

# 机载合成孔径激光雷达全孔径成像算法

尹红飞<sup>1</sup>, 郭亮<sup>1,2\*</sup>, 杨利超<sup>3</sup>, 孙光才<sup>3</sup>, 邢孟道<sup>3</sup>, 曾晓东<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

<sup>2</sup>国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;

<sup>3</sup>西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071

**摘要** 合成孔径激光雷达(SAL)是合成孔径与激光雷达的结合体。由于 SAL 的工作波长较短,可以在短时间内实现高分辨率成像,近年来发展较快。但短波长也会带来其他问题,对于机载 SAL,其波长比载机振动幅度小 1~2 个数量级,所以载机的振动会给回波带来较大的相位误差,传统的惯导系统很难达到激光波长级的定位精度,需要进行基于数据的自聚焦才能实现 SAL 成像。针对这一问题,提出一种利用最小熵自聚焦(MEA)和 deramp 结合的全孔径成像算法,并利用该算法对 SAL 实测数据进行了成像处理,成像结果证明了该算法的有效性。

**关键词** 遥感; 合成孔径激光雷达; 全孔径成像; 最小熵自聚焦; 相位补偿

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0928002

## Full Aperture Imaging Algorithm of Airborne Synthetic Aperture Ladar

Yin Hongfei<sup>1</sup>, Guo Liang<sup>1,2\*</sup>, Yang Lichao<sup>3</sup>, Sun Guangcai<sup>3</sup>,  
Xing Mengdao<sup>3</sup>, Zeng Xiaodong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology,  
Hefei, Anhui 230037, China;

<sup>3</sup> National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

**Abstract** Synthetic aperture ladar (SAL) is a combination of synthetic aperture and ladar, which has developed rapidly in recent years. Since the wavelength of the SAL is short, high-resolution imaging can be achieved in a short period of time. However, short wavelength also brings other problems. For airborne SAL, the wavelength is less than the vibration amplitude of the airplane by 1-2 order of magnitude, and the vibration of the airplane results in a great phase error to the echo. It is difficult for the inertial navigation system (INS) to achieve the positioning accuracy at the laser wavelength level, so the data-based self-focusing is necessary in SAL imaging. In this paper, a full aperture imaging algorithm based on minimum entropy autofocus (MEA) and deramp is proposed to process the SAL real data. The imaging results verify the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words** remote sensing; synthetic aperture ladar; full-aperture imaging; minimum entropy self-focusing; phase compensation

**OCIS codes** 280.6730; 280.3640; 150.1135

## 1 引 言

合成孔径激光雷达(SAL)是一种工作在激光波段的合成孔径成像技术,近年来发展较快<sup>[1-4]</sup>,其工作波长比合成孔径雷达(SAR)小 4~5 个数量级。而在合成孔径技术中,方位向分辨率与波长成正比,

因此,SAL 较 SAR 可以在更短的积累时间内实现高分辨率成像。

近年来,国内外 SAL 发展较快,已完成多次室内及机载实验,其中最早实现的是室内 SAL 成像。2002 年,Naval Research Laboratory 用 1.55  $\mu\text{m}$  的激光对 30 cm 处的动目标进行成像,得到了第一幅

收稿日期: 2019-03-28; 修回日期: 2019-05-09; 录用日期: 2019-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(61107006,61303035,61471283,61475122)、陕西省自然科学基金(2017JQ6021)、脉冲功率激光技术国家重点实验室开放研究基金(SKL2018KF06)

