

直视合成孔径激光雷达自补偿高速空间波前调制器

李光远^{1,2}, 孙建锋¹, 周煜¹, 卢智勇¹, 张国^{1,2}, 许蒙蒙^{1,2}, 张波^{1,2}

- (1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 提出了一种直视合成孔径激光雷达的高速空间相位调制方法。将一束空间偏振光束分为两束同轴同心且正交偏振的光束。在交轨向, 将两个光束调制成随时间正弦变化且变化方向相反的空间相位; 在顺轨向, 将两束光调制成具有符号相反曲率半径的相位, 在慢时间轴上产生与目标顺轨向位置有关的空间二次项相位历程。此种调制方法, 在顺轨向具有自动补偿抖动的功能, 可以有效地防止平台抖动对成像的影响。

关键词: 合成孔径激光雷达; 直视; 高速; 相位调制

中图分类号: O438 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1030001

Self-compensation high-speed spatial wavefront modulator of down-looking synthetic aperture ladar

Li Guangyuan^{1,2}, Sun Jianfeng¹, Zhou Yu¹, Lu Zhiyong¹, Zhang Guo^{1,2}, Xu Mengmeng^{1,2}, Zhang Bo^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A high-speed phase modulation of down-looking synthetic aperture ladar was proposed. The spatially polarized beam was divided into two coaxial and polarization-orthogonal beams. In the orthogonal direction of travel, the two beams were modulated to sinusoidal phases, whose changing directions were contrary; in the travel direction, these two beams were modulated with different curvatures to a quadratic phase history, which was associated with position of the targets in slow-time axis. This modulation method has the function of automatic jitter compensation in the azimuthal direction, and can effectively prevent the platform jitter effects on imaging.

Key words: synthetic aperture ladar; down-looking; high-speed; phase modulation

收稿日期: 2018-05-11; 修订日期: 2018-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(61605226, 61505233)

作者简介: 李光远(1990-), 男, 博士生, 主要从事合成孔径激光成像雷达数字信号处理方面的研究。Email: ligy1990@163.com

导师简介: 孙建锋(1978-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间激光通信和合成孔径激光成像雷达技术方面的研究。

Email: sunjianfeng@163.com

0 引言

合成孔径激光成像雷达 (Synthetic Aperture Imaging Lidar, SAIL) 是一种高分辨率成像雷达,可以在数公里外获得厘米量级的分辨率。其成像原理来源于微波段的合成孔径雷达,通过小天线合成大天线来获得高的分辨率,从而减小大口径天线的制作成本,在对地观测、对空监视和空间探测等领域具有广泛应用价值。

自合成孔径激光雷达问世以来,取得了快速的发展,国内外都报道了众多的 SAIL 成像结果,其中美国于 2011 年进行了机载实验,获得了成像结果,分辨率达到了 2.5 cm,成像宽度 1 m^[1-9];在国内,中国科学院电子学研究所也于 2016 年进行了 3 000 m 机载试验,成像分辨率 5 cm^[10]。由于合成孔径激光雷达通过孔径合成的方式,实现高分辨成像,在孔径合成的过程中极易受到雷达自身平台以及大气的扰动,从而影响成像质量;同时其需要采用氰化氢(HCN)光谱滤波触发控制技术保证方位向初始相位稳定;匹配雷达激光发射角和接收视场匹配等。为了克服上述困难,中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光实验室刘立人课题组基于抛物波前差动扫描和自差探测复数化接收的方法,提出了一种直视 SAIL,并进行了室内、室外实验,于 2016 年进行了 3 000 m 机载实验,成像带宽达到了 10 m,接收视场达到了 4.8 mrad,并且得到了清晰的成像结果^[11-16]。

