

# 连续 m 序列相位调制的实时逆合成孔径激光雷达系统

黄宇翔<sup>1</sup>, 宋 盛<sup>1</sup>, 徐卫明<sup>1</sup>, 胡以华<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

<sup>2</sup>解放军电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

**摘要** 设计了一个实时数据采集的逆合成孔径激光雷达成像系统。该系统使用基于连续 m 序列相位调制方案, 采用功率为 2 W、波长为 1550 nm 的激光对 33.5 m 外的转动目标进行成像。距离-多普勒域成像结果清晰地再现了目标特征。成像示例中, 距离向分辨率和正交距离向分辨率分别为 18 cm 和 1.576 kHz。

**关键词** 遥感; 合成孔径激光雷达; 相位调制; m 序列; 激光成像

**中图分类号** TN958 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.072801

## Real-Time Inverse Synthetic Aperture Ladar System Based on Continuous m-Sequence Phase Modulation

Huang Yuxiang<sup>1</sup>, Song Sheng<sup>1</sup>, Xu Weiming<sup>1</sup>, Hu Yihua<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China

**Abstract** A real-time data acquisition inverse synthetic aperture ladar system is designed. The continuous m-sequence phase modulation method is employed to image a rotating target at a distance of 33.5 m by a 1550 nm laser with the average power of 2 W. The range-Doppler domain imaging result reveals the characteristic of the target, distinctly. In the imaging demonstration, the range resolution and the cross-range resolution are 18 cm and 1.576 kHz, respectively.

**Key words** remote sensing; synthetic aperture ladar; phase modulation; m-sequence; laser imaging

**OCIS codes** 280.6730; 120.0280; 060.5060

## 1 引 言

2002 年美国海军实验室研制了世界上第一个扫描式的二维合成孔径激光雷达系统<sup>[1]</sup>, 2009 年西安电子科技大学的郭亮等<sup>[2]</sup>研制了基于线性调频体制的对旋转目标成像的合成孔径激光雷达系统, 两套系统验证了合成孔径雷达在距离-距离域和距离-多普勒域成像的能力。不过受限于激光的线性调频技术, 这两套系统的实验均采用目标“一步一停”的运动方式。2011 年, 洛克马丁公司进行了脉冲重复频率 (PRF) 为 100 kHz、脉冲宽度为 20 ns、调制带宽为 7 GHz 的相位编码体制的机载实验<sup>[3]</sup>, 并给出了成像结果, 证实了实时推扫式的合成孔径激光成像雷达的可能性。

类似的合成孔径激光雷达系统的搭建与实验推动了成像算法的发展。2005 年美国空军实验室<sup>[4]</sup>以及 2009 年中国科学院电子学研究所的刘国国等<sup>[5]</sup>, 都使用 1550 nm 波长的激光, 并采用线性调频机制搭建了桌面演示实验装置, 最后给出了成像结果。

**收稿日期:** 2017-01-17; **收到修改稿日期:** 2017-04-03

**基金项目:** 国家 863 计划(2014AA7100012)

**作者简介:** 黄宇翔(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: hyx0408@126.com

**导师简介:** 胡以华(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光探测与成像技术方面的研究。

E-mail: yh\_hu@263.net(通信联系人)

特别地,中国科学院上海光学精密机械研究所刘立人带领的团队从空间衍射光学的角度分析了合成孔径激光雷达信号模型,并给出了对应的成像算法<sup>[6-11]</sup>。其设计的合成孔径激光成像雷达系统为大口径的合成孔径激光成像雷达提供了示例,并给出了该系统下一步一停的条带扫描模式成像实验与结果<sup>[12]</sup>。2017年,该团队给出了其机载直视合成孔径激光成像雷达外场实验结果,其最终成像分辨率在4 cm左右<sup>[13]</sup>。

平台振动补偿与激光宽带调制一直是合成孔径激光雷达的重要研究方向。2016年,中国科学院电子学研究所的杜剑波等从平台振动抑制的角度分析并仿真了机载合成孔径激光雷达成像<sup>[14]</sup>,并给出了一种理论上能实现三倍频的线性调频方式<sup>[15]</sup>。

2016年,笔者所在团队提出了基于连续  $m$  序列二进制相移键控(BPSK)调制的可进行实时数据采集的逆合成孔径激光雷达系统<sup>[16]</sup>,阐明了信号模型与成像原理,并进行了仿真验证。基于此,本文设计了一套实验系统并进行了实验。根据文献[16]中提出的理论回波信号模型,结合实验具体情况提出成像算法,首先进行正交距离向压缩,再进行多普勒频移相位补偿的距离向压缩。实验发现成像结果清晰且与成像目标符合。

