

相位梯度自聚焦算法在合成孔径激光雷达中的应用与改进

张洁^{1,2} 王然¹ 张珂殊^{1,2}

¹中国科学院电子学研究所, 北京 100190

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 相位梯度自聚焦(PGA)算法广泛应用于合成孔径雷达的运动误差补偿。激光信号波长比微波信号小3~4个数量级,因而在合成孔径激光成像过程中,实验平台的振动会引入极大的相位误差,导致成图质量下降。在合成孔径激光雷达(SAL)成像过程中应用PGA算法,并针对激光波段信号的特点对传统的PGA算法在加窗方法上加以改进。实现了SAL样机在室外64 m成像距离下的快速合成孔径激光成像的实验验证,证明PGA算法能够实现散焦数据中相位误差的精确补偿,且改进后的PGA算法在达到同样补偿效果的前提下,迭代次数更少。

关键词 遥感; 合成孔径激光雷达; 相位梯度自聚焦; 成像算法; 高分辨率成像

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.062801

Application and Improvement of Phase Gradient Autofocus Algorithm in Synthetic Aperture Lidar

Zhang Jie^{1,2} Wang Ran¹ Zhang Keshu^{1,2}

¹*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract Phase gradient autofocus (PGA) algorithm can be used to estimate and correct phase errors effectively in echo signals of synthetic aperture lidar. The wavelength of laser is three to four magnitudes shorter than that of the microwave, so the vibration of experimental platform can bring great phase errors during the process of synthetic aperture lidar (SAL) imaging, which results in the reduction of imaging quality. To improve the image quality, a PGA algorithm with an improved method of windowing compared to the conventional PGA method is applied in SAL and is experimentally verified by an SAL demonstrator on a 64 m-distance-target to not only realize the accurate compensation to the phase errors in the defocusing data, but also have fewer iteration times and the same compensation effect.

Key words remote sensing; synthetic aperture lidar; phase gradient autofocus; imaging algorithm; high resolution imaging

OCIS codes 280.6730; 280.3640; 100.3005; 110.2990

1 引言

从20世纪开始,国内外科科研人员对合成孔径激光成像技术做了大量研究工作^[1-5]。成像实验从早期的一维合成孔径实验验证发展到现在,已经实现了动目标检测、三维成像和机载平台对地目标飞行成像等^[5-7]。

收稿日期: 2016-01-18; 收到修改稿日期: 2016-01-22; 网络出版日期: 2016-05-13

基金项目: 中国科学院电子学研究所创新前沿项目(Y3Z0150102)

作者简介: 张洁(1991—),男,硕士研究生,主要从事合成激光雷达信号处理算法方面的研究。

E-mail: 15510127330@163.com

导师简介: 张珂殊(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光探测技术、激光雷达等方面的研究。

E-mail: kszyang@mail.ie.ac.cn

成像模式也从早期的“一步一停”方式发展到现在能够实现类似合成孔径雷达(SAR)一样的高速合成孔径成像技术。合成孔径激光雷达(SAL)工作波长比 SAR 小 3~4 个数量级^[5],因此合成孔径时间也相对较短,但同时也造成了 SAL 对成像环境稳定性极为敏感,由实验平台振动产生的相位误差会严重影响成像质量。由于在工作机制上 SAL 与 SAR 具有相似性,因此在 SAL 成像过程中渐渐引入了 SAR 的信号处理算法,本文也将利用在 SAR 成像中广泛应用的相位梯度自聚焦算法(PGA 算法)来解决相位误差问题。

相位梯度自聚焦算法是一种基于非模型的相位矫正算法,能够有效地补偿任意阶相位误差,具有良好的稳健性,在 SAR 领域应用广泛^[8]。最初针对聚焦式 SAR 提出了相位梯度自聚焦算法^[3],而本文所提到的 SAL 平台采用一种类似于条带模式 SAR 的工作机制,平台相对于目标持续运动且运动速度非恒定。在信号处理过程中,可将其等效为聚束模式,以有效利用 PGA 算法进行相位补偿。此外,由于激光信号与微波信号的差异性,本文针对传统 PGA 算法的加窗问题加以改进,以提高 SAL 成像过程的效率。

