^2(\omega t + \theta_2) - A_y^2 \sin^2(\omega t + \theta_1)] \cos(2\beta)}{2L} - \\ &\frac{A_y A_z \sin(2\beta) \sin(\omega t + \theta_1) \sin(\omega t + \theta_2)}{L} \quad (3) \end{aligned}$$

考虑到激光的波长非常短, 在近似时必须考察泰勒展开阶次是否足够多. 当振动满足军标 GJB150-86 的规定时, 认为最后一项的长度不及波长的数量级, 可以忽略, 因此, 式(3)可进一步近似

为^[7]

$$\begin{aligned} &A_y \sin(\omega t + \theta_1) \sin \beta + A_z \sin(\omega t + \theta_2) \cos \beta - \\ &\frac{[A_z^2 \sin^2(\omega t + \theta_2) - A_y^2 \sin^2(\omega t + \theta_1)] \cos(2\beta)}{2L} - \\ &\frac{A_y A_z \sin(2\beta) \sin(\omega t + \theta_1) \sin(\omega t + \theta_2)}{L} \approx \\ &A \sin(\omega t + \theta) \quad (4) \end{aligned}$$

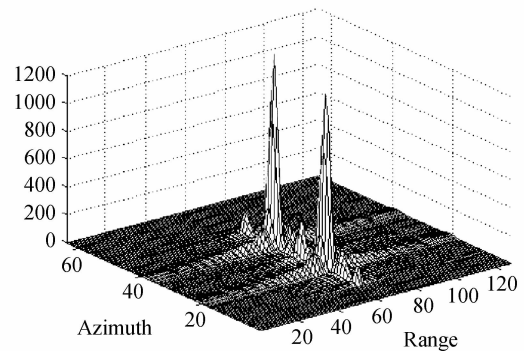
将式(4)带入式(2)得到

$$\begin{aligned} \varphi(\hat{t}, X_a) &= -\frac{4\pi K}{c} \left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) R_{\Delta} - \\ &\frac{4\pi f_0 R_{\Delta}}{c} + \frac{4\pi K}{c^2} R_{\Delta}^2 \quad (5a) \end{aligned}$$

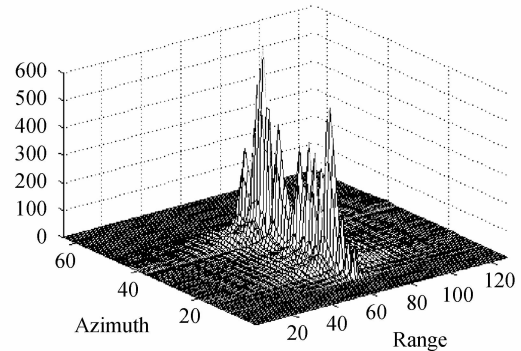
$$R_{\Delta} = R_i(t_m; R_0) + A \sin(\omega t + \theta) - R_{\text{ref}} \quad (5b)$$

式(5)就是受振动影响后的结果.

假设 SAL 工作于机载正侧视条带模式, 基本参量为: 载机飞行高度为 5 000 m, 飞行速度为 100 m/s; 激光发射孔径(直径)为 0.05 m, 激光器基准波长为 1.06 μm , 脉冲宽度为 10 μs , 调频带宽为 6 GHz, 对应的调频斜率为 6×10^{14} Hz/s; 雷达侧视角为 45°. 忽略大气对激光传播的影响. 对位于地面的两个理想点目标进行成像, 如图 2(a) 所示, 距离向和方位向坐标为采样点数, 在没有振动的情况下, 可以清晰地对点目标进行成像.



(a) Flying stable



(b) Flying with micro vibration

图 2 利用 RD 算法得到的理想点目标图像

Fig. 2 Ideal point target imaging used by RD method

振动由三个参量决定: 振幅、频率和初相位. 根据国家军用标准关于环境适应性的试验规定 (GJB150-86), 当设备安装有减震装置时, 最高试验

振动频率最大为 500 Hz. 当振幅为 0.2 mm, 频率为 500 Hz, 初相位为 90° 时, SAL 成像如图 2(b) 所示.