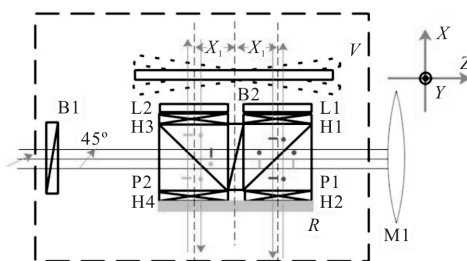
直视合成孔径激光成像雷达是基于抛物波前差动扫描和自差探测接收原理提出的。基本原理是:对目标投射两个同轴同心且偏振正交的光束并进行自差接收。其中,两个偏振光束波前由振镜调制成随时间正弦变化且变化方向相反的空间相位,最后通过非线性矫正算法^[17]矫成线性相位,然后傅里叶变换压缩进行成像。在运载平台运动的顺轨向上,这两个光束的波前具有符号相反的曲率半径,因此在慢时间轴上产生目标顺轨向位置有关的空间二次项相位历程。最终,通过共轭相位二次项匹配滤波实现顺轨向聚焦成像。

侧视 SAIL,其发射线性调频信号,为时域调制,通过去斜解调的方式接收信号。不同于侧视 SAIL 的信号调制方式,直视 SAIL 的信号调制方式采用空间调制。调制的方式有多种^[15,18],但是为了满足机载等高速成像的要求,在与飞行方向垂直的交轨向上的

相位调制扫描速度一定要快速,从而满足顺轨向采样率的需求。文中提出了一种基于振镜的高速空间相位调制方式,使得顺轨向的采样率可以满足机载等高速成像的要求。由于采用振镜正向反向振动调制,使得顺轨向采样频率达到振镜振动频率的 2 倍。同时此种设计方法可以有效地消除来自顺轨向(y 方向)的抖动误差。

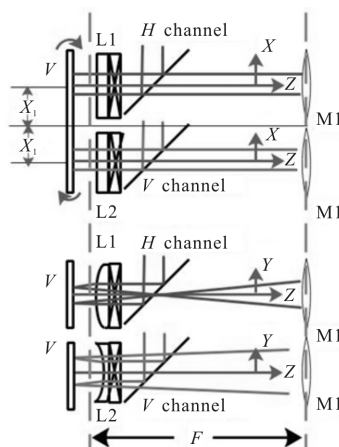
1 相位调制原理

高速空间相位调制模块如图 1 所示。该模块主要由两片半波片(B1, B2),四片四分之一波片(H1, H2, H3, H4),两个偏振分光棱镜 PBS(P1, P2),一块凸柱面镜(L1),一块凹柱面镜(L2),一块反射镜(R)以及一个振镜(V)组成。其中,凸透镜 M1 为发射主镜。振镜与柱面镜之间的距离要尽可能短,并且放置在发射主镜的等效焦面上。



(a) 总体结构图

(a) Overall structure



(b) 原理图

(b) Schematic diagram

图 1 高速空间相位调制模块原理图

Fig.1 Schematic diagram of high-speed spatial phase modulation module

一束偏振平面光经过半波片 B1 之后,变为偏振方向 45°的偏振光束,该光束垂直入射到偏振分光棱镜 P2 上,水平偏振光穿过 P2,垂直偏振光经 P2 发射向下传播,此时设入射光的光阑口径为 $L_x^{\text{in}} \times L_y^{\text{in}}$,则两束偏振光可以分别表示为:

$$\begin{pmatrix} e_H^{\text{in}}(x,y;t) \\ e_V^{\text{in}}(x,y;t) \end{pmatrix} = Q_1 \begin{pmatrix} e(x,y;t) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} EW \left(\frac{x}{L_x^{\text{in}}}, \frac{y}{L_y^{\text{in}}} \right) \exp(j2\pi ft + \phi) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} EW \left(\frac{x}{L_x^{\text{in}}}, \frac{y}{L_y^{\text{in}}} \right) \exp(j2\pi ft + \phi) \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: E 为光波振幅; f 为光波的频率; ϕ 为激光器初始相位; Q_1 为半波片的琼斯矩阵; $W \left(\frac{x}{L_x^{\text{in}}}, \frac{y}{L_y^{\text{in}}} \right) = \text{rect} \left(\frac{x}{L_x^{\text{in}}} \right) \text{rect} \left(\frac{y}{L_y^{\text{in}}} \right)$ 。通过调节 B1 快轴与 x 轴的夹角,使上式成立。