## 2 实验系统与参数

逆合成孔径雷达系统采用旁轴收发系统,出射和接收口径平行,距离成像目标约为33.5 m。成像目标处激光光斑近似为直径为20 cm的圆,接收视场近似为直径为2.5 cm的圆。实验场景如图1所示。

成像目标实物如图2所示。3根宽度为1 cm的铜片分别固定在连接杆前后两侧,距离约为20.6 cm。

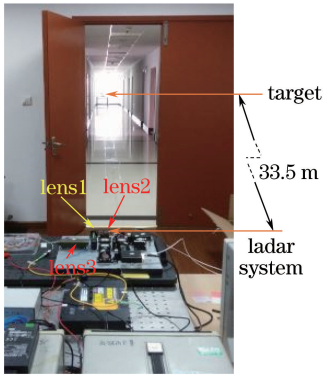


图1 实验场景

Fig. 1 Experimental environment

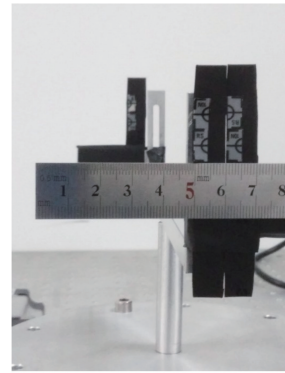


图2 目标实物图

Fig. 2 Target photo

成像目标几何示意图如图3所示。目标绕转轴中心线以0.26 rad/s的速度匀速转动。

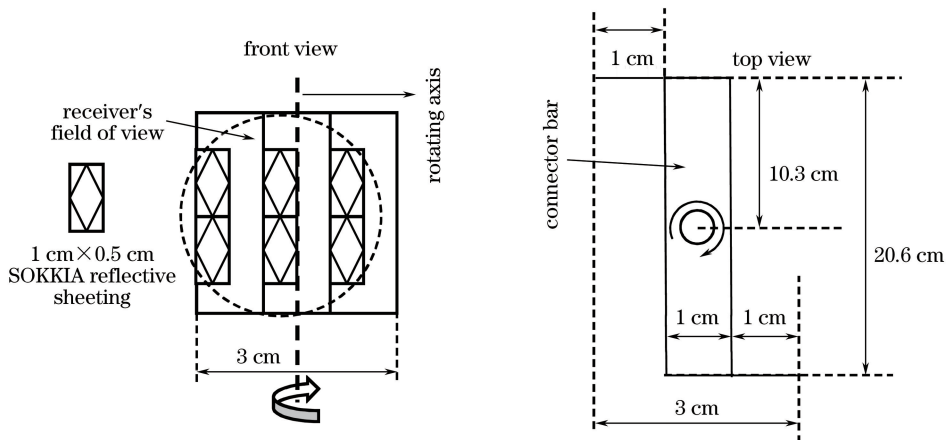


图3 目标几何示意图

Fig. 3 Target dimensional sketch

逆合成孔径激光雷达系统采用1550 nm激光、4095码元周期的  $m$  序列,码元调制速率为1 GHz,激光出射功率为2 W。自由空间光正交解调器输出的IQ两路电信号被信号采集器以5 GS/s的速率采集,每个

通道采样深度各为 5 MS。

逆合成孔径激光雷达系统如图 4 所示。1550 nm 激光从激光器中出射,通过 50:50 分束器后,一路由调制信号为连续  $m$  序列的光相位调制器调制,然后经激光放大器放大,最后通过激光准直器(lens1)出射;另一路则再次通过 50:50 分束器进行必要的能量衰减,接着通过扩束器(lens3),作为相干本振信号。自由空间光正交解调器的视场角非常小,在 33.5 m 处的有效口径不足以进行实验,因此,实验系统中接收光学设备使用口径约为 1 cm 的扩束器(lens2)。此外,系统中各光学部件,除自由空间光正交解调器外,均采用保偏单模光纤连接。系统采用连续的同相的  $m$  序列作为相位调制源,并确保采样速率为码元调制速率的整数倍,这使得系统在实时收发中无需依靠快速光开关来分离脉冲阵列。

