

远距离高分辨激光成像雷达技术

金晓峰¹ 张鹏¹ 刘春华¹ 孙建锋² 刘立人²

¹ 洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009

² 中国科学院上海光学精密机械研究所 中国科学院空间激光通信与检验技术重点实验室, 上海 201800

摘要 星载和机载远距离目标的高分辨成像一直是科研人员不断追求的目标,为了突破远距离光学系统孔径衍射受限的问题,国内外先后发展了多种激光成像雷达技术。着重介绍了基于“点发射、面照射、点接收”工作模式来实现远距离目标高分辨成像的四种激光成像雷达基本原理,给出了这几种类型激光成像雷达的国内外实验和工程化进展程度,并进行了相应的比较。

关键词 遥感; 远距离高分辨; 合成孔径; 菲涅耳望远镜; 反射层析; 基于稀疏约束的关联成像雷达; 激光成像雷达
中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.050002

Techniques on Long-Range and High-Resolution Imaging Lidar

Jin Xiaofeng¹ Zhang Peng¹ Liu Chunhua¹ Sun Jianfeng² Liu Liren²

¹ Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, Luoyang, Henan 471009, China

² Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Techniques of spaceborne and airborne high-resolution imaging for long-range target are always the goals of researchers. To break through the diffraction limitation of optical aperture system, several imaging lidar techniques are developed at home and abroad. Four types of imaging lidar principle based on “point emitting, area irradiating, point receiving” are given. The corresponding experimental and engineering achievements are introduced and compared.

Key words remote sensing; long-range and high-resolution; synthetic aperture; Fresnel telescope; reflective tomography; ghost imaging lidar via sparsity constraints; imaging lidar

OCIS codes 280.6730; 280.3640; 100.6640

1 引言

传统的远距离目标成像技术一直面临着光学系统孔径衍射受限问题^[1]。在无像差光学系统中或者系统像差足够小时,光学系统有效孔径的衍射决定了系统的最高空间成像分辨率^[2]。衍射受限系统的角分辨率可由 $\theta = 2.44 \frac{\lambda}{D}$ 来表征,其中 λ 为波长, D 为光学系统有效孔径。一般情况下可以通过增大光学系统孔径来提高成像分辨率。在远距离激光成像雷达探测中,假若波长采用 1550 nm,距离 1000 km,要达到厘米级的空间成像分辨率,光学系统的有效孔径 D 应该等于 37.8 m,这在实际上是难以实现的,因而必须采用其他手段来实现远距离目标的高分辨成像。

目前已发展的基于“点发射、面照射、点接收”工作模式的远距离高分辨激光成像雷达技术以合成孔径激光成像雷达(SAIL)技术、菲涅耳望远镜全孔径合成激光成像雷达技术、反射层析激光成像雷达技术和基于稀疏先验约束的关联成像(GISC)激光雷达技术为主。“点发射、面照射、点接收”工作模式是指在实际远距离探测情况下,可以忽略收发望远镜天线孔径,即发射激光光源为点源,照亮目标部分区域,接收的回波信号为以照射区域为面源的反射回波信号在探测器位置的叠加。该类技术有别于传统的光学透镜成像方法和扫

收稿日期: 2012-12-25; 收到修改稿日期: 2013-02-18; 网络出版日期: 2013-05-06

作者简介: 金晓峰(1985—),男,博士,工程师,主要从事激光雷达与光学系统总体研究等方面的研究。

E-mail: eoei@vip.sina.com

描成像方法,只需单个探测器对目标回波进行一维时间流信号的获取,采用相应的数据处理方法可重构目标的二维图像。本文较全面地介绍了这四种类型远距离高分辨激光成像雷达的基本原理和国内外进展情况。