1.1 垂直入射光束相位变化历程

垂直偏振光经过 1/4 波片 H4, H4 的快轴与 x 轴成 45°夹角,之后经反射镜返回,再次通过 H4,由琼斯矩阵可以表示为:

$$\begin{pmatrix} e_{VH1}^{\text{in}}(x,y;t) \\ e_{Vv1}^{\text{in}}(x,y;t) \end{pmatrix} = Q_2^- Q_2 Q_2^+ \begin{pmatrix} 0 \\ e_V^{\text{in}}(x,y;t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ie_V^{\text{in}}(x,y;t) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: Q_2 为 1/4 波片的琼斯矩阵,其中 Q_2^+ 表示波片快轴与 x 轴成正夹角, Q_2^- 表示波片快轴与 x 轴成负夹角; Q_r 为反射镜的琼斯矩阵。此时,垂直入射光经过两次旋转,变为水平偏振光。通过 PBS 之后,此水平偏振光再次经过 1/4 波片 H3,然后经过柱面镜 L2,其相位发生变化:

$$\begin{pmatrix} e_{VH2}^{\text{in}}(x,y;t) \\ e_{Vv2}^{\text{in}}(x,y;t) \end{pmatrix} = Q_2^+ \begin{pmatrix} e_{VH1}^{\text{in}}(x,y;t) \\ e_{Vv1}^{\text{in}}(x,y;t) \end{pmatrix} \exp \left(-j \frac{k}{2l} y^2 \right) \quad (3)$$

式中: k 为波矢量; l 为柱面镜焦距。由于柱面镜与振镜的间距尽可能小,所以在这里近似将其约等于 0。

$$\begin{pmatrix} e_H(X,Y;t) \\ e_V(X,Y;t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} Ac'' W \left(\frac{x+(Z/F)x_l}{(Z/F)L_x^{\text{in}}}, \frac{y}{(Z/F)L_y^{\text{in}}} \right) \exp[j2\pi ft + \phi] \exp \left[-jk(x+x_l) \frac{a}{(Z/F)} \sin(2\pi \xi t) - j \frac{k}{(Z/F)^2 l} y^2 \right] \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中: c'' 为整个变化过程中的系数值。

1.2 水平入射光束相位变化历程

水平偏振光经过 P2 之后,通过半波片 B2,旋转偏振态 90°,变为垂直偏振光,此时光束的相位可以

则经过振镜反射以及调制之后,其相位为:

$$\begin{pmatrix} e_{VH3}^{\text{in}}(x,y;t) \\ e_{Vv3}^{\text{in}}(x,y;t) \end{pmatrix} = Q_r \begin{pmatrix} e_{VH2}^{\text{in}}(x,y;t) \\ e_{Vv2}^{\text{in}}(x,y;t) \end{pmatrix} \times [-jk(x+x_l) a \sin(2\pi \xi t)] \quad (4)$$

式中: a 为振镜的最大振动角度; ξ 为振镜的振动频率; x_l 为调制频率,满足 $x_l > L_x^{\text{in}}/2$ 。然后,该光束再次通过柱面镜,1/4 波片 H3 后相位为:

$$\begin{pmatrix} e_{VH4}^{\text{in}}(x,y;t) \\ e_{Vv4}^{\text{in}}(x,y;t) \end{pmatrix} = Q_2^- \begin{pmatrix} e_{VH3}^{\text{in}}(x,y;t) \\ e_{Vv3}^{\text{in}}(x,y;t) \end{pmatrix} \exp \left(-j \frac{k}{2l} y^2 \right) = \begin{pmatrix} 0 \\ e_V^{\text{in}}(x,y;t) \exp \left[-jk(x+x_l) a \sin(2\pi \xi t) - j \frac{k}{l} y^2 \right] \end{pmatrix} \quad (5)$$