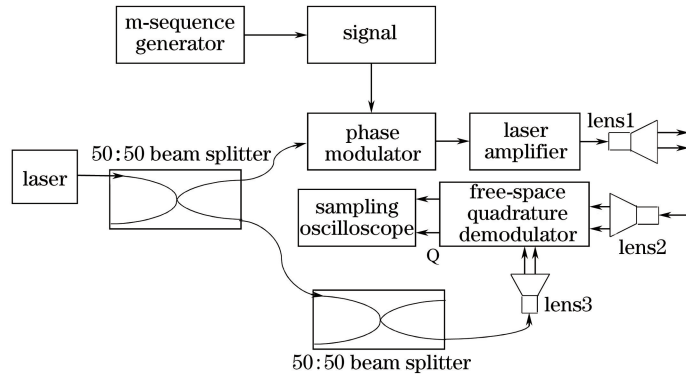


图 4 逆合成孔径雷达系统示意图

Fig. 4 Sketch of inverse synthetic aperture lidar system

此外,为了更好地显示成像分辨率,成像选用了如图 5 所示目标状态下的观测数据。此状态下,目标主要的三个特征散点正好被接收视场完全覆盖,且各个特征散点的回波信号的雷达接收效率也相近。现约定正交距离向为  $x$  轴,距离向为  $y$  轴。

系统参数总结如表 1 所示。

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

Parameter	Value
Laser wavelength $\lambda_0$ /nm	1550
Laser spot diameter at target /cm	$\sim 20$
Receiver's field of view diameter at target /cm	$\sim 2.5$
Imaging target distance /m	33.5
Target rotating rate $\omega$ /( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0.26
Number of m-sequence periods $N_1$	155
Length of m-sequence $N_2$	4095
m series code frequency $f_c$ /GHz	1
Signal sampling frequency $f_s$ /( $\text{GS}\cdot\text{s}^{-1}$ )	5
Photo balance detector bandwidth $B$ /MHz	800
Real target cross-range resolution $\Delta y$ /mm	5

### 3 成像方法与结果

条件 1:正交距离向可直接压缩而无需额外相位补偿。一种显然满足的情况为转动目标在距离-多普勒域成像,目标转动速度为常数。

条件 2:在合成孔径时间内,距离向徙动也远远小于距离向精度。判决表达式为:

$$\frac{N_1 N_2 \omega |x|_{\max}}{f_c} \ll \frac{c}{2f_s} \quad (1)$$

满足条件 1 和条件 2 使得先进行正交距离向压缩、而后进行距离向压缩成为可能。

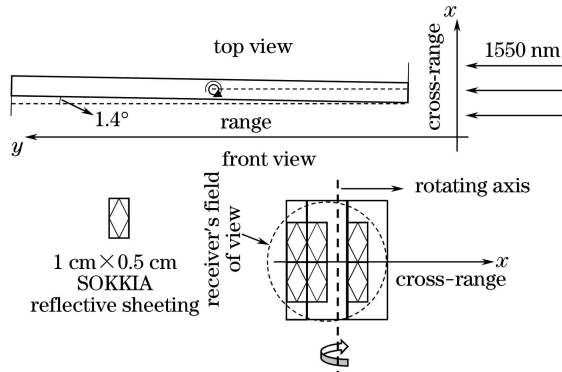


图5 激光雷达观测时的目标状态

Fig. 5 Target state under ladar detection

同时满足条件 1 和条件 2 的单点  $p_n$  回波信号经采集后,可表示为:

$$S_r(p_n, n) = A_{p_n} \text{rect}\left(\frac{n}{5N_2N_1}\right) c_{N_2} \left\lfloor \frac{n}{5} \right\rfloor \exp\left(j \frac{2}{5} \pi f_d n \frac{1}{f_s}\right), \quad (2)$$

式中  $\text{rect}(n)$  为起始点为 0、长度为 1 的方波信号;  $c_{N_2}(n)$  为实验所用  $N_2$  长的  $m$  序列的第  $n$  个码元值,并且  $c_{N_2}(n) = c_{N_2}(n + N_2)$ ,  $c_{N_2}(n)$  的取值为  $\pm 1$ ;  $\lfloor n/5 \rfloor$  表示对  $n/5$  向下取整;  $A_{p_n}$  代表  $p_n$  点回波信号强度,  $f_d$  代表  $p_n$  点的多普勒频移。

系统实时采集数据为时间上连续的一维数据,对于一段截取的数据可根据采集速率和码元调制速率进行方位向和正交方位向的分割。首先对连续采集到的一维实验数据进行二维重构,重构后数据幅值如图 6 所示。