对比图 2 中两幅图像可以发现, 振动对距离压缩几乎没有影响, 这是因为振动频率(周期)与激光发射脉冲周期相差几个数量级, 在一个脉冲周期内, 振动项可认为基本不变, 因此距离压缩不存在干扰, 距离分辨率保持不变. 但在方位向中, 振动对 SAL 成像影响很明显, 方位分辨率严重下降.

2 时频分析与时频成像方法

振动平台与平稳平台的主要差别在于回波信号的中心频率和调频率不同. 随机振动平台 SAL 目标回波信号是一种复杂的时变信号, 联合时频分析方法是解决这一问题的有效工具.

2.1 时频分析

时频分析的基本思想是设计时间和频率的联合函数, 用它同时描述信号在不同时间和频率的能量密度或强度^[8].

1) WVD

WVD 是二次时频变换中最基本的一种, 它首先由 Winger 在 1932 年提出并应用在量子力学上, 后来由 Ville 应用在信号分析领域.

信号 $s(t)$ 的 WVD 定义为时间自相关函数的 Fourier 变换为

$$\text{WVD}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot \exp\{-j\omega\tau\} d\tau \quad (6)$$

WVD 避免了时间分辨率和频率分辨率相互牵制的矛盾, 它的时间-带宽积达到了 Heissenberg 测不准原理给出的下界, 具有理论上最高的分辨率^[8]. WVD 具有很高的时频聚集性, 可以更加准确地估计目标的瞬时频率和振动参量, 但对于多分量信号, 其 WVD 会在每两个独立分量间出现交叉项, 产生虚假信号.

2) PWVD

PWVD 是利用交叉项的高频振荡特性, 通过对 WVD 的平滑来实现对交叉项的消除, 最简单的方法是在时域加一个平滑的窗函数 $h(\tau)$, PWVD 定义为

$$\text{PWVD}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot \exp\{-j\omega\tau\} d\tau \quad (7)$$

3) SPWVD

为了消除频率方向的交叉项, 可采用窗函数 $g(u)$ 和 $h(\tau)$ 对时间和频率同时加以平滑, 这样改造得到的 WVD 称作 SPWVD, 表达式为

$$\text{SPWVD}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) \int_{-\infty}^{+\infty} g(u - \tau) \cdot s\left(u + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) du \exp\{-j\omega\tau\} d\tau \quad (8)$$

2.2 时频成像方法

针对随机微振动对 SAL 成像方位分辨率影响非常严重这一弱点, 采用基于时频分析的成像方法, 如图 3 所示.

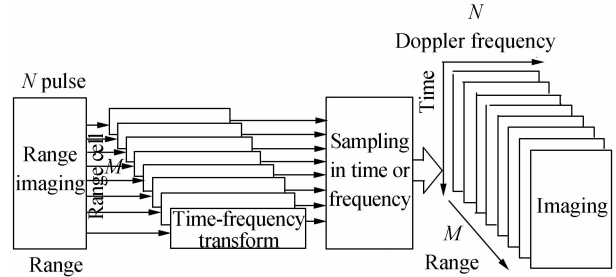


图 3 基于时频分析的成像算法

Fig. 3 Imaging algorithm based on time-frequency transform

由图 3 可知, 基于时频分析的成像算法在方位压缩中采用“时频变换+时域采样”取代传统 RD 算法中的傅里叶变换. 假设数据被组织成一个复数二维数组 $G(r_{m,n})$, 有 M 个时间序列, 每一个长度为 N (有 N 个脉冲), 基于傅里叶的成像算法只能从 $M \times N$ 的数据数组产生一帧图像. 基于时频分析的成像算法对每个时间历程序列都进行时频变换, 然后产生一个 $N \times N$ 的时间-多普勒分布. 在 M 个距离单元, 通过组成 M 个时间-多普勒分布, 可以得到 $N \times M \times N$ 大小的时间-距离-多普勒立方图 $Q(r_m, f_n, t_n)$

$$Q(r_m, f_n, t_n) = \text{TFT}_n\{G(r_{m,n})\} \quad (9)$$

式中, TFT_n 表示关于 n 的时频变换.