2 合成孔径激光成像关键问题

因为激光信号比微波信号波长短几个数量级,信号对平台的不稳定性极为敏感,任何随机的平台振动或预料不到的因素都有可能产生相位误差,从而使得图像散焦且难以辨认^[9]。

回波信号中引入的相位误差主要来自于实验平台振动以及实验环境对于回波路径的影响。例如:实验设备中大量采用了铝制材料,温度每升高 1 °C,热胀冷缩效应会使光纤中的激光传输路径延长大约十分之一^[10]。与 SAR 相比,采用外差探测方式的合成孔径激光雷达对于实验平台和目标之间路径距离的变化更为敏感。因此,引入相位误差的原因比 SAR 系统更加繁多且产生的误差值也远大于传统的微波成像系统。以下为几种主要的相位误差。

2.1 活塞误差

活塞误差是 SAL 成像过程中相位误差的最主要来源。在距离向上,当实验平台沿方位向持续运动时,接收孔径的位置会产生数十微米的波动,在距离向上类似于活塞运动。对于 1.5 μm 的波长来说,活塞误差能够达到几百弧度量级。一个被广为认可的收敛条件是,当相位误差大于 1/10 时就会对图像产生影响。由此可见,活塞误差会造成图像严重散焦。此外,活塞误差在同一脉冲下的不同距离单元是一个常量,其只与脉冲本身有关,与距离向无关。

2.2 光纤抖动误差

光学系统中各个部件之间需要使用大量光纤连接,然而所有的光纤很难同时完全固定在光学系统中。因此,在实验平台运动时,难免存在光纤的抖动,导致回波路径发生变化,从而引入额外的相位误差。尽管光纤抖动造成的路径变化很小,但足以影响最终的成像质量。

2.3 热分布不均误差

当激光信号通过光纤传输时会产生一定的热量,在光纤的不同位置热量的分布也会不同,光纤的反射系数随着温度的变化而变化,导致传输路径发生改变。另一方面,温度的升高会导致光纤长度的延展,如前文所述,不同的回波路径意味着不同的相位信息,热分布不均匀同样对回波数据造成影响。

2.4 大气湍流误差

在远距离探测时,激光信号会在大气中走过相当长距离的一段路径,因此也难免受到大气环境中种种因素的影响。这些因素主要分为两类:1) 混浊效应,它与大气的非理想透明度相关,吸收和散射是影响较为显著的两个方面;2) 湍流效应,大气运动以及热交换会影响空气对激光传输的折射率^[11]。这两类因素中湍流效应对 SAL 成像的影响更为显著。

相对于大气整体运动而言,大气分子的不规则运动导致了大气湍流的出现。这会导致大气密度变化,从而影响到激光在空气中传输的折射率。因为大气分子的运动无规律,大气折射率在不同区域也会不同。这直接导致合成孔径激光雷达的激光束强度和相位出现波动,此外还会存在光束非理想展开以及漂移等^[12]。

3 相位梯度自聚焦算法实现与改进

在 SAL 实验中,相位补偿之前的信号往往包含有远大于 2π 的相位噪声,这是因为在相邻的几个脉冲之间,实验平台的抖动幅度往往会超过工作波长^[13]。只有当去除各种因素对信号相位的影响之后,有效的信息才能被提取出来。而 PGA 算法的工作原理就是通过将散焦图像中的相位误差梯度估计出来,并对其相位信息加以矫正,从而提取出回波数据中目标的相位信息。PGA 算法有 4 个主要步骤,分别是循环移位、加窗、相位梯度估计、迭代补偿。SAL 系统中传统 PGA 算法的具体流程如图 1 所示。