因为柱面镜位于发射主镜的焦面上,所以该光束经过半波片 B2,到达发射主镜 M1 前平面,由菲涅耳衍射可得复振幅分布为:

$$\begin{pmatrix} e_H(x',y';t) \\ e_V(x',y';t) \end{pmatrix} = c \int \int_{-\infty}^{\infty} Q_1 \begin{pmatrix} e_{VH4}^{\text{in}}(x,y;t) \\ e_{Vv4}^{\text{in}}(x,y;t) \end{pmatrix} \exp \left(jk \frac{(x'-x)^2 + (y'-y)^2}{2F} \right) dx dy \quad (6)$$

这里 c 表示常数相位因子。通过透镜后的场分布为:

$$\begin{pmatrix} e_H(x',y';t) \\ e_V(x',y';t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_H(x',y';t) \\ e_V(x',y';t) \end{pmatrix} \exp \left(-jk \frac{x'^2 + y'^2}{2F} \right) \quad (7)$$

当成像距离 Z 满足夫琅禾费衍射条件时:

$$\frac{2\pi}{\lambda} \frac{x'^2 + y'^2}{2Z} \ll 2\pi \quad (8)$$

由夫琅禾费衍射,可得远场的复振幅分布为:

$$\begin{pmatrix} e_H(X,Y;t) \\ e_V(X,Y;t) \end{pmatrix} = c' \frac{\exp(jkZ)}{j\lambda Z} \exp \left(jk \frac{x'^2 + y'^2}{2Z} \right) \cdot \int \int_{-\infty}^{\infty} \begin{pmatrix} e_H(x',y';t) \\ e_V(x',y';t) \end{pmatrix} \exp \left[-j \frac{k}{Z} (x'X + y'Y) \right] dx' dy' \quad (9)$$

整理得到远场的光斑复振幅分布为:

表示为:

$$\begin{pmatrix} e_{Hv1}^{\text{in}}(x,y;t) \\ e_{Hh1}^{\text{in}}(x,y;t) \end{pmatrix} = Q_1 \begin{pmatrix} e_H^{\text{in}}(x,y;t) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ e_H^{\text{in}}(x,y;t) \end{pmatrix} \quad (11)$$

垂直偏振光束经过 P1 向上反射, 依次通过 1/4 波片 H1, 柱面镜 M2, 变为了圆偏振光, 相位变化为:

$$\begin{pmatrix} e_{Hv2}^{in}(x, y; t) \\ e_{Hv2}^{in}(x, y; t) \end{pmatrix} = Q_2^+ \begin{pmatrix} e_{Hv1}^{in}(x, y; t) \\ e_{Hv1}^{in}(x, y; t) \end{pmatrix} \exp\left(j\frac{k}{2l}y^2\right) \quad (12)$$

此时的光束完成了一次顺轨向的空间相位调制, 紧接着光束经过振镜, 对其交轨向进行调制, 并由振镜反射之后, 再次通过柱面镜 M2, 以及 1/4 波片进入 L1, 由圆偏振光变为了水平偏振光:

$$\begin{pmatrix} e_{Hv3}^{in}(x, y; t) \\ e_{Hv3}^{in}(x, y; t) \end{pmatrix} = Q_2^+ Q_r \begin{pmatrix} e_{Hv2}^{in}(x, y; t) \\ e_{Hv2}^{in}(x, y; t) \end{pmatrix} \cdot \exp[-jk(x+x_i)asin(2\pi\xi t)] \exp\left(-j\frac{k}{2l}y^2\right) \quad (13)$$