2 合成孔径激光成像雷达

2.1 基本原理

合成孔径激光成像雷达在距离向聚焦成像采用频率线性啁啾激光外差接收解斜方法,在方位向的聚焦成像采用相干孔径合成的方法。其中距离向分辨率为

$$\delta y = \frac{c}{2B}, \quad (1)$$

式中 c 为光速, B 为激光器发射的线性调频脉冲信号带宽;方位向分辨率为

$$\delta x = \frac{\lambda R}{2D_{SA}}. \quad (2)$$

式中 D_{SA} 为一个合成孔径长度, λ 为激光波长, R 为激光发射端到目标端的距离。条带式合成孔径激光成像雷达单个点目标在距离向和方位向分别实现聚焦的流程示意图如图 1 所示,具体成像数学公式可参见文献[3~8]。雷达作直线运动,步进间隔为 ΔL_1 ,光学足迹沿目标平面扫描。雷达在位置 S_m 处发射线性调频啁啾脉冲信号,探测器记录此位置处的外差回波一维时间流信号作为此位置的目标回波信号(接收到的回波信号为时间流信号,并非真实图像信号),然后雷达移动到下一个位置 S_{m+1} 处。重复以上操作,最终获取整个合成孔径长度 D_{SA} 内不同方位位置上的目标回波信号,组成距离向和方位向上的外差回波信号二维数据矩阵,如图 2 所示。其中 τ 为时间延迟, Δf 为目标点对应中频信号。

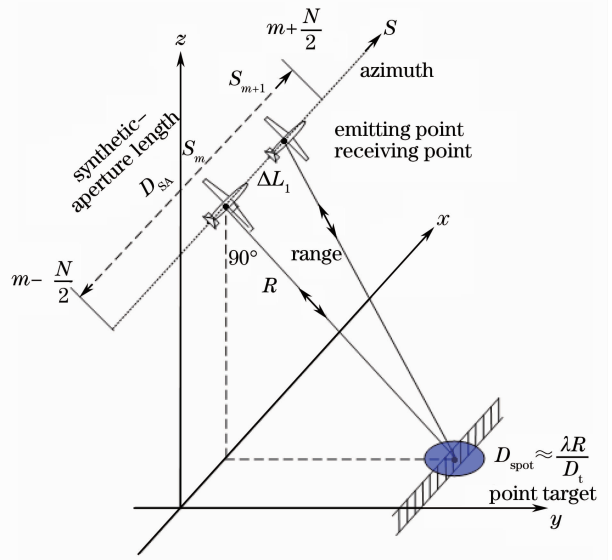


图 1 SAIL 成像基本原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of SAIL imaging

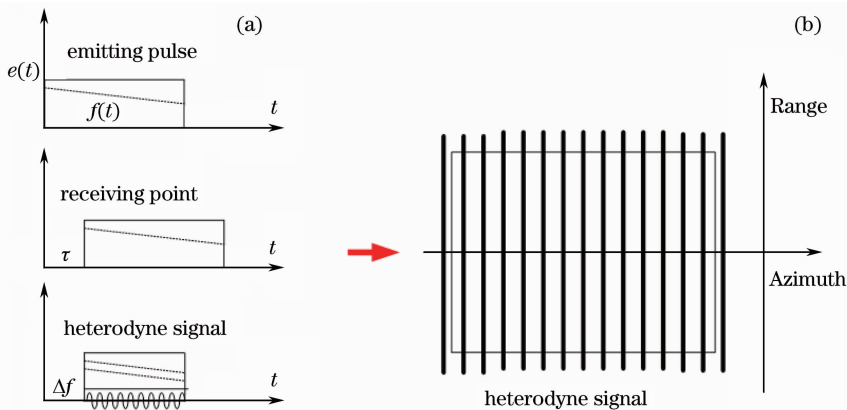


图 2 (a) 单个方位 SAIL 外差探测; (b) 多个方位向上目标外差回波信号检测

Fig. 2 (a) Heterodyne detection of single azimuth direction; (b) heterodyne echo signal detection of several azimuth directions