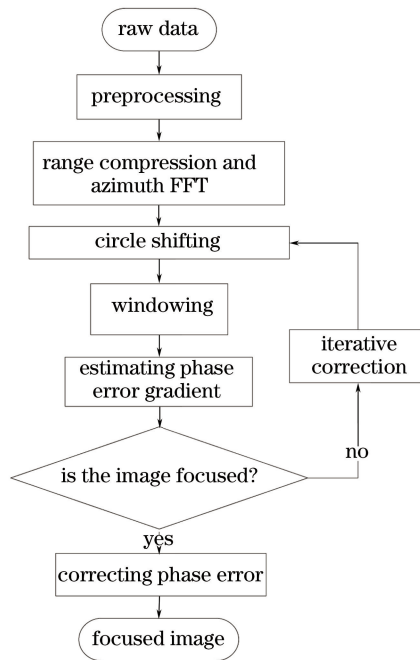


图 1 PGA 算法流程图

Fig. 1 Flow diagram of PGA algorithm

3.1 循环移位

PGA 算法的第一步是循环移位。其基本概念就是在图像域中选出每个距离门的强散射点,然后将强点循环移位到距离门的中心。通过选取孤立的强散射点,从而达到高信噪比,以确保相位梯度估计的准确性。然而,如果成像目标包含大量面目标或者图像域数据严重散焦,孤立的强散射点就很难找到,也就很难有效地估计出相位梯度。因此,高质量相位梯度自聚焦(QPGA)算法提出了基于对比度的强点选取方法,有效弥补了传统 PGA 算法的不足,能够可靠地滤除强杂波对于目标回波的影响^[14-17]。本文中提供的实验数据是针对理想点目标(角反射器)的回波信号,不存在多强点,因此,传统 PGA 算法的强散射点选取方式已能够满足,此后经过改进的加窗操作,依然能够得到理想的效果。

3.2 加窗

加窗的目的是保留强散射点全部信息的同时去除噪声杂波的影响。因此,选取一个合适的窗宽尤为重要,这不仅能够有效提高信噪比,也会减少计算资源开支。加窗操作对于 PGA 算法至关重要,如果窗宽过小,加窗区域将无法包含全部有效信息,对后面的相位估计不利。相反,如果窗宽过大,则加窗区域信噪比会降低,导致相位估计的准确度下降,迭代次数增加,工作量增加。传统 PGA 算法中主要的加窗方式有两类:1) 每次迭代时,加窗长度依次递减固定长度或缩小固定比例,直到窗宽小于阈值或者图像完全收敛;2) 每次加窗选取 -15 dB 窗宽,并对其按一定比例展宽^[18]。

为了使计算更加快捷,减少计算迭代次数,本文采用的 PGA 算法对加窗操作进行了改进。首先,在图像域数据中选定有目标回波的部分作为相位梯度估计的有效片段,计算出特显点能量 E ;其次在不存在目标回波的距离单元选取一段数据作为噪声信号,计算出噪声能量的均值 E_n 。当能量从 E 下降到 E_n 时,取两个能量为 E_n 点的长度为窗宽。实验证明,这样选取的窗宽比传统方法更准确,且不会影响最后成像结果。

如图 2 所示, w_1 是选 -15 dB 宽度作为加窗长度, w_2 是改进后的加窗长度。

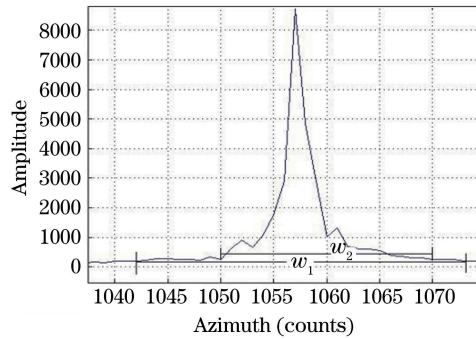


图 2 加窗方法改进前后窗宽对比图

Fig. 2 Comparison diagram of windowing before and after improvement

3.3 相位梯度估计

距离向脉冲压缩之后的信号表达式为

$$g_n(m) = |g_n(m)| \exp\{j[\varphi(m) + \theta_n(m)]\}, \quad (1)$$

式中 m 为距离向时间变量, $g_n(m)$ 是幅度, θ_n 是相位信息, $\varphi(m)$ 是引入的相位误差。PGA 算法是建立在同一脉冲所含相位误差相等的假设条件下, 因此 $\varphi(m)$ 与距离门序号 n 并不相关。

Echiel 等证明了相位误差梯度的线性无偏差最小方差估计(LUMV)可表示为

$$\hat{\varphi}_{\text{LUMV}} = \frac{\sum_{n=a}^N \text{Im}[g_n^*(m) \cdot g_n(m)]}{\sum_{n=1}^N |g_n(m)|^2} = \varphi(m) + \frac{\sum_{n=1}^N |g_n(m)|^2 \cdot \hat{\theta}_n(m)}{\sum_{n=1}^N |g_n(m)|^2}, \quad (2)$$