最后, 光束向下传播, 依次经过 1/4 波片 H2、反射镜 R、1/4 波片 H2, 完成偏振态的改变, 到达发射主镜 M1 前平面, 由菲涅耳衍射可得复振幅分布为:

$$\begin{pmatrix} e_H(X, Y; t) \\ e_v(X, Y; t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} Ac'' W\left(\frac{x+(Z/F)x_l}{(Z/F)L_x^{in}}, \frac{y}{(Z/F)L_y^{in}}\right) \exp[j2\pi ft + \phi] \exp\left[-jk(x+x_i)\frac{a}{(Z/F)}\sin(2\pi\xi t) + j\frac{k}{(Z/F)^2 l}y^2\right] \\ 0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

最终得到远场处的光斑相位分布:

$$e_H(x, y; t) = \frac{\sqrt{2}}{2} CW\left(\frac{x+Mx_l}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right) \exp[jk(x+Mx_l) \cdot A \sin(2\pi\xi t) + j\frac{k}{R}y^2] \quad (18)$$

$$e_v(x, y; t) = \frac{\sqrt{2}}{2} CW\left(\frac{x+Mx_l}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right) \exp[-jk(x+Mx_l) \cdot A \sin(2\pi\xi t) - j\frac{k}{R}y^2] \quad (19)$$

式中: $M=Z/F$, $L_x=(Z/F)L_x^{in}$, $L_y=(Z/F)L_y^{in}$, $A=\frac{a}{(Z/F)}$, $R=l(Z/F)^2$; 从而完成了交轨向正弦调制, 顺轨向二次相位调制。

1.3 顺轨向抖动自补偿

雷达载体沿着顺轨向运动, 进行方位向孔径合成, 其中运动过程中势必存在着一定程度的微小抖动, 如图 2 所示。此时, 由公式(18)、(19)可知由于内光场的振镜抖动, 远场光斑可以表示为:

$$e_H(x, y) = CW\left(\frac{x+Mx_l}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right) \text{rect}\left(\frac{t_f}{T_f}\right) \times \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda}[(x+Mx_l)-M(L_v+y)\theta]\right\} \cos\theta A \sin(2\pi\xi t) \times \exp\left\{j\frac{\pi}{\lambda}\frac{y^2}{R_1}\right\} \quad (20)$$

$$\begin{pmatrix} e_H(x', y'; t) \\ e_v(x', y'; t) \end{pmatrix} = c \iint Q_2^- Q_r Q_2^+ \begin{pmatrix} e_{Hv3}^{in}(x, y; t) \\ e_{Hv3}^{in}(x, y; t) \end{pmatrix} \cdot \exp\left(jk\frac{(x'-x)^2+(y'-y)^2}{2F}\right) dx dy \quad (14)$$

式中: c 为整个过程中系数值。经过透镜之后的复振幅分布:

$$\begin{pmatrix} e_H(x', y'; t) \\ e_v(x', y'; t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_H(x', y'; t) \\ e_v(x', y'; t) \end{pmatrix} \exp\left(-jk\frac{x'^2+y'^2}{2F}\right) \quad (15)$$

式中: F 为发射主镜焦距。最终, 在远场的复振幅分布可以表示为:

$$\begin{pmatrix} e_H(X, Y; t) \\ e_v(X, Y; t) \end{pmatrix} = c' \frac{\exp(jkZ)}{j\lambda Z} \exp\left(jk\frac{x'^2+y'^2}{2Z}\right) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \begin{pmatrix} e_H(x', y'; t) \\ e_v(x', y'; t) \end{pmatrix} \exp\left[-j\frac{k}{Z}(x'X+y'Y)\right] dx' dy' \quad (16)$$

c' 为整个过程中系数值, 整理得到远场的光斑复振幅分布为:

$$e_v(x, y) = CW\left(\frac{x+Mx_l}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right) \text{rect}\left(\frac{t_f}{T_f}\right) \times \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda}[(x+Mx_l)+M(L_v+y)\theta]\right\} \times \cos\theta A \sin(2\pi\xi t) \times \exp\left\{-j\frac{\pi}{\lambda}\frac{y^2}{R_1}\right\} \quad (21)$$