时频分析可以计算瞬时多普勒频移, 因此任意时刻由于平台随机微振动而导致的多普勒频移的随机变化量变成了固定值. 在采样时间 t_i , 只有一副 RD 图像 $Q(r_m, f_n, t_n = t_i)$ 可以从 $N \times M \times N$ 的时间-距离-多普勒立方图中提取出来. 这里总共有 N 帧图像, 每帧图像表示了某个时刻的距离-多普勒图像. 因此, 用时频变换代替傅里叶变换, 一个二维的 RD 图像变成了一个三维的 RD 立方图. 通过时间采样, 可以得到二维图像的时间串. 通过时频变换, 立方图中每个单独时间采样图像都提供了一帧高分辨率清晰图像.

采用上小节中 SAL 的工作模式和振动参量的设定, 分别使用 WVD、PWVD 和 SPWVD 作为核函数的时频成像方法对地面点目标进行仿真成像, 结果如图 4 所示.

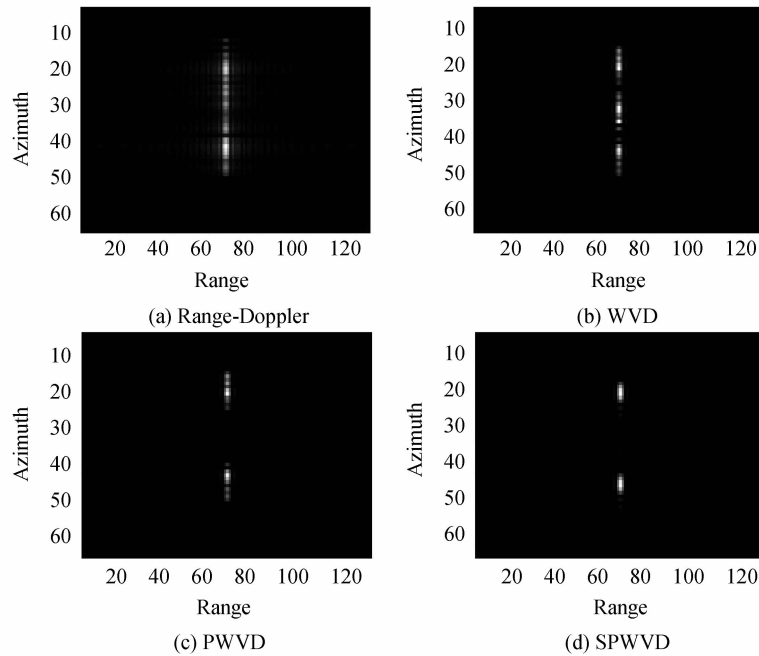


图4 利用时频成像方法得到的理想点目标的图像

Fig. 4 Ideal point target imaging used by time-frequency method

图4(b)是以WVD作为核函数的时频成像结果,其最亮点的分布最集中,这是因为WVD的时间-带宽积达到了Heisenberg测不准原理的下界,具有理论上最高的分辨率,但由于交叉项的产生,导致其分辨率下降非常严重,甚至容易出现误判的结果;图4(c)是以PWVD作为核函数的时频成像结果,在时域加平滑窗函数,对交叉项起到了一定的抑制作用,避免了严重的交叉项而导致的误判,但其频率域交叉项依然存在,方位分辨率依然受到很大影响;图4(d)是以SPWVD作为核函数的时频成像结果,在时域和频域同时加以平滑,有效避免了交叉项对成像分辨率的影响,可以清晰地对理想点目标进行成像.相比于WVD和PWVD,SPWVD的成像结果中最亮点的分布最“松散”,这是因为SPWVD在加窗平滑交叉项的同时也会对信号项起抹平作用,从而使信号的时频聚集性变差了,也就是说信号交叉项的抑制是以牺牲信号的时频聚集性为代价的,表1中SPWVD的成像分辨率0.03 m与理论成像分辨率0.025 m存在差距也是这个原因造成的,仿真实验与理论分析的结果是一致的.

表1 时频成像方法的分辨率和成像时间

Table 1 Resolution and imaging time used time-frequency method

Kernel	WVD	PWVD	SPWVD
Imaging resolution/m	0.078	0.062	0.031