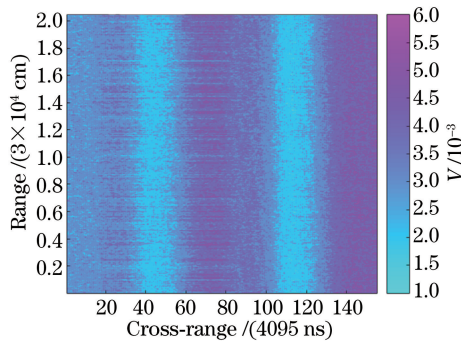


图6 重构后的二维数据

Fig. 6 Reshaped two-dimension datum

将  $n = i + 5N_2k$  代入(2)式,重排后的单信号  $p_n$  回波信号即可重写为:

$$S_r(p_n, i, k) = A_{p_n} c_{N_2} \left\lfloor \frac{i}{5} \right\rfloor \exp\left(j \frac{2}{5} \pi f_d i \frac{1}{f_s}\right) \cdot \exp\left(j 2\pi f_d N_2 k \frac{1}{f_s}\right), \quad (3)$$

式中  $i$  表示行号,  $i = 0, 1, \dots, 5N_2 - 1$ ;  $k$  表示列号,  $k = 0, 1, \dots, N_1 - 1$ 。

接着进行正交距离向压缩,即对每行数据分别做离散傅里叶变换(DFT),结果如图 7 所示。此时(3)式中,仅最后一项与  $k$  相关,且相位系数中  $f_d$  与  $p_n$  点的正交距离向成正比,即  $f_d \approx 2\omega x / \lambda_0$ 。

$$S'_r(p_n, i, m) = \sum_{k=0}^{N_1-1} S_r(p_n, i, k) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N_1} km\right) = A_{p_n} c_{N_2} \left\lfloor \frac{i}{5} \right\rfloor \exp\left(j \frac{2}{5} \pi f_d i \frac{1}{f_s}\right) \frac{1 - \exp[-j 2\pi(m/N_1 - f_d N_2 / f_s) N_1]}{1 - \exp[-j 2\pi(m/N_1 - f_d N_2 / f_s)]}, \quad (4)$$

式中  $m$  为信号经离散傅里叶变换后的系数,代表了频率。(4)式最后一项表示  $m_{p_n} \approx f_d N_1 N_2 / f_s$  时取得主峰极大值,从距离-多普勒域上来看,此时对于  $p_n$  而言,能量将集中于  $f_d$  附近。

多普勒频移与正交距离向时间呈傅里叶变换对是转动物体合成孔径正交距离向压缩的根本,但是在进

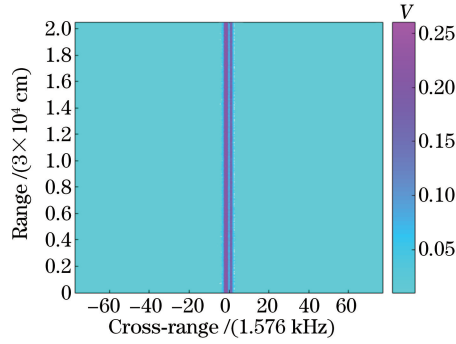


图7 正交距离向压缩结果

Fig. 7 Cross-range compression result

行距离向压缩时单个  $m$  序列周期内的多普勒频移却会使距离向压缩结果变差。但是基于良好的正交距离向压缩结果,在距离向压缩时就可以借助正交距离向压缩结果进行单  $m$  序列内多普勒频移相位补偿。从公式上来看就是要补偿(4)式中  $\exp\left(j\frac{2}{5}\pi f_d i \frac{1}{f_s}\right)$  这一项,具体补偿为:

$$S''_r(p_n, i, m) = S'_r(p_n, i, m) \exp\left(-j2\pi \frac{m p_n i}{5N_1 N_2}\right), \quad (5)$$

式中  $i$  为行号,  $m$  为列号。

从点的集合看,采集的信号为各单点的信号和,于是每个不同正交距离向的点的理想距离向压缩相位补偿的  $m p_n$  都不同,因此无法直接用公式对回波信号(散射中心点的回波信号和)直接进行相位补偿。但是在允许主峰附近带有微量的多普勒频移带来的相偏的条件下,可改用公式补偿,即:

$$S''_r(i, m) = \exp\left(-j2\pi \frac{mi}{5N_1 N_2}\right) \sum_{p_n} S'_r(p_n, i, m). \quad (6)$$