\* E-mail: lguo@mail.xidian.edu.cn

室内逆合成孔径激光雷达 (ISAL) 的二维图像<sup>[5]</sup>; 2005 年, Aerospace Corporation 用  $1.5 \mu\text{m}$  的激光对 2 m 处的固定散射体目标实现了室内 SAL 成像, 得到了第一幅真实意义上的室内 SAL 图像<sup>[6]</sup>; 2012 年, 美国蒙大拿州立大学光谱实验室与物理系采用 1550 nm 的调频激光, 首次演示了 1.4 m 距离处蜻蜓标本目标的聚束模式 SAL 成像<sup>[7]</sup>。国内对 SAL 的研究起步较晚, 2009 年, 西安电子科技大学和中国科学院上海光学精密机械研究所 (中科院上海光机所) 分别独立地实现了 SAL 的室内二维成像实验<sup>[8-9]</sup>。此后, 中科院上海光机所和中国科学院电子学研究所也进行了多次室内 SAL 实验, 分别实现了 SAL 的大口径成像、滑动聚束模式成像和差分 SAL 成像<sup>[10-15]</sup>。对于机载 SAL, 2007 年, 美国 Raytheon 公司和 Northrop Grumman 公司分别采用不同的激光波长成功地演示了机载 SAL 高分辨率技术<sup>[16]</sup>; 2011 年, 美国 Lockheed Martin 公司也开展了机载 SAL 实验, 得到方位向 3.3 cm 的分辨率, 并公开发表了机载 SAL 图像<sup>[17]</sup>; 2017 年, 中科院上海光机所搭建并完成了机载直视 SAL 成像, 获得了高质量大视场图像; 同年, 中国科学院电子学研究所也完成了机载 SAL 外场实验<sup>[18-19]</sup>。

由于 SAL 工作波长较短, 对于机载 SAL, 其波长比载机振动幅度小 1~2 个数量级, 在数据采集过程中会引入较大的相位误差, 而传统的惯导系统很难达到激光波长级的定位精度, 因此, 需要用自聚焦算法补偿该运动误差<sup>[20-22]</sup>, 才能使 SAL 图像不发生散焦。在机载 SAL 成像中, 比较典型的成像算法是子孔径拼接加相位梯度自聚焦 (PGA)<sup>[17,19]</sup>。划分子孔径的目的是降低载机振动频率, 便于 PGA 误差估计, 但是由于子孔径成像的数据利用率低, 使得图像信噪比和分辨率较差。

针对这一问题, 本文提出一种全孔径自聚焦成像算法, 利用最小熵自聚焦 (MEA) 和 deramp 结合的方法实现 SAL 成像, 提高数据的利用率。最后, 机载 SAL 实测数据的成像结果验证了该算法的有效性。通过对比子孔径算法得到的 SAL 图像和全孔径算法得到的 SAL 图像可知, 全孔径成像算法具有更高的分辨率和信噪比。

## 2 SAL 成像几何与全孔径成像算法

图 1(a) 为 SAL 成像几何, 飞机沿  $x$  轴飞行,  $R$  为目标到载机的最近距离;  $R_t$  为目标到载机的瞬时斜距, 为时变量;  $\theta$  为载机与目标的瞬时夹角, 也为时变量。

根据成像几何, 可以得到目标到雷达的瞬时斜距为

$$R_t = \sqrt{R^2 + v^2 t_m^2}, \quad (1)$$

式中:  $v$  为载机飞行速度;  $t_m$  为方位向慢时间。

图 1(b) 和 (c) 为 SAL 回波信号的方位向相位和多普勒图。在 0 时刻, 载机与目标具有最小距离, 从距离变化计算出相位变化, 相位变化近似呈抛物线型, 以最小斜距作参考距离, 如图 1(b) 所示。

斜距对慢时间  $t_m$  求导得到瞬时多普勒为

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \frac{dR_t}{dt_m} = \frac{2v}{\lambda} \sin \theta, \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为波长,  $dR_t/dt_m$  为对  $R_t$  求导。如图 1(c) 所示, 这时的多普勒近似为线性变化, 图中画出了水平线上多个点目标回波的多普勒变化图, 它们均近似为线性调频信号, 只是时间上有平移。下面对全孔径成像算法进行说明。