式中 N 是一个脉冲所含距离单元个数, Im 代表信号虚部, $*$ 表示取共轭, $\hat{\theta}_n(m)$ 是相位梯度。因此, 当相位梯度估计出来之后将其累加, 就会得到相位误差信息。随着不断地迭代补偿, 所估计出来的相位误差也会变小, 最终达到收敛条件, 得到聚焦图像。但是, LUMV 只有在高信噪比(SNR)条件下才有效可行, 而大多数的实验场景都达不到高 SNR 标准, 所以必须通过增加迭代次数来弥补估计偏差。

Jakowatz 等计算出最大相位梯度的最大似然(ML)估计表达式, 并证明其估计方差达到克拉美罗下限, 相对于 LUMV 更加稳健。ML 估计可表示为

$$\Delta\varphi_{\text{ML}} = \arg\left[\sum_{n=1}^N g_n^*(m) \cdot g_n(m+1)\right], \quad (3)$$

式中 φ 为相位梯度。散焦图像需要补偿的相位误差信息能够通过叠加相位历史域的信号相位误差得到, 即

$$\Delta\varphi_{\text{ML}}(m) = \sum_{l=2}^m \Delta\varphi_{\text{ML}}(l). \quad (4)$$

3.4 迭代补偿

通过以上几个步骤已经能够估计出相位误差信息, 对脉压数据在相位历史域乘以 $\exp[-j \cdot \varphi_{\text{ML}}(m)]$ 就能够对相位误差进行补偿。对于微波成像来说, 为了得到聚焦的图像需要迭代执行以上 4 个步骤, 直到消除多普勒频偏。

对于合成孔径激光雷达, 洛克希德马丁公司提出了 Single Pass PGA^[2] 算法, 即 PGA 算法能够一次性准确估计出相位误差, 并校正图像, 无需循环迭代。这对于传统 SAR 来说, 几乎很难实现。

4 实验结果及性能分析

4.1 实验设计

原理样机工作波长为 1550 nm, 带宽为 3 GHz。实验平台的移动通过实验人员手拉方式完成, 因此, 系统在方位向作非匀速运动。由于受到 SAL 发散角、距离向分辨率及实验场地限制, SAL 与目标间距离设计

为 64 m, 目标处激光光斑直径为 38 mm。单频激光器输出激光经过声光调制器 AOM 脉冲调制, 实现重复频率为 100 kHz, 脉冲宽度为 360 ns, 平均功率为 5 mW 的脉冲激光输出。通过同相正交 I/Q 解调后观察到的激光脉冲信号波形和 I/Q 解调信号的李萨如图形如图 3 所示。通过电光相位调制系统可以将宽带 M 码信号完好地加载至单频激光脉冲中, 并且获得正交的 I/Q 解调信号。

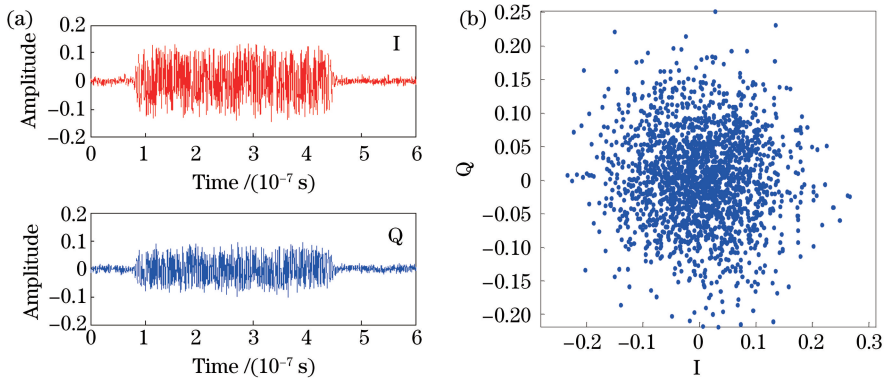


图 3 SAL 编码调制结果。(a) I/Q 解调后的正交信号; (b) I/Q 解调信号李萨如图

Fig. 3 Pulse-modulated signal of SAL. (a) Demodulated signal I/Q; (2) Lissajous figure of demodulated signal I/Q