如图 3 所示,在距离向上对外差回波信号进行快速傅里叶变换(FFT)操作,从而可以实现点目标与雷达距离对应的外差中频信号的聚焦,即完成距离向的压缩。如图 4 所示,在方位向上采用相位二次项匹配滤波的方法,根据点目标的相位历程实现方位向的聚焦,完成回波信号中单点目标的聚焦,得到一幅完整的点目标图像。

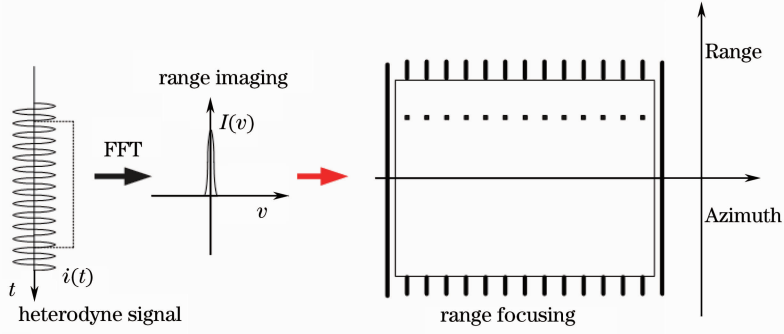


图 3 SAIL 距离向聚焦压缩成像示意图

Fig. 3 Diagram of focusing condensation imaging of SAIL range direction

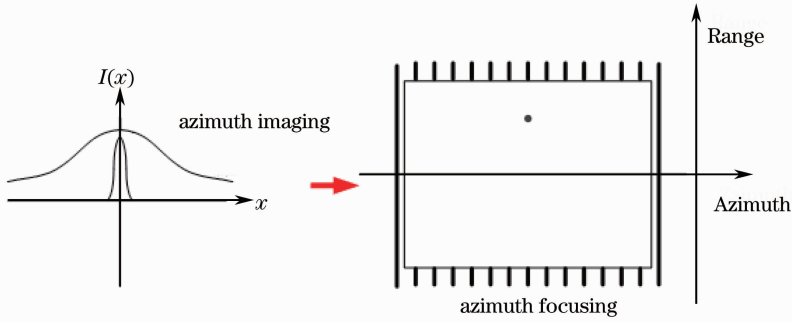


图 4 SAIL 方位向聚焦压缩成像示意图

Fig. 4 Diagram of focusing condensation imaging of SAIL azimuth direction

2.2 国内外进展

尽管合成孔径激光成像雷达的思想是从微波合成孔径雷达^[9,10]发展而来的,但由于波段从微波过渡到光波,其波长降低了5个数量级左右,因此在物理本质上呈现了光学波段的特性。加之光频器件和电子器件原理不同,产生了空间域和时间域新的光学问题。微波合成孔径雷达的原理和方法并不能简单地或者直接地应用到合成孔径激光成像雷达。2002年,美国海军实验室取得了合成孔径激光成像雷达的核心关键技术突破,实现了世界上第一个扫描式二维逆合成孔径激光雷达成像^[10,11]。所采用光源为外腔单模可调谐激光器,激光发射波长为1.55 μm,调啾速率为10 nm/s。入射光通过光纤耦合分束,一路照射目标,另一路用于参考光路和氧化氢盒脉冲啾啾频率触发相位同步。目标由三个字母“NRL”组成,表面分别覆盖反射材料,放置在与入射光成45°的铝盘表面。发射端有效孔径为150 μm,方位向上采用50 μm一步一停的发射接收