自聚焦处理的信号一般是经距离脉压而未经方位脉压的信号。由于 SAL 用解线频调 (dechirp) 的方法采集回波信号, 所以对回波信号沿距离向作傅

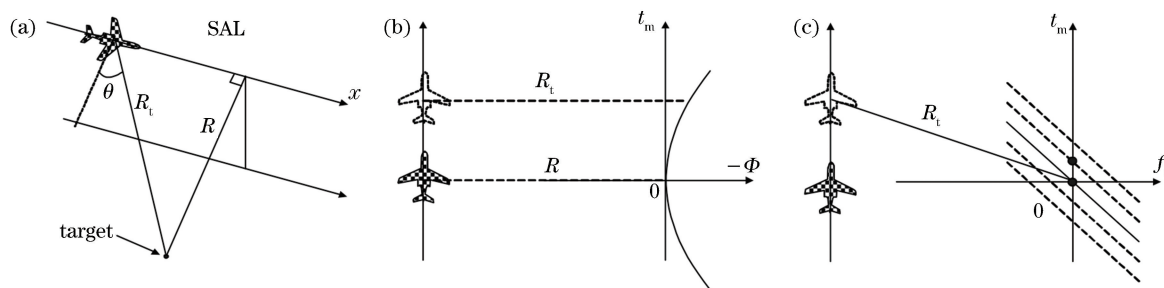


图 1 机载 SAL 成像几何及 SAL 信号的方位向相位和多普勒图。(a) 机载 SAL 成像几何关系; (b) SAL 信号的方位向相位; (c) SAL 信号多普勒图

Fig. 1 Airborne SAL imaging geometry and azimuthal phase and Doppler graph of SAL signal.

(a) Airborne SAL imaging geometry; (b) azimuthal phase of SAL signal; (c) Doppler graph of SAL signal

里叶变换即可在距离频域实现脉冲压缩。对经过距离脉压后的信号沿方位向进行误差相位估计、误差相位补偿和解斜(deramp)等操作,即可完成方位向运动补偿和脉压,实现 SAL 全孔径成像。

1) deramp

deramp 是一种通过相位补偿实现的压缩方法,通常用于方位向处理,对 deramp 算法进行推导。

假设零多普勒时刻  $t_d$  的目标回波为

$$s_r(t_m) = \exp[j\pi\gamma_m(t_m - t_d)^2], \quad (3)$$

式中,  $\gamma_m$  为方位向调频率,  $t_d$  为零多普勒时刻。

匹配滤波函数为

$$h_{dr}(t_m) = \exp(j\pi\gamma_m t_m^2). \quad (4)$$

deramp 后的信号为

$$s_r(t_m) \times h_{dr}^*(t_m) = \exp(j\pi\gamma_m t_d^2) \exp(-j2\pi\gamma_m t_m t_d), \quad (5)$$

式中,  $h_{dr}^*(t_m)$  为  $h_{dr}(t_m)$  的共轭。(5)式第一个指数项为常数相位,它与零多普勒时刻  $t_d$  的平方成正比;第二个指数项为  $\gamma_m t_d$  的复正弦波(单频波)。两个指数项都不影响图像聚焦。因此,deramp 操作补偿了回波的二次相位,实现了图像的方位向聚焦。

2) 最小熵自聚焦(MEA)误差相位估计

大气扰动使载机振动,形成运动误差,导致成像散焦和几何形变。由于回波相位与发射信号波长相关,而 SAL 波长为  $\mu\text{m}$  级,因此,SAL 对载机的定轨精度要求比 SAR 高。利用机载惯性导航系统(INS)和全球定位系统(GPS)无法满足这么高精度的误差补偿,所以实际处理中,要用基于数据的自聚焦技术完成。

传统自聚焦算法有 MEA 和 PGA 算法。MEA 算法利用图像的熵值进行误差相位估计,是一种基于图像整体信息的误差估计方法<sup>[23]</sup>,而传统 PGA 算法是一种基于特显点的自聚焦算法,在场景均匀和低信噪比情况下,会因为不能成功提取到特显点的相位历程而得不到理想的聚焦效果。相对于 PGA 算法,MEA 算法在低信噪比和低图像对比度的情况下具有更好的稳健性,能够得到更好的聚焦效果。因此,本文选择 MEA 算法估计误差相位。

假设 dechirp 接收后的二维信号经过距离向 FFT 和方位 deramp 处理得到  $s \in M \times N$ ,  $M$  为距离向采样点数,  $N$  为方位向采样点数。再假设方位向校正相位为一维向量  $\boldsymbol{\varphi} = [\varphi_1 \cdots \varphi_N]$ 。对信号  $s$  乘以校正相位再作方位向傅里叶逆变换(IFFT)后得

$$y_{m,n} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s_{m,n} \exp(j\varphi_n) \exp\left(j \frac{2\pi nk}{N}\right), \quad m = 1, \dots, M; n = 1, \dots, N, \quad (6)$$