成像目标为三个角反射器, 位置关系如图 4(a) 所示, 距离向最大间隔为 10 cm, 方位向最大间隔为 1 cm, 其中最右边的角反射器前加置了一光栅使其达到一较弱的反射系数, 目的是验证接收系统的稳健性。SAL 原理样机以大约 0.5 m/s (估算) 的速度在滑轨上移动。光束从固定角度发射并扫过所有成像目标, 工作模式类似于条带式 SAR (图 4)。

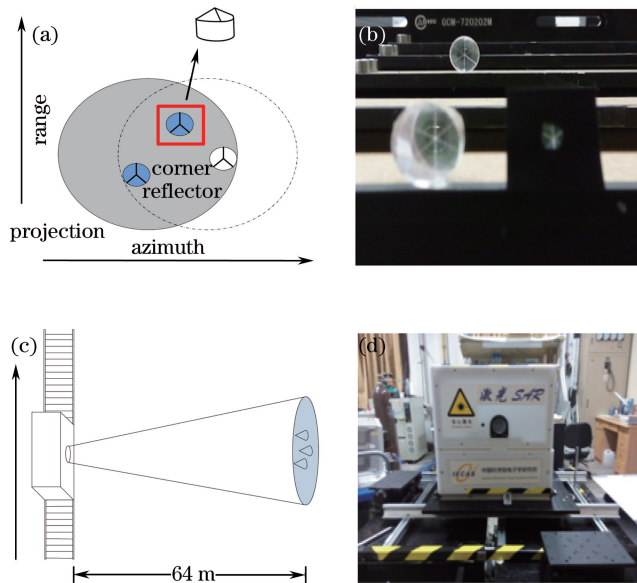


图 4 目标场景及工作体制。(a)、(b) 目标场景; (c) SAL 样机工作体制示意图; (d) SAL 样机

Fig. 4 Targets scene and scheme of working system. (a) and (b) Targets scene; (c) scheme of SAL working system; (d) prototype SAL

4.2 实验结果

回波数据采用 4 GHz 采样频率, 截取光斑同时照射所有目标的回波数据, 由于合成孔径时间很短, 可等效为聚束模式工作体制。这样就免去了类似条带 SAR 的图像分割和拼接问题。系统采用匹配滤波实现距离向脉冲压缩, 压缩过程分别使用参考信号与回波信号进行匹配滤波, 结果如图 5 所示, 从图中可发现有三个距离单元 (bin) 都存在回波信号, 其中加光栅的角反射器回波明显弱于其他角反射器。如不采用相位矫正算法, 图像会散焦 (图 6), 方位向严重展宽, 根本无法反映出有效信息。