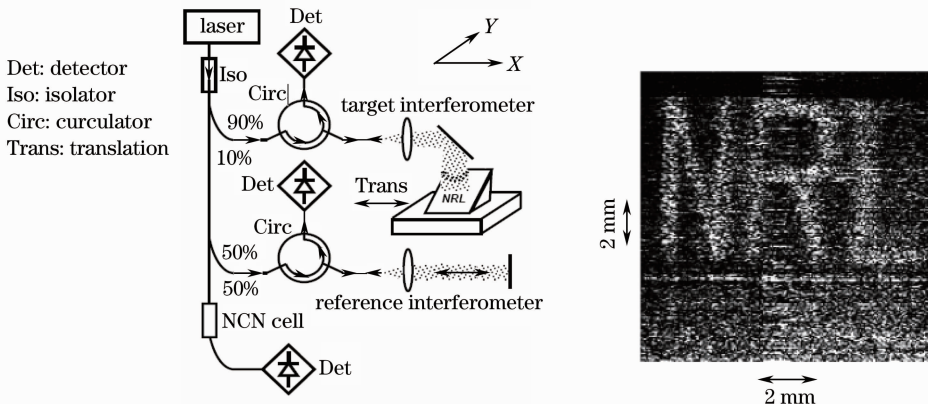


图 5 美国海军实验室逆合成孔径激光成像雷达示意图及其室内成像结果

Fig. 5 Schematic and indoor imaging result of inverse SAIL of US Navy Lab

探测方式,最终成像距离向分辨率为 $170\ \mu\text{m}$,方位向分辨率为 $90\ \mu\text{m}$,如图 5 所示。此实验中要求参考光路与实际目标光路距离完全匹配。

2005 年,美国空军实验室第一次用移动的孔径实现对固定漫反射目标的合成孔径激光雷达成像^[12],如图 6 所示。辐射源采用 $1.55\ \mu\text{m}$ 的半导体光纤激光器,此实验相对于海军实验室的另一改进点在于并不要求参考光路与实际目标光路的完全匹配,而是通过参考通道的一阶相位误差来推导目标信号中的相位^[13],实现目标图像良好的聚焦。

2006 年,SALTI(Synthetic Aperture Ladar for Tactical Imaging)项目的承包商雷声公司和诺斯罗普·格鲁曼公司分别进行了机载合成孔径激光雷达实验^[14,15],成功生成了目标图像,两家公司的技术方案如图 7 所示,但并没有公开报道其机载实验成像结果。

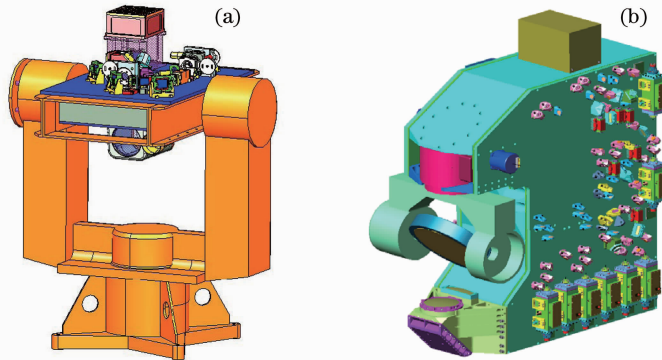


图 7 (a)雷声公司和(b)诺斯罗普·格鲁曼公司雷达技术方案对比

Fig. 7 Lidar Schemes of (a) Raytheon Corporation and (b) Northrop Grumman Corporation

2011 年,美国洛克希德·马丁公司第一次公开报道了采用 $1.55\ \mu\text{m}$ 光纤激光器和掺铒光纤放大器进行的机载合成孔径激光成像雷达实验^[16-18]。其采用的啁啾脉冲宽度为 $20\ \text{ns}$,重复频率为 $100\ \text{kHz}$,探测端采用外差平衡正交接收方式。飞机飞行速度为 $55\ \text{m/s}$,飞行高度 $1100\ \text{m}$,距离目标 $1600\ \text{m}$ 。激光器从飞机侧面发出光束,其照明方向与地面目标成 45° 夹角,如图 8 所示。目标由反射材料上面覆盖洛克希德·马丁公司徽标的黑色胶带组成。最终达到的距离向分辨率为 $2\ \text{cm}$,方位向分辨率为 $3.3\ \text{cm}$,相对于 $1\ \text{m}$ 的光斑大小提高了 30 倍,如图 9 所示。