式中,  $k$  对应  $0 \sim N-1$  个采样点,  $m$  和  $n$  分别对应距离向和方位向采样点,  $M \times N$  为图像总的像素个数,  $s_{m,n}$  为原始回波数据第  $(m, n)$  个像素值,  $y_{m,n}$  为补偿误差相位后图像的第  $(m, n)$  个像素值,  $\varphi_n$  为第  $n$  个方位向采样点上对应的误差相位。(6)式等效于对回波矩阵的每一列(每一个方位向采样)乘以一个校正相位。

经过误差相位补偿后,图像上单个像素的能量为

$$|y_{m,n}|^2 = y_{m,n} y_{m,n}^*, \quad m = 1, \dots, M; n = 1, \dots, N, \quad (7)$$

式中,  $y_{m,n}^*$  为  $y_{m,n}$  的共轭。

整幅图像的总能量为

$$E_y = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |y_{m,n}|^2 = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N y_{m,n} y_{m,n}^*, \quad m = 1, \dots, M; n = 1, \dots, N. \quad (8)$$

图像像素能量密度为

$$p_{m,n} = \frac{|y_{m,n}|^2}{E_y}, \quad m = 1, \dots, M. \quad (9)$$

图像熵为

$$S(\varphi) = - \sum_{\substack{m,n \\ m=1, \dots, M; \\ n=1, \dots, N}} p_{m,n} \ln p_{m,n}, \quad (10)$$

式中,  $\varphi$  为方位向校正相位,即图像熵为校正相位的函数。将(10)式展开得

$$\begin{aligned} S(\varphi) &= - \sum_{m,n} p_{m,n} \ln p_{m,n} = \\ &= - \sum_{m,n} \frac{|y_{m,n}|^2}{E_y} \ln \frac{|y_{m,n}|^2}{E_y} = \\ &= - \sum_{m,n} \frac{|y_{m,n}|^2}{E_y} \ln |y_{m,n}|^2 + \ln E_y. \end{aligned} \quad (11)$$

图像散焦时熵值较大,图像聚焦时熵值较小,所以,将图像熵值作为目标函数,求图像熵值最小时的误差相位,此时目标函数可构造为

$$\hat{\varphi} = \operatorname{argmin} S(\varphi), \quad (12)$$

式中,  $\hat{\varphi}$  为估计出的误差相位,由(12)式可知,MEA 只能估计高阶误差相位,而不能估计常数误差相位和线性误差相位。求解(12)式,得到误差相位表达式<sup>[23]</sup>为

$$\varphi_k^{(l+1)} = \varphi_k^{(l)} + \arctan(B_k/A_k), \quad (13)$$

式中,  $\varphi_k^{(l)} = \{\varphi_1^{(l+1)}, \varphi_2^{(l+1)}, \dots, \varphi_{k-1}^{(l+1)}, \varphi_k^{(l)}, \dots, \varphi_N^{(l)}\}$ , 上标  $l$  表示迭代次数,下标  $k-1$  代表误差相位的第

$k-1$  个分量。(13)式中  $B_k$  和  $A_k$  的计算公式为

$$B_k = \frac{2}{NE_y} \text{Im} \left[ \sum_m s_{m,k} \sum_n \exp \left( j \frac{2\pi kn}{N} \right) y_{m,n}^* \ln | y_{m,n}^{(l)} |^2 \right], \quad (14)$$

$$A_k = \frac{2}{NE_y} \text{Re} \left[ \sum_m s_{m,k} \sum_n \exp \left( j \frac{2\pi kn}{N} \right) y_{m,n}^* \ln | y_{m,n}^{(l)} |^2 \right] - \frac{2}{N^2 E_y} \sum_m (|s_{m,k}|^2 \sum_n \ln | y_{m,n}^{(l)} |^2), \quad (15)$$

式中,  $\text{Im}$  为取实部,  $\text{Re}$  为取虚部,  $s_{m,k} = \frac{\partial s_{m,n}}{\partial \varphi_k} \cdot$

$\frac{N}{j \times \exp(j2\pi kn/N)}$ ,  $E_y$  为整个图像的能量,  $y_{m,n}^{(l)}$  为第  $l$  次误差相位校正后的回波数据。