图 7 是 PGA 算法对散焦图像校正前后的效果对比图。相对于散焦图像,展宽信号能量明显收敛。因此,PGA 算法在合成孔径激光成像的信号处理过程中是有效可行的。

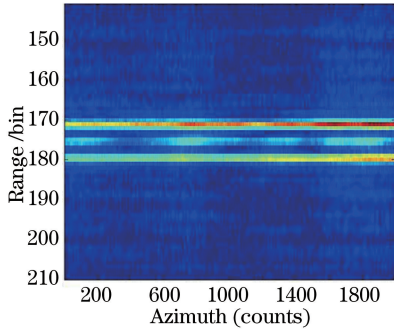


图 5 距离向脉冲压缩后图像

Fig. 5 Image after range compression

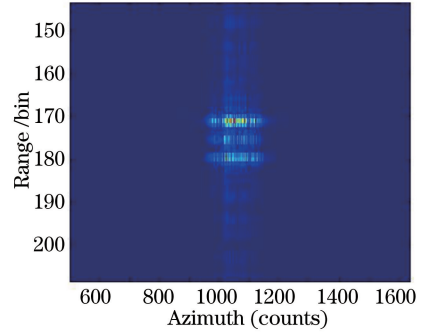


图 6 散焦图像

Fig. 6 Unfocused image

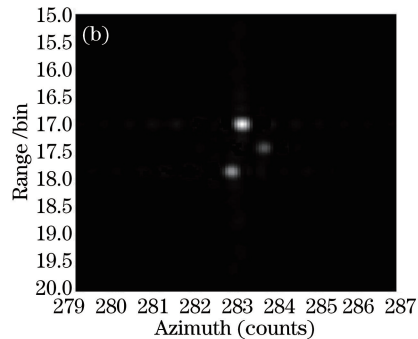
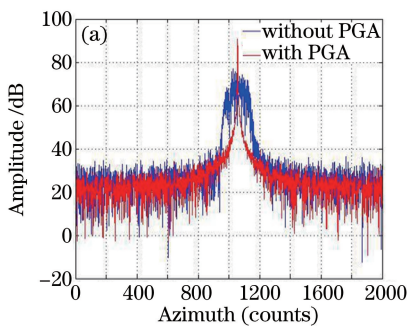


图 7 PGA 算法补偿后的效果图。(a) PGA 算法补偿前后切面对比;(b) PGA 算法补偿后的聚焦图像

Fig. 7 Comparison before and after correction by PGA algorithm. (a) Comparison before and after correction in one range bin; (b) focused image after correction by PGA algorithm

为验证 PGA 算法对于相位误差估计的准确度,选取作用域内某一距离单元,将补偿前的信号相位信息线性拟合,得到数据中真实的相位误差,并将其与估计出的相位误差信息对比,如图 8 所示。可见,估算误差与真实误差的差值范围在 0.0078 rad 以内,远小于 $\pi/10$ 的收敛条件^[19],因此,PGA 算法对相位误差补偿准确度较高。

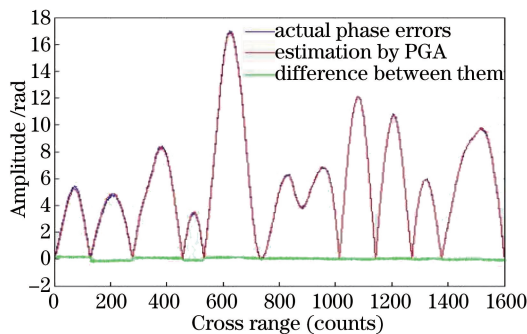


图 8 PGA 算法估计的相位误差与真实误差对比图

Fig. 8 Comparison between phase error estimated by PGA algorithm and real error

4.3 改进效果对比

实验中所采取的 PGA 算法,在加窗方法上加以改进,为验证改进效果,将其与传统 PGA 算法加以对比。实验数据采用同一组角反射器回波目标,传统 PGA 算法采用两种加窗方法:1) 每次迭代加窗宽度缩小 50%;2) 每次迭代选取 -15 dB 信噪比宽度作为加窗宽度。对比结果如图 9 所示(8 倍插值后效果)。

由图 9 可以看出,在 SAL 原理样机实验中,改进后的加窗方法相对于传统的 PGA 算法来讲更加高效准确,能够有效降低迭代次数,缩减计算开支,因此证明了改进方法达到理想效果。此外,实验分别对英文字母