式中: L_y 为光斑底端至振镜底端的距离; θ 为振镜抖动的微小角度。

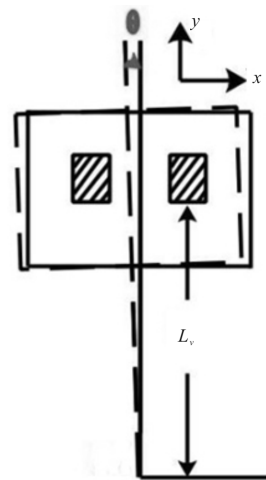


图 2 振镜抖动示意图

Fig.2 Schematic diagram of galvanometer jitter

由上述两式,得到回波信号可以表示为:

$$e(x_p, y_p; t_f, t_s) \approx C' W \left(\frac{x+Mx_t}{L_x}, \frac{y}{L_y} \right) \text{rect} \left(\frac{t_f}{T_f} \right) \text{rect} \left(\frac{t_s}{T_s} \right) \times \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda} [4(x_p+Mx_t)A \sin(2\pi \xi t)] \right\} \times \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{(y_p - \beta t_s)^2}{R_l/2} \right] \right\} \quad (22)$$

从公式可得,此种设计方法很好地补偿了在顺轨向上的微小抖动。

2 实验验证

相位调制模块的实物如图 3 所示。其中振镜的振动频率为 650 Hz,凸柱面镜的焦距为 46 mm,凹柱面镜的焦距为-46 mm,PBS、波片、柱面镜的尺寸均为 10 mm×10 mm。为了探测远场波面的相位情况,使用一个焦距为 15 m 的平行光管模拟远场,将点探测器放置在平行光管焦面的位置上。具体实验装置如图 4 所示。激光器采用波长为 1 030 nm,功率可调的激光器;系统采样频率为 62.5 MHz;发射主镜焦距为 1.2 m。具体参数见表 1。

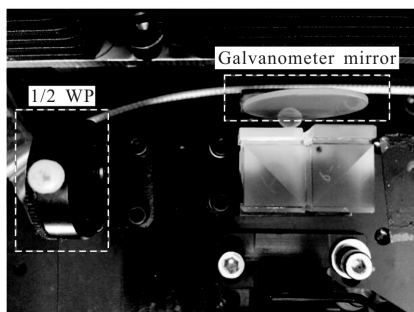


图 3 相位调制模块实物图

Fig.3 Physical map of phase modulation module

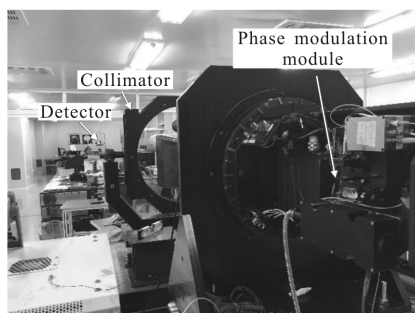


图 4 实验装置图

Fig.4 Experimental device diagram

因为经过高速相位调制模块调制的光束为正交

偏振的两束光,无法直接用点探测器在焦面探测,因此应用一个 PBS 放置在 L1 的出射端,放置的角度与两束光保证 45°夹角,可以得到在目标面处的光斑复振幅分布为:

$$e_r(X, Y; t) = \frac{\sqrt{2}}{2} e_H(X, Y; t) + \frac{\sqrt{2}}{2} e_V(X, Y; t) \quad (23)$$