经过(6)式补偿后的数据,在对任何  $p_n$  而言,非峰值处都有  $\exp[-j2\pi(\Delta mi/5N_1 N_2)]$  的相偏,且离峰值点越近相偏越小,这很符合预期目标。现在可以使用统一的距离向压缩滤波器进行距离向压缩。最终成像结果如图8所示。

从图8可以看到,原本能量散落在整个信号空间之中的特征散点,通过合成孔径成像技术后,其能量又重新聚集在一起,从而特征散点再次被凸显出来。能量集中部分局部放大如图9所示。

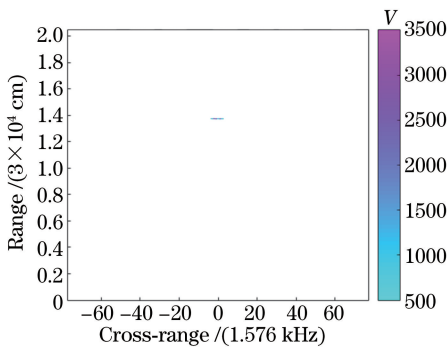


图8 成像结果

Fig. 8 Imaging result

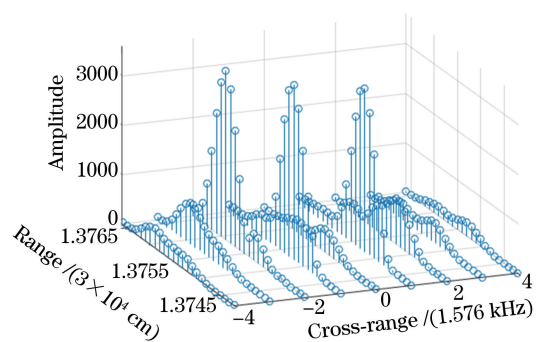


图9 局部放大成像结果

Fig. 9 Partial enlarged view of imaging result

从理论上来说,目标正交距离向分离特征散点的最大多普勒分辨率可计算为:

$$\Delta f_{\max} = \Delta y \frac{2\omega}{\lambda_0}, \quad (7)$$

计算可得  $\Delta f_{\max}$  约为 1.677 kHz。数据处理时,正交距离向多普勒域的分辨率为 1.576 kHz。因此,理论上能够分辨出目标的三个特征散点。实际上,可以清晰看到,在正交距离向的多普勒域,图9的三个特征散点与图5中激光雷达观测时的目标正视图所描述的三个特征散点一一对应。

为了说明距离向分辨率,对图 9 数据进行全局归一化,并计算 dB 值,处理后数据的等高线如图 10 所示。此外,为了能明确地展现 6 dB 带宽,图 10 对距离向数据进行了与各正交距离向一致的下移。图 10 还给出了三个特征散点的峰值数据,以及距离向上两侧最为接近 -3 dB 的点的坐标与值。

理论上来说,距离向分辨率取决于距离向接收信号带宽。实验中,使用 1 GHz 的 m 序列相位编码信号,其带宽略大于 1 GHz,但是由于光平衡探测器带宽为 800 MHz,从而使距离向接收信号带宽为 800 MHz。距离向分辨率可估算为:

$$\Delta R \approx \frac{c}{2B}, \quad (8)$$

(8)式估算结果为 18.75 cm。实际上,图 10 所示的数据表明,距离向分辨率略优于 18 cm,基本与理论一致。导致两者有所不同的原因:(8)式所用信号时频带宽乘积为 1,而实验所用信号时频带宽乘积略小于 1。

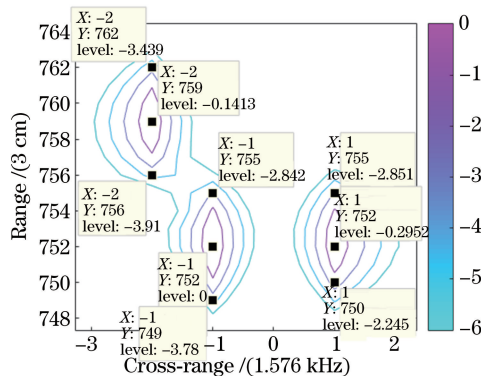


图 10 归一化数据等高图

Fig. 10 Contour map of normalized datum

此外,在 3 cm 距离向精度的条件下,图 10 距离向前后峰值间距 21 cm 也反映了实物前后散点距离 20.6 cm 的事实。

## 4 结 论

本研究给出一个实时数据采集的逆合成孔径激光雷达桌面系统成像示例。逆合成孔径激光雷达采用合成孔径技术使得成像理论分辨率与距离无关。在条件 1 与条件 2 成立的情况下,成像算法首先进行正交距离向压缩,再以此进行了单 m 序列周期内多普勒频移相位补偿的距离向压缩。成像结果清晰且与目标特征相符合。所给出的逆合成孔径激光雷达系统成像示例在距离-多普勒域分辨率分别为 18 cm 和 1.576 kHz。