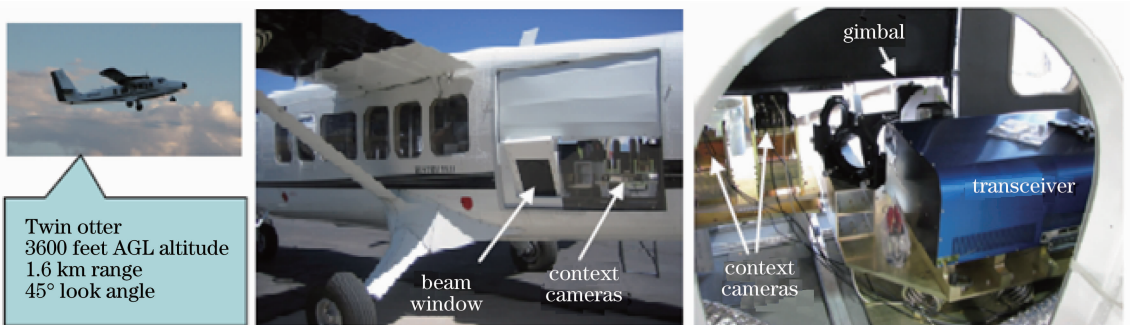


图 8 美国洛克希德·马丁公司机载 SAIL 实验样机

Fig. 8 Airborne SAIL prototype of US Lockheed Martin Corporation

国内方面,先后有多家单位开展合成孔径激光成像雷达理论和技术的研究,如中电集团二十七所^[19]、中国科学院电子学研究所^[20,21]、西安电子科技大学^[22,23]等多家科研院所和高校^[24]。2009 年,中国科学院上海光学

精密机械研究所(SIOM)采用空间光学结构实现了室内的合成孔径激光成像雷达实验,是国内首次成功的实验报道,为世界上第三幅合成孔径激光成像雷达图像^[25~30]。光源采用 $1.55\ \mu\text{m}$ 单模可调谐半导体激光器,激光波长啁啾范围 $1538.5\sim 1541\ \text{nm}$,扫描速率 $100\ \text{nm/s}$ 。2011年,该课题组设计研制出一种模拟探测距离为 $50\ \text{km}$ 的 $\Phi 300\ \text{mm}$ 孔径的合成孔径激光成像雷达演示样机。经实验室空间近距离内成像性能演示实验验证,该样机可在 $14\ \text{m}$ 传输距离上实现动态二维合成孔径激光成像雷达成像,测试成像分辨率值优于 $1.4\ \text{mm}$ (方位向) $\times 1.2\ \text{mm}$ (距离向),如图 10 所示。这是国内首次实现大尺度合成孔径激光成像雷达图像动态二维输出的报道,为未来的机载合成孔径激光成像雷达工程化奠定了坚实的基础。