经过光电转化,探测到的光电流为:

$$I(t) = \zeta \left\{ E^2 + E^2 \cos \left[j2k(x+x_t)A \sin(2\pi \xi t) + j \frac{2k}{R} y^2 \right] \right\} \quad (24)$$

式中:ζ为光电转化过程中的系数。将电探测器放置在 x_p 点,沿着顺轨向以 19 mm/s 的速度移动,对采样得到的数据在交轨向进行解包裹,应该得到与 x_p 有关的正弦相位;在顺轨向对相位进行解包裹,滤除相位噪声,得到二次项相位历史。目标面静态干涉图如图 4 所示。

表 1 实验具体参数

Tab.1 System parameters of the experiment

Parameters	Values
Wavelength λ/nm	1 030
Vibrant angle/(°)	5.5
Beam diameter/mm	1
Vibrant frequency/Hz	650
Focus length of launch/receive lens/m	1.2
Imaging distance/m	15
Modulation length/mm	6
Sampled frequency in orthogonal direction/MHz	62.5
Sampling ratio in the orthogonal direction	75.71%
Speed of the detector/mm·s ⁻¹	19
Cylindrical lens focal length/mm	46 & -46
Laser power/W	3

3 分析与讨论

实验结果如图 5 所示,通过与理论计算值相比,可见交轨向相位与理论模拟情况一致;顺轨方向上,理论的二次项匹配系数为 1.70,但是实际中求得的二次项匹配系数为 1.90,这主要是因为(1) 探测器放置的位置与严格的平行光管焦面有所误差;(2) 高速相位调制模块的放置位置并未严格的放置在发射主镜的焦面上有关;(3) 柱面镜存在像差。但是,从图 4(b)中可以看出,此高速相位调制模块在顺轨向

上依旧获得了非常好的二次项相位历程。在实际应用中,通过测量出系统的实际二次相位匹配系数,来进行顺轨向的匹配滤波成像。试验中,即便在给运动平台施以微小抖动的情况下,二维相位历史与图 6 所示的情况并无明显变化,故此种高速相位调制方式具有很好地自补偿功能。

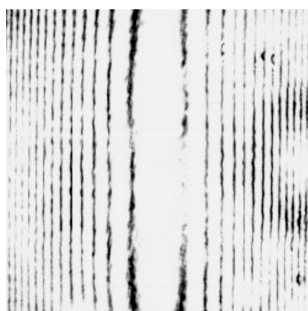
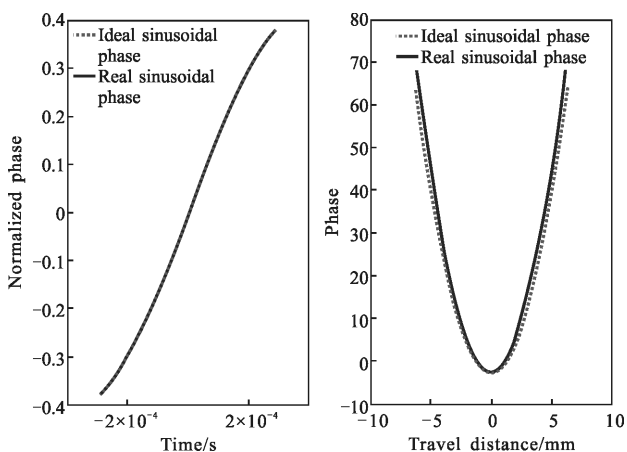


图 5 目标面静态干涉图

Fig.5 Static interferogram of the target



(a) 交轨向相位

(b) 顺轨向相位

(a) Phase in the orthogonal direction (b) Phase in the travel direction

图 6 目标面光斑相位

Fig.6 Phase of the target spot

4 结论

直视合成孔径激光成像雷达采用自差接收的方式可以有效地克服大气湍流,同时,由于采用内发射场投影的方法,在目标面的成像光斑与成像距离成正比,因此,可以实现大试场接收。为了满足在机载等高速成像的要求,文中给出了一种具有抖动自补偿功能的基于振镜的高速空间相位调制模块的设计,并且通过实验验证了其可行性。对直视合成孔径激光雷达的高速成像具有重要意义。