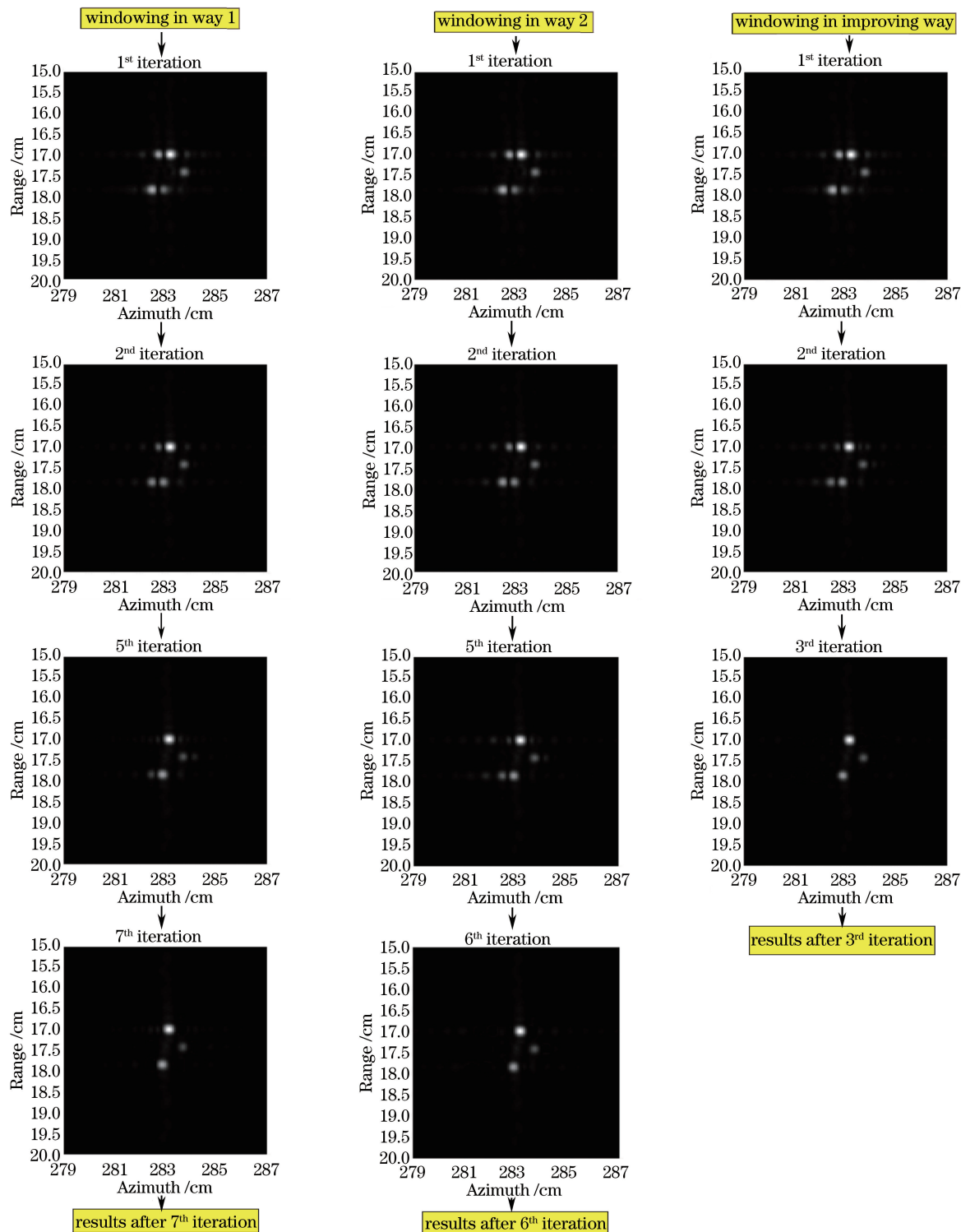


图9 三种不同加窗方式的PGA算法效果对比图

Fig. 9 Comparison among three different windowing methods

“I”“L”“C”“E”“S”进行了成像,尺寸为320 mm(距离向) \times 20 mm(方位向),单字母成像时间约为10 ms。成像目标激光覆盖幅宽约360 mm(距离向) \times 38 mm(方位向)。PGA成像结果如图10所示。

5 结 论

从实验结果可见,PGA算法对于合成孔径激光雷达成像中的相位补偿效果显著,经过改进后的加窗方

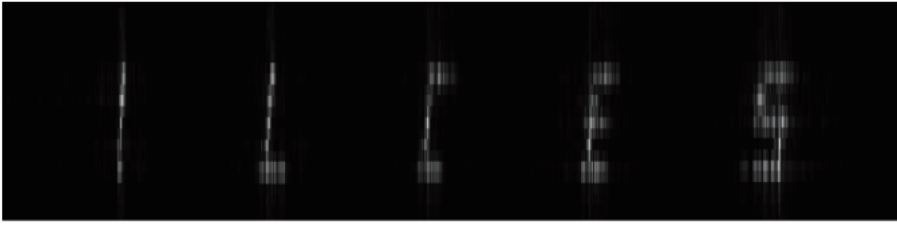


图 10 字母目标成像结果

Fig. 10 Imaging results to targets of letters

法被证实能够更加快捷高效地划定作用域,从而简化整个信号处理过程。此外,SAL 原理样机能够在运动速度不均匀条件下实现优于厘米量级的图像分辨率。如果对实验场景进一步优化,提高技术指标,将能够达到更加良好的成像效果以及更高的分辨率。由于采用合成孔径体制,SAL 的成像分辨率并不会随着距离的增加而降低。此外,激光信号的微米量级波长能在极短的合成孔径时间下实现高分辨率^[20-21]。因此,SAL 在超高分辨率探测领域具有巨大的潜力和发展前景。