对于一幅  $M \times N$  大小的数据, MEA 算法需要对  $N$  个未知量进行估计, 由于运算中用到了 FFT, 那么对于  $N$  个未知参数的一次迭代, MEA 算法的运算复杂度为  $O(MN \lg N)$ 。

### 3) 全孔径成像算法流程图

图 2 为 SAL 全孔径成像算法流程图。由于 SAL 发射信号线宽较大, 发射信号载频不稳定, 所以需要增加参考通道以消除载频不稳定带来的误差, 采用 dechirp 接收方式, 得到原始回波数据。对原始回波数据进行距离向的 FFT, 将其变换到距离频域方位时域, 实现对接收信号的距离脉压。

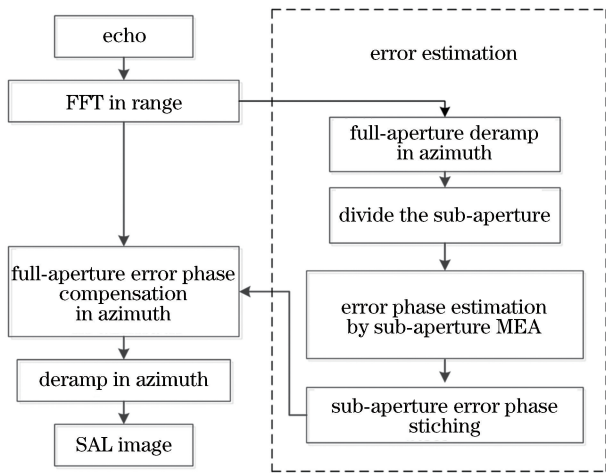


图 2 SAL 全孔径成像算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the SAL full-aperture imaging algorithm

接下来进行方位向误差估计和补偿, 对全孔径数据进行方位 deramp 操作, 去除方位向二阶相位, 剩余常数误差相位、一阶误差相位和高阶误差相位。其中, 常数和一阶误差相位对成像质量没有影响, 可以忽略, 高阶误差相位影响成像聚焦效果, 需要补偿。

为保证误差估计的准确性, 对数据划分子孔径进行 MEA 误差相位估计, 划分后的子孔径数据变少, 误差变化范围变小, 估计出来的误差更精确。同时, 为便于子孔径间误差相位的拼接, 相邻两个子孔径之间的数据重叠率为 50%, 即第一个子孔径的后 1/2 数据和第二个子孔径的前 1/2 数据是重叠的。

完成子孔径误差相位提取后, 需对每个子孔径的误差相位进行解缠绕和平滑处理, 然后将所有子孔径误差相位拼接成全孔径的误差相位。最后, 对整个距离脉压数据进行方位向相位误差的补偿和 deramp 处理, 从而实现 SAL 全孔径成像。

由于全孔径成像比单个子孔径成像用到的数据多, 所以全孔径成像相对于子孔径成像会得到更高的分辨率和图像信噪比。

## 3 实测数据处理与分析

该实验的 SAL 系统工作在 1550 nm, 线性调频带宽为 3 GHz, 脉冲重复频率为 50 kHz, 望远镜直径约为 4 mm, 转换器功率为 15 W, 数据在条带模式下采集, 斜距为 2.5 km。图 3 为观测靶标地面光学照片与观测目标子孔径成像结果<sup>[19]</sup>。

观察图 3(b), 发现其成像结果中含有较大的噪声, 而且右下角的字符“S”有些模糊, 针对这一现象, 用全孔径成像算法对其进行成像, 下面对成像结果进行详细说明。

首先, 将整个数据块分为 5 个子孔径, 每个子孔径相互重叠 50%, 然后利用 MEA 算法对所有子孔径进行相位误差提取, 再将提取的误差相位进行解缠绕和平滑处理, 得到的子孔径误差相位如图 4 所示。

图 4(a)~(e) 分别对应第 1~5 个子孔径的相位误差拟合情况, 抖动较大的曲线为利用自聚焦算法直接提取的误差相位, 相对较平滑的曲线为经过相位平滑处理后的误差相位。由于相邻子孔径之间相互重叠 50%, 所以两相邻子孔径重叠部分的相位变化趋势应该是相同的。如图 4(a) 的后 128 个方位向采样点与图 4(b) 的前 128 个采样点, 两者对应的相位曲线大体相同, 都有两个较大的峰值点。