Imaging time/s	1.156 3	1.390 6	6.953 1

表1给出了不同核函数的成像分辨率和成像时

间,采用SPWVD可以得到最高的成像分辨率,但其成像时间却比WVD和PWVD多出了几倍,而SAL系统由于高分辨率的特性将处理大量的回波数据,采用SPWVD作为核函数的时频成像所耗用的大量时间对于SAL成像是不能容忍的,针对这一弱点,本文在时频成像方法的基础上,提出了基于自适应窗的联合时频成像方法.

3 基于自适应窗的联合时频成像方法

根据上小节仿真实验结果,采用PWVD作为核函数的时频成像方法虽然由于频域交叉项没有得到抑制而分辨率不高,但其时域加窗平滑对交叉项起到了一定的抑制作用,避免了误判结果的出现,并且其成像时间远少于SPWVD.根据PWVD的上述特性,首先采用PWVD作为核函数进行时频成像得到初步结果;再对得到的初步粗分辨率成像结果进行区域描述,根据区域描述结果划分重点子区域;最后对重点子区域采用SPWVD成像方法进行处理,将得到的成像结果加载于初步结果中得到最终图像.

在对初步粗分辨率成像结果进行区域划分中,面临子区域窗口选择问题,如果子区域窗口过小,虽然算法效率较高,但会严重降低成像分辨率甚至造成重要信息缺失;如果子区域窗口过大,会影响算法效率.兼顾成像分辨率与算法效率,采用自适应滑动窗技术,根据区域描述结果选择与之相适应的重点子区域窗口大小,并根据子区域窗口大小选择核函数中平滑窗函数的阶数.

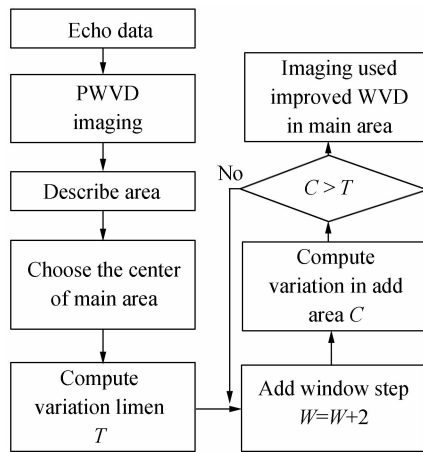


图5 基于自适应窗的联合时频成像流程

Fig. 5 Imaging flow used by combined time-frequency method based on adaptive windowing

根据 PWVD 成像分辨率设置初始窗口大小,计算初始窗口中图像变异阈值 T 为

$$T = D_{\max} - D_{\min} \quad (10)$$

式中, D_{\max} 为初始窗口中图像灰度的最大值, D_{\min} 为初始窗口中图像灰度的最小值, 变异阈值 T 即重点子区域中图像灰度的差异程度。

增加窗口阶数, 并计算增加区域变异系数 C 为

$$C = D_{\text{edge}} - D_{\text{newmin}} \quad (11)$$

式中, D_{edge} 为上一级区域中边缘的图像灰度值, D_{newmin} 为增加窗口中图像灰度的最小值, 变异系数 C 即增加窗口与上一级区域边缘的图像灰度差异程度。