参 考 文 献

- 1 Crouch S, Barber Zeb W. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture radar techniques [J]. *Opt Express*, 2012, 20(22): 24237-24246.
- 2 Phillip Gatt, Don Jacob, Bert Bradford, *et al.*. Performance bounds of the phase gradient autofocus algorithm for synthetic aperture radar[C]. *SPIE*, 2009, 7323: 73230P.
- 3 Wahl D E, Eichel P H, Ghiglia D C, *et al.*. Phase gradient autofocus-a robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. *IEEE Trans Aerospace & Elec System*, 1994, 30(3): 827-835.
- 4 Buck J R, Krause B W, Malm A I R, *et al.*. Synthetic aperture imaging at optical wavelengths[C]. *2009 Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2009: 1-2.
- 5 Wu Jin. On the development of synthetic aperture radar imaging[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(4): 353-360.
吴 谨. 关于合成孔径激光雷达成像研究[J]. *雷达学报*, 2012, 1(4): 353-360.
- 6 Beck S M, Buck J R, Buell W F, *et al.*. Synthetic-aperture imaging laser radar: Laboratory demonstration and signal processing[J]. *Appl Opt*, 2005, 44(35): 7621-7629.
- 7 Brian Krause, Joseph Buck, Christopher Ryan, *et al.*. Synthetic aperture radar flight demonstration[C]. *CLEO: 2011-Laser Applications to Photonic Applications*, 2011: PDPB7.
- 8 Casey Pellizzari, Mark Spencer, Nicholas Steinhoff, *et al.*. Inverse synthetic aperture radar: A high-fidelity modeling and simulation tool[C]. *SPIE*, 2013, 8877: 88770B.
- 9 Berizzi F, Corsini G. Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization[J]. *IEEE Trans Aerospace & Elec Systems*, 1996, 32(3): 1185-1191.
- 10 Roddier F, Northcott M J, Graves J E. One-dimensional spectra of turbulence-induced Zernike aberrations: Time-delay and isoplanicity error in partial adaptive compensation[J]. *J Opt Soc Am*, 1993, 10(5): 957-965.
- 11 P H Eichel, C V Jakowatz. Phase-gradient algorithm as an optimal estimator of the phase derivative[J]. *Opt Lett*, 1989, 14(20): 1101-1103.
- 12 Campbell B F, Rubin L, Holmes R B. Synthetic-aperture imaging through an aberrating medium: Experimental demonstration[J]. *Appl Opt*, 1995, 34(26): 5932-5937.
- 13 Chan H L, Yeo T S. Noniterative quality phase-gradient autofocus (QPGA) algorithm for spotlight SAR imagery[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1531-1539.
- 14 Karr T J. Signal-to-noise ratio of coherent imaging radar[C]. *SPIE*, 2007, 6712: 671203.
- 15 Xu Qian, Zhou Yu, Sun Jianfeng. Influence of space-time speckle effect on the image quality in a synthetic aperture imaging radar[J]. *Opt Commun*, 2014, 333: 265-273.
- 16 Zhu L, Sun J F, Zhou Y. Downlooking synthetic aperture imaging radar demonstrator and its experiments over 1.2 km outdoor[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(11): 111101.
- 17 Barber Zeb W, Dahl Jason R. Synthetic aperture radar imaging demonstrations and information at very low return levels

- [J]. Appl Opt, 2014, 53(24): 5531-5537.
- 18 Zhao Z L, Wu J, Su Y Y. Three-dimensional imaging interferometric synthetic aperture radar[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(9): 091101.
- 19 Liu Liren. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations [J]. Appl Opt, 2013, 52(4): 579-599.
- 20 Guo L, Xing M D, Zhang L, *et al.*. Research on indoor experimentation of range SAL imaging system[J]. Science in China (Series E: Technological Sciences), 2009, 52(10): 3098-3104.
- 21 Meta A, Hoogeboom P. Signal processing algorithms for FMCW moving target indicator synthetic aperture radar[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005, 1: 316-319.