将所有子孔径相位误差进行拼接, 得到全孔径的误差相位如图 5(a) 所示, 对整块数据进行方位向误差补偿和 deramp, 得到全孔径图像如图 5(b) 所示。

对于子孔径成像结果和全孔径成像结果进行对比分析。

### 1) 图像对比度

图像对比度被定义为



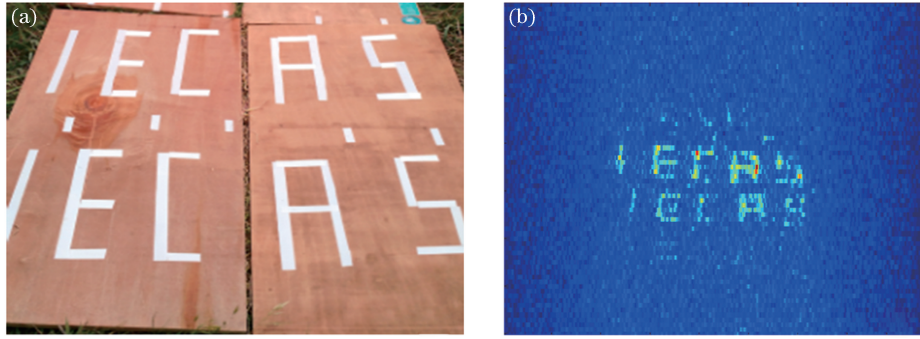


图 3 观测靶标地面光学照片与观测目标子孔径成像结果。(a) 观测靶标地面光学照片；(b) 观测目标 SAL 子孔径成像结果  
Fig. 3 Optical picture and the sub-aperture imaging result of the ground target. (a) Optical picture of the ground target;

(b) SAL sub-aperture imaging result

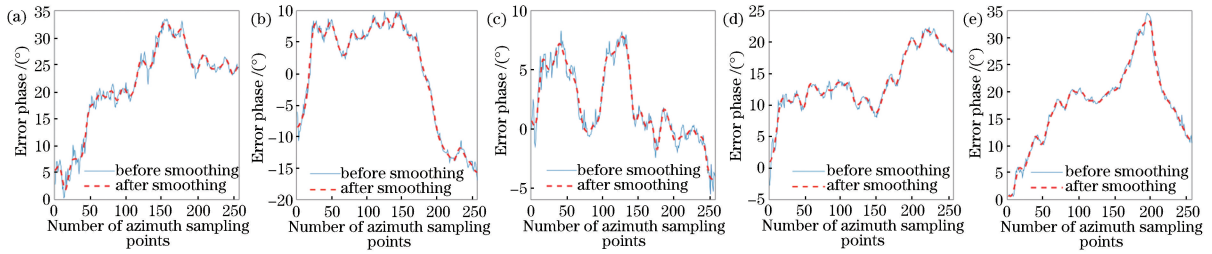


图 4 SAL 子孔径误差相位。(a) 第一个子孔径；(b) 第二个子孔径；(c) 第三个子孔径；(d) 第四个子孔径位；(e) 第五个子孔径

Fig. 4 SAL sub-aperture error phase. (a) The first sub-aperture; (b) the second sub-aperture; (c) the third sub-aperture;

(d) the fourth sub-aperture; (e) the fifth sub-aperture

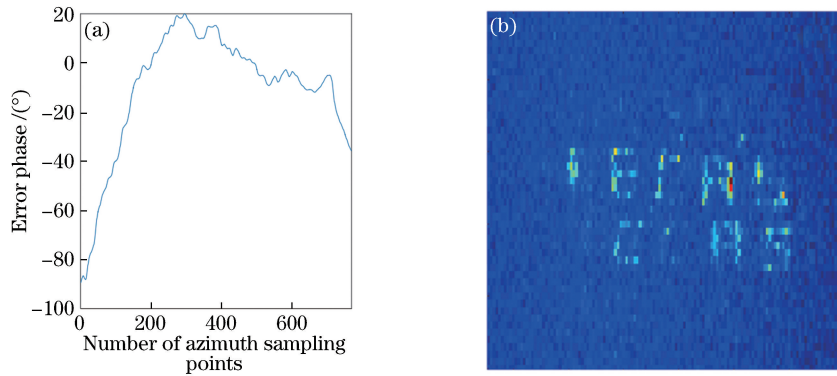


图 5 全孔径误差相位和 SAL 全孔径成像结果。(a) 全孔径误差相位；(b) SAL 全孔径成像结果

Fig. 5 Full-aperture error phase and the SAL full-aperture imaging result. (a) Full-aperture error phase;