比较变异系数 C 和变异阈值 T 的大小, 若 $C < T$, 则说明增加区域中存在对重点子区域成像有影响的信息, 继续增加窗口阶数; 若 $C > T$, 则说明增加区域变异较大, 对重点区域成像信息量很小, 确定此时窗口大小并根据窗口阶数选择改进 WVD 平滑窗函数阶数, 对当前重点子区域进行成像. 可见自适应窗技术的实质就是根据增加区域变异系数和变异阈值比较, 自适应调整子区域窗口大小, 从而达到成像分辨率和算法效率的平衡优化。

采用前小节中 SAL 的工作模式和振动参量的设定, 使用基于自适应窗的联合时频成像方法对地面点目标进行仿真成像, 结果如图 6 和表 2 所示。

根据图 6 和表 2, 采用基于自适应窗的联合时频成像方法的成像分辨率虽然由于部分信息的丢失而导致相比于 SPWVD 成像分辨率有所下降, 但其成像时间却比 SPWVD 成像方法减少 69.87%, 成像效率显著提高, 仿真结果验证了本文算法的有效性。

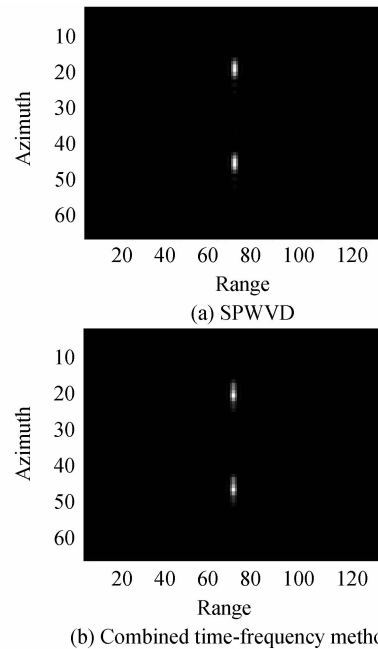


图6 基于自适应窗的联合时频成像结果

Fig. 6 Imaging used by combined time-frequency method based on adaptive windowing

表2 联合时频成像方法的分辨率和成像时间

Table 2 Resolution and imaging time used combined time-frequency method

Imaging method	SPWVD	Combined method
Imaging resolution/m	0.031	0.039
Imaging time/s	6.953 1	2.095 1

4 结论

运动是合成孔径成像的依据, 也是产生问题的根源. 运动补偿是研究合成孔径成像的一个重要问题. 由于波长的差异, SAR 系统中微振动平台作平稳飞行的假设在 SAL 系统中不再满足, 传统 RD 算法中观测期间多普勒频率为常量的假设也不再成立. 根据随机微振动对 SAL 成像的影响分析, 采用时频成像方法能够有效克服传统 RD 算法对由平台随机微振动而引起的时变信号处理的局限性. 分析比较 WVD、PWVD 和 SPWVD 三种时频成像结果, 本文所提出的基于自适应窗的联合时频成像方法能够达到成像分辨率和成像时间的最优平衡, 仿真实验结果表明, 在对分辨率影响不是很大的前提下, 成像时间能够减少 69.87%, 适用于 SAL 系统对成像高分辨率和成像效率的要求。

参考文献

- [1] LIU Li-ren. Synthetic aperture laser imaging radar (i): defocused and phase-biased telescope for reception antenna[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 997-1000.
刘立人. 孔径激光成像雷达(I): 离焦和相位偏置望远镜接收天线[J]. *光学学报*, 2008, 28(5): 997-1000.