为了实现更高精度的成像,需要研究与设计高信噪比的 5 GHz 或更高带宽的 m 序列信号发生器与平衡探测器,以获得更高精度的距离向分辨率。理论上来说,对于 1 GHz 码元调制率,接收器只需要 1 GS/s 的采集率,但是由于系统带宽往往有限,所以通常需要更高(3~10 倍)的采样率。高采样率使得长时间的观察变得极其困难。不过在距离向或正交距离向压缩成像点稀疏的情况下,压缩感知将会大大减少数据采集量。此外,为了说明系统的合理性和可行性,并论证距离向与正交距离向分辨率,本研究采用了匀速转动物体作为成像目标,但是在实际情况中,目标运动往往是不可预测的,于是运动补偿算法仍需获得进一步的探讨与研究。

## 参 考 文 献

- [1] Bashkansky M, Lucke R L, Funk E E, *et al.* Synthetic aperture imaging at 1.5  $\mu$ : laboratory demonstration and potential application to planet surface studies[C]. *Astronomical Telescopes and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, 2002: 48-56.
- [2] Guo Liang, Ma Yujie, Xing Mengdao, *et al.* Design on the experiment optical system of synthetic aperture imaging lidar[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2009, 38(2): 290-294.  
郭亮, 马瑜杰, 邢孟道, 等. 合成孔径成像激光雷达旋转目标成像[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 290-294.

- [3] Krause B, Buck J, Ryan C, *et al.* Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]. CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 2011: PDPB7.
- [4] Buell W, Marechal N, Buck J, *et al.* Demonstration of synthetic aperture imaging lidar[C]. Defense and Security. International Society for Optics and Photonics, 2005: 152-166.
- [5] Liu Guoguo, Wu Jin, Zhu Bingqi, *et al.* Nonlinear degradation and compensation on range resolution in synthetic aperture lidar experiment[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(9): 934-938.  
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.
- [6] Liu Liren. 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. 合成孔径激光成像雷达( 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.
- [7] Liu Liren. Synthetic-aperture lidar( 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.
- [8] Liu Liren. Synthetic aperture lidar( 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.
- [9] Liu Liren. Synthetic aperture imaging lidar( IV ): unified operation mode and two-dimensional data collection equation [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 1-6.  
刘立人. 合成孔径激光成像雷达( IV ): 统一工作模式和二维数据收集方程[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 1-6.
- [10] Liu Liren. Synthetic aperture imaging lidar( V ): imaging resolution and antenna aperture function[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1408-1415.  
刘立人. 合成孔径激光成像雷达( V ): 成像分辨率和天线孔径函数[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1408-1415.
- [11] Liu Liren. Synthetic aperture imaging lidar( VI ): space-time speckle effect and heterodyne signal-to-noise ratio[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2326-2332.  
刘立人. 合成孔径激光成像雷达( VI ): 时空散斑效应和外差探测信噪比[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2326-2332.
- [12] 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.  
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.
- [13] Lu Zhiyong, Zhou Yu, Sun Jianfeng, *et al.* Airborne down-looking synthetic aperture imaging lidar field experiment and its flight testing[J]. Chinese J 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.
- [14] Du Jianbo, Li Daojing, Ma Meng, *et al.* Vibration estimation and imaging of airborne synthetic aperture lidar based on interferometry processing[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(9): 0910003.  
杜剑波, 李道京, 马 萌, 等. 基于干涉处理的机载合成孔径激光雷达振动估计和成像[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0910003.
- [15] Du Jianbo, Li Daojing, Ma Meng. Research on wideband signal generation for lidar[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(11): 1114003.  
杜剑波, 李道京, 马 萌. 激光雷达宽带信号产生方法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1114003.
- [16] Huang Yuxiang, Zhang Hongyi, Li Fei, *et al.* Phase modulated lidar imaging design and simulation analysis[J]. Infrared & Laser Engineering, 2017, 46(5): 506002.  
黄宇翔, 张鸿翼, 李 飞, 等. 相位调制激光雷达成像设计及仿真分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 506002.