(b) SAL full-aperture imaging result

$$c_{\text{ont}} = \sum r^2(i, j) p(i, j), \quad (16)$$

式中,  $r(i, j) = |i - j|$  为相邻像素间的灰度差,  $p(i, j)$  为相邻像素间的灰度差为  $r$  的像素分布概率。全孔径图像的对比度为 1.60, 子孔径图像的对比度为 0.49。图像对比度越高, 图像质量越好, 因此全孔径图像质量优于子孔径。

## 2) 图像信噪比

图像信噪比 ( $R_{\text{SN}}$ ) 被定义为

$$R_{\text{SN}} = 10 \lg(P_s / P_n), \quad (17)$$

式中,  $P_s$  为信号功率,  $P_n$  为噪声功率。  $R_{\text{SN}}$  数值越大, 信号质量越好。图 6 为子孔径成像与全孔径成像信噪比对比。

通过(17)式计算选定区域信噪比, 得到子孔径图像右下角字母“S”区域的  $R_{\text{SN}}$  为 6.63 dB, 全孔径图像右下角字母“S”区域的  $R_{\text{SN}}$  为 11.11 dB, 可知全孔径图像的信噪比较子孔径图像的信噪比大, 图像质量相对较好, 原因是全孔径成像相干积累时间较长, 所以右下角字母“S”区域信噪比较高。

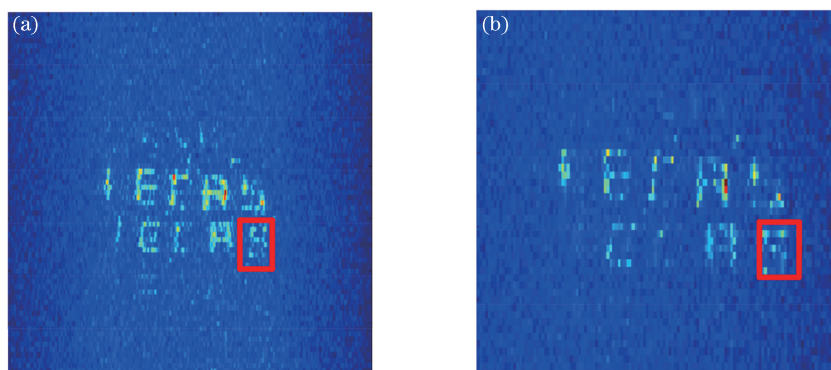


图 6 子孔径成像与全孔径成像信噪比对比。(a)子孔径成像结果;(b)全孔径成像结果

Fig. 6 SNR comparison of the sub-aperture imaging and the full-aperture imaging. (a) Sub-aperture imaging result; (b) full-aperture imaging result