- [2] LIU Li-ren. Synthetic aperture laser imaging radar (II): spatial phase biased telescope for transmitting antenna [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1197-1200.
刘立人. 合成孔径激光成像雷达 (II): 空间相位偏置发射望远镜[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1197-1200.
- [3] LIU Li-ren. Synthetic aperture laser imaging radar (III): circulated duplex telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1405-1410.
刘立人. 合成孔径激光成像雷达 (III): 双向环路发射接收望远镜[J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1405-1410.
- [4] CHEN V C, LING H. 雷达成像与信号分析时频变换[M]. 种劲松, 余颖, 译. 北京: 海洋出版社, 2008.
- [5] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [6] LI Jin-ming, HU Yi-hua, LI Jin-shan, *et al.* Vibration error analysis in satellite-to-satellite SAL imaging [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(5): 5-10.
李今明, 胡以华, 李今山, 等. 星对星 SAL 成像中的振动误差分析[J]. 光电工程, 2011, **38**(5): 5-10.
- [7] LI Zeng-ju, WU Jin, LIU Guo-guo, *et al.* Preliminary investigation on airborne sal imaging with platform vibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 994-1001.
李增局, 吴谨, 刘国国, 等. 振动影响机载合成孔径激光雷达成像初步研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 994-1001.
- [8] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [9] SUN Zeng-Guo, HAN Chong-Zhao. Combined despeckling algorithm of synthetic aperture radar images based on tegration classification, adaptive windowing and structure detection [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(5): 3210-3219.
孙增国, 韩崇昭. 基于区域分类、自适应滑动窗和结构检测的合成孔径雷达图像联合降斑算法[J]. 物理学报, 2010, **59**(5): 3210-3219.
- [10] 中国人民解放军总装备部 GB 150.16-86 国家军用标准-环境[S]. 国防科工委军标出版发行部, 1986.
- [11] ZANG Bo, GUO Rui, TANG Yu, *et al.* Real envelope imaging algorithm for inverse synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2152-2157.
臧博, 郭睿, 唐禹, 等. 逆合成孔径成像激光雷达实包络成像算法[J]. 光子学报, 2010, **39**(12): 2152-2157.
- [12] LIU Cong, LI Yan-jun, ZHANG Ke. Target and target shadow segmentation of synthetic aperture radar image based on the pseudo wigner distribution decomposition [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2257-2262.
刘聪, 李言俊, 张科. 基于伪魏格纳分布分解的合成孔径雷达图像目标与阴影分割[J]. 光子学报, 2010, **39**(12): 2257-2262.

Combined Time-frequency Imaging Method of SAL Based on Adaptive Windowing

LÜ Xu-guang, HAO Shi-qi, LENG Jiao-feng, CAI Xiao-chun

(*Electronic Engineering Institute State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China*)

Abstract: Range-Doppler algorithm (RDA) is a basic method in synthetic aperture imaging. In RDA, the Doppler frequency is considered as constant, but this hypothesis is not existed in synthetic aperture ladar (SAL). Based on the echo signal model of SAL, the influence of vibration error on the phase is computed and analyzed. On the reference of the national military standard for environment, in the condition of the frequency below 500 MHz and the amplitude below 0.2 mm, the simulation results show that the influence of vibration on the azimuth resolution is severity, but which on the range resolution is trivial. The imaging algorithm based on time-frequency analysis can overcome the limit of traditional RD algorithm effectively. Compared the imaging results used WVD, PWVD and SPWVD as kernel, they cannot suffice both the imaging resolution and imaging efficiency. A combined time-frequency imaging method based on adaptive windowing is presented to modulate the window size adaptively according to the comparison of variance coefficient and variance threshold, then the counterpoise optimize of imaging resolution and imaging efficiency is achieved. The simulation results show that the imaging resolution of this algorithm is constant, but the imaging time decreases 69.87%, and it can used in SAL for its high imaging resolution and imaging efficiency.

Key words: Synthetic Aperture Ladar (SAL); Ladar imaging; Adaptive windowing; Time-frequency analysis; Vibration error