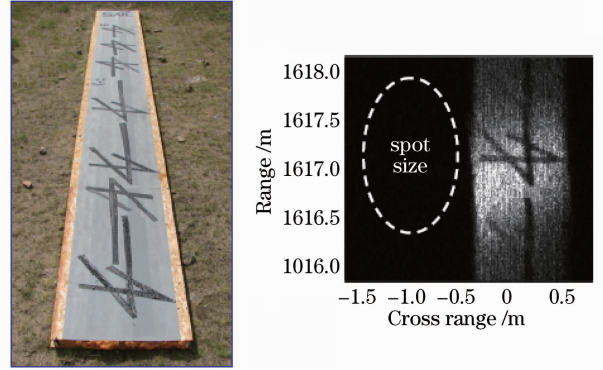


图 9 美国洛克希德马丁公司机载合成孔径激光成像雷达成像结果

Fig. 9 Airborne SAIL imaging results of US Lockheed Martin Corporation

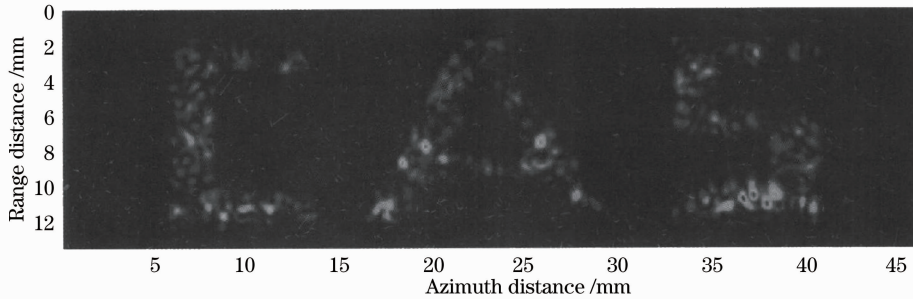


图 10 SIOM 合成孔径激光成像雷达室内成像结果

Fig. 10 SAIL indoor imaging results of SIOM

3 菲涅耳望远镜全孔径合成激光成像雷达

3.1 基本原理

菲涅耳望远镜全孔径合成激光成像雷达结合了傅里叶望远镜、光学扫描全息术和合成孔径的概念^[26],原理是对目标投射一个扫描的由两个同轴同心偏振正交的球面波组成的隐形干涉光斑,如图 11 所示。该方案是从光强投射到双光束场强投射和相干探测的原理上的重大发展,可以在整体光机电相对简单的情况下实现远距离目标的超光学衍射极限成像。

为了能够对任何一个目标点实施类似菲涅耳波带片分布的二维编码,对目标进行二维周期性扫描是必要的,因此菲涅耳望远镜激光成像雷达具有两种工作模式,即目标移动而光束作一维周期性扫描和目标静止而光束作二维周期性扫描,能够实现目标超光学分辨极限的二维成像并具有三维成像能力。目标和光束相对二维扫描将每个目标点的空间二维回波转化为时间流信号,接收端采用同轴相干接收,同时将目标点编码成为一个二维菲涅耳波带结构的复数二次项相位分布,最终通过处理器的匹配滤波重构出目标图像。

3.2 国内外进展

2012年,SIOM对菲涅耳望远镜全孔径合成激光成像雷达原理进行了相应实验室成像^[31],实验光路示意图如图 12 所示。实验使用的照明光源为 $532\ \text{nm}$ 的单频单模线偏振激光,目标距离为 $4.3\ \text{m}$,目标“光”字

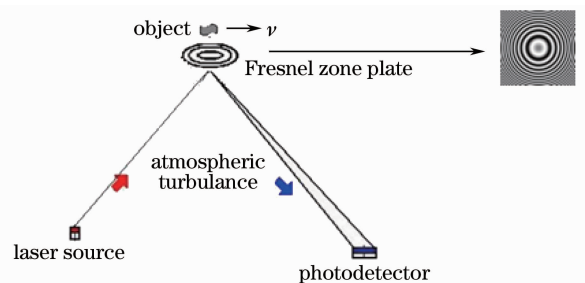


图 11 菲涅耳望远镜全孔径合成激光成像雷达原理示意图

Fig. 11 Diagram of Fresnel telescope full-aperture synthesized imaging lidar

符尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, 线宽约为 1 mm , 表面覆盖 3M 公司的反光材料, 实验成像结果如图 13 所示, 达到了预期的实验效果。实验中字符“光”的像上出现较强的光强不均匀现象是由散斑效应导致的。

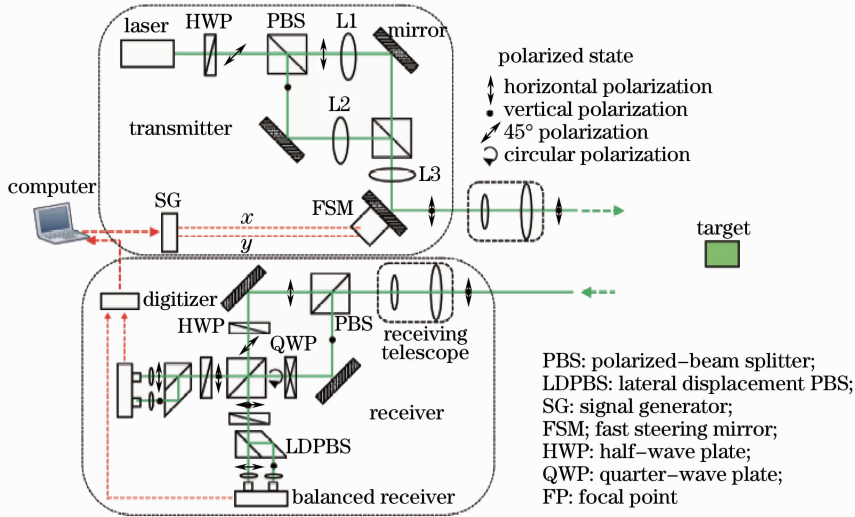


图 12 SIOM 菲涅耳望远镜全孔径合成激光成像雷达实验示意图

Fig. 12 Experimental setup of Fresnel telescope full-aperture synthesized imaging lidar in SIOM

菲涅耳望远镜全孔径合成激光成像雷达系统采用同轴二次项相位差双光束照明和二维相位二次项匹配滤波成像, 因而该成像雷达不仅是二维合成孔径激光成像雷达, 而且是一种同光路同时产生目标回波和目标点等效本振光束的差动合成孔径激光成像雷达体系^[26]。这种体系能够对于每个目标点同时进行信号和相位波动和补偿, 可以有效抑制相位波动和干扰的影响, 极大地降低了大气对于激光光束传输的影响。

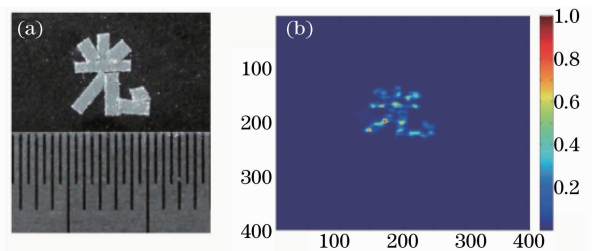


图 13 SIOM 菲涅耳望远镜合成孔径激光成像雷达实验成像结果。(a) 目标; (b) 成像结果

Fig. 13 Imaging results of Fresnel telescope full-aperture synthesized imaging lidar of SIOM. (a) Target; (b) imaging results

4 反射层析激光成像雷达

4.1 基本原理

反射层析激光成像雷达采用计算机层析(CT)原理^[26], 雷达与目标存在相对旋转, 雷达在目标正视剖面上 360° 范围内进行扫描, 收集不同角度下目标表面反射回波信息, 得到的重建图像是目标横截面轮廓像。该技术的空间成像分辨率与作用距离无关, 只与脉冲宽度、探测器的带宽和噪声有关, 不取决于接收孔径。

在反射层析激光成像雷达系统中, 根据目标旋转速度的快慢, 接收端可以获取距离分辨和多普勒分辨两种不同的反射投影信息^[32]。其中基于距离分辨的反射层析激光成像雷达在相干外差探测系统(啁啾脉冲测距)和非相干直接探测系统(短脉冲测距)均可实现不同角度下距离分辨的反射投影信息探测, 而基于多普勒分辨的反射层析激光成像雷达只能在相干外差探测系统中获取反射投影信息。

4.2 国内外进展

由于反射层析激光成像雷达在空间远距离高分辨成像的技术优势, 相继有多家军事研究所和大学参与了该系统的研究。1988 年起, 美国麻省理工学院(MIT)林肯实验室进行了基于距离分辨的反射层析激光成像雷达实验^[33~35], 采用直接探测方式, 以 10 cm 的距离分辨率 12.6 cm 采用滤波反投影算法实现距离 10 m 处的圆锥目标横截面图像重建, 如图 14 所示。

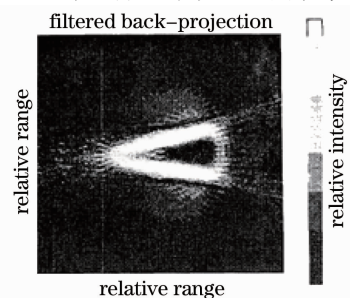


图 14 MIT 林肯实验室反射层析激光成像雷达重建图像
Fig. 14 Reconstructed image of reflective tomography imaging lidar of MIT Lincoln Lab

2001年,美国空军实验室采用 HI-CLASS (High performance CO₂ lidar surveillance sensor)相干二氧化碳激光雷达系统(如图 15 所示)^[36~43]对 514 km 处的在轨卫星 LACE 进行目标特征重构。激光波长 11.15 μm,单脉冲激光输出能量为 30 J,重复频率为 30 Hz,接收孔径为 60 cm。成像模式采用激光脉冲串,脉冲宽度为 1.5 ns,其间隔 40 ns,持续时间为 10 μs。通过对间隔约 6 m 的两个红外合作目标进行成像,成像分辨率约 0.2 m,成功验证了反射层析激光成像雷达对空间远距离目标高分辨成像的可能性,如图 16 所示。

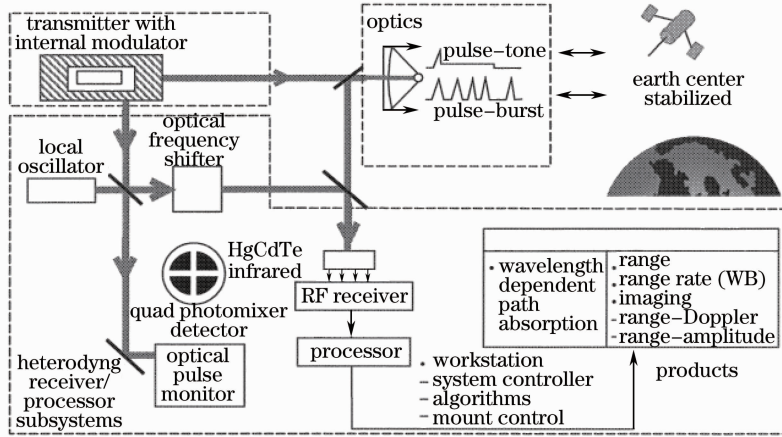


图 15 美国空军实验室 HI-CLASS 相干二氧化碳激光雷达示意图

Fig. 15 Diagram of HI-CLASS coherent CO₂ lidar system of US Air-Force Lab

2010年,美国 Longmont 光学系统研发中心 Murray 等^[44]采用伪随机码脉冲串序列^[45~48]激光雷达系统(如图 17 所示),实现了远距离 22.4 km 的反射层析激光成像雷达目标图像重建,其成像分辨率可达到 15 cm,与传统孔径成像(接收孔径为 1 m)相比提高了近 10 倍,如图 18 所示。其优点还在于采用了高带宽、低峰值、紧凑而高效的光纤激光器和光电接收设备来提高距离分辨率,同时降低成本,减小雷达系统的尺寸和峰值功率。

在反射层析激光成像雷达中,目标图像重构需要反射投影图的正确对准,这是关键技术难点之一。对于空间探测目标,特别是运动目标来讲,由于雷达平台或者目

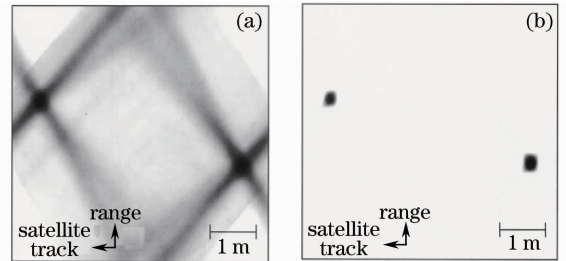


图 16 LACE 卫星反射镜重建图像。(a)滤波反投影重建图像;(b)阈值化处理

Fig. 16 Reconstructed image of LACE's satellite mirror. (a) Filtered back-projection; (b) threshold processing