## 4 结 论

由于合成孔径激光雷达波长短,机载 SAL 更易受载机振动的影响,产生相位误差,所以成像时需要对其误差相位进行补偿。子孔径成像算法对实测机载数据进行测量,其图像不是很理想,图像信噪比较低。提出基于相位补偿的全孔径成像算法,首先对数据划分子孔径,利用 MEA 提取子孔径误差相位,再将所有误差相位拼接,对全孔径数据进行整体的相位补偿,实现 SAL 全孔径成像。实验结果表明,相对于子孔径成像算法,全孔径成像算法能得到更高的分辨率和信噪比。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang G, Sun J F, Zhou Y, *et al.* Ghost image in enhanced self-heterodyne synthetic aperture imaging lidar[J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 591-597.
- [2] Guo L, Yin H F, Zhou Y, *et al.* A novel sidelobe-suppression algorithm for airborne synthetic aperture imaging lidar [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 111: 714-719.
- [3] Buck J R, Krause B W, Malm A I R, *et al.* Synthetic aperture imaging at optical wavelengths [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference 2009, May 31-June 5, 2009, Baltimore, Maryland. Washington, D. C.: OSA, 2009: PThB3.
- [4] Lü Y K, Wu Y H. Development and key technologies of synthetic aperture lidar imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 100004.  
吕亚昆, 吴彦鸿. 合成孔径激光雷达成像发展及关键技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 100004.
- [5] Bashkansky M, Lucke R L, Funk E, *et al.* Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(22): 1983-1985.
- [6] Beck S M, Buck J R, Buell W F, *et al.* Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(35): 7621-7629.
- [7] Crouch S, Barber Z W. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture lidar techniques [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24237-24246.
- [8] Xing M D, Guo L, Tang Y, *et al.* Design on the experiment optical system of synthetic aperture imaging lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 290-294.  
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): 290-294.
- [9] Zhou Y, Xu N, Luan Z, *et al.* 2D imaging experiment of a 2D target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 2030-2032.  
周煜, 许楠, 栾竹, 等. 尺度缩小合成孔径激光雷达的二维成像实验 [J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 2030-2032.
- [10] Liu L R, Zhou Y, Zhi Y N. A large-aperture synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its verification in laboratory space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900112.  
刘立人, 周煜, 职亚楠, 等. 大口径合成孔径激光成像雷达演示样机及其实验室验证 [J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900112.
- [11] Dai E W, Sun J F, Yan A M, *et al.* Demonstration of a laboratory Fresnel telescope synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5):

0528003.  
戴恩文, 孙建锋, 闫爱民, 等. 菲涅耳望远镜合成孔径激光成像雷达实验室验证[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0528003.
- [12] Wu J, Yang Z S, Zhao Z L, *et al.* Synthetic aperture ladar imaging with one-way far-field diffraction[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(6): 514-518, 525.  
吴谨, 杨兆省, 赵志龙, 等. 单程远场衍射合成孔径激光雷达成像实验室演示[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(6): 514-518, 525.
- [13] Wu J, Zhao Z L, Wu S D, *et al.* High resolution synthetic aperture ladar imaging at 12.9 m distance[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1228002.  
吴谨, 赵志龙, 吴曙东, 等. 12.9 m 高分辨率合成孔径激光雷达成像[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1228002.
- [14] Wu S D, Huang J Y, Zhao Z L, *et al.* Experimental demonstration of spotlight mode synthetic aperture ladar[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0628001.  
吴曙东, 黄建余, 赵志龙, 等. 聚束模式合成孔径激光雷达实验演示[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0628001.
- [15] Wu J, Zhao Z L, Bai T, *et al.* High resolution imaging experiment on differential synthetic aperture ladar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 1230003.  
吴谨, 赵志龙, 白涛, 等. 差分合成孔径激光雷达高分辨率成像实验[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 1230003.
- [16] Ricklin J, Schumm B, Dierking M, *et al.* Synthetic aperture ladar for tactical imaging[R]. [S.l.: s.n.], 2007: ADA519847.
- [17] Krause B W, Buck J, Ryan C, *et al.* Synthetic aperture ladar flight demonstration [C]//Quantum Electronics and Laser Science Conference 2011, May 1-6, 2011, Baltimore, Maryland. Washington, D. C.: OSA, 2011: PDPB7.
- [18] Lu Z Y, Zhou Y, Sun J F, *et al.* Airborne down-looking synthetic aperture imaging ladar field experiment and its flight testing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0110001.  
卢智勇, 周煜, 孙建峰, 等. 机载直视合成孔径激光成像雷达外场及飞行实验[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0110001.
- [19] Li G Z, Wang N, Wang R, *et al.* Imaging method for airborne SAL data[J]. Electronics Letters, 2017, 53(5): 351-353.
- [20] Guo L, Yin H F, Zeng X D, *et al.* Analysis of airborne synthetic aperture ladar imaging with platform vibration[J]. Optik, 2017, 140: 171-177.
- [21] Li Z J, Wu J, Liu G G, *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.
- [22] Zhu D Y, Jiang R, Mao X H, *et al.* Multi-subaperture PGA for SAR autofocusing[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(1): 468-488.
- [23] Xu G, Yang L, Zhang L, *et al.* Weighted minimum entropy autofocus algorithm for ISAR imaging[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(8): 1809-1815.  
徐刚, 杨磊, 张磊, 等. 一种加权最小熵的 ISAR 自聚焦算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(8): 1809-1815.