参考文献:

- [1] Lucke R L, Bashkansky M, Reintjes J, et al. Synthetic aperture lidar (SAL): fundamental theory, design equations for a satellite system, and laboratory demonstration [R]. Naval Research Laboratory Report NRL/FR/7218-02-10, 051, 2002.
- [2] Beck S M, Buck J R, Buell W F, et al. Synthetic aperture imaging lidar: Laboratory demonstration and signal processing[J]. *Appl Opt*, 2005, 44(35): 7621-7629.
- [3] Crouch S, Barber Z W. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture lidar techniques[J]. *Opt Express*, 2012, 20(22): 24237-24246.
- [4] Barber Z W, Dahl J R. Synthetic aperture imaging demonstrations and information at very low return levels[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(24): 5531-5537.
- [5] Turbide S, Marchese L, Terroux M, et al. An all-optronic synthetic aperture lidar[C]//SPIE, 2012, 8542: 854213.
- [6] Bashkansky M, Lucke R L, Funk E, et al. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(22): 1983-1985.
- [7] Krause B, Buck J, Ryan C, et al. Synthetic aperture lidar flight demonstration [C]//2011 Conference on Laser and Electro-Optics, 2011: 87.
- [8] Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu, 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. (in Chinese)
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.
- [9] Liu Liren, Zhou Yu, Zhi Ya'nan, et al. A large-aperture synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its verification in laboratory space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900112. (in Chinese)
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.
- [10] Zhang Keshu, Pan Jie, Wang Ran, et al. Study of wide swath synthetic aperture lidar imaging technology[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 1-10. (in Chinese)
张珂殊, 潘洁, 王然, 等. 大幅宽激光合成孔径雷达成像技术研究[J]. *雷达学报*, 2017, 6(1): 1-10.
- [11] Liu Liren. Principle of down-looking synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0928002.

- (in Chinese)
刘立人. 直视合成孔径激光成像雷达原理 [J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0928002.
- [12] Liu Liren. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(4): 579–599.
- [13] Lu Zhiyong, Sun Jianfeng, Zhi Ya'nan, et al. Influence of inner wave-front aberration on down-looking synthetic aperture imaging ladar imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0728001. (in Chinese)
卢智勇, 孙建锋, 职亚楠, 等. 直视合成孔径激光成像雷达内发射场波前像差对成像的影响 [J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0728001.
- [14] Luan Z, Sun J, Zhi Y, et al. Two-dimensional imaging experiment of down-looking synthetic aperture ladar under simulated far-field condition [J]. *Acta Opt Sin*, 2014 34: 0710003.
- [15] Luan Z, Sun J, Zhou Y, et al. Down-looking synthetic aperture imaging ladar demonstrator and its experiments over 1.2 km outdoor[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12: 111101.
- [16] Lu Zhiyong, Zhou Yu, Su Jianfeng, et al. Airborne down-looking synthetic aperture imaging ladar field experiment and its flight testing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0110001. (in Chinese)
卢智勇, 周煜, 孙建锋, 等. 机载直视合成孔径激光成像雷达外场及飞行试验[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0110001.
- [17] Li Guangyuan, Sun Jianfeng, Lu Zhiyong, et al. Resampling technique in the orthogonal direction for down-looking synthetic aperture imaging ladar [C]//SPIE, 2015, 9617: 96170N.
- [18] Lu Zhiyong, Sun Jianfeng, Zhi Ya'nan, et al. Electrically controlled parabolic wavefront scanner in Down-looking synthetic aperture imaging ladar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0828002. (in Chinese)
卢智勇, 孙建锋, 职亚楠, 等. 直视式合成孔径激光成像雷达电控抛物波面扫描器[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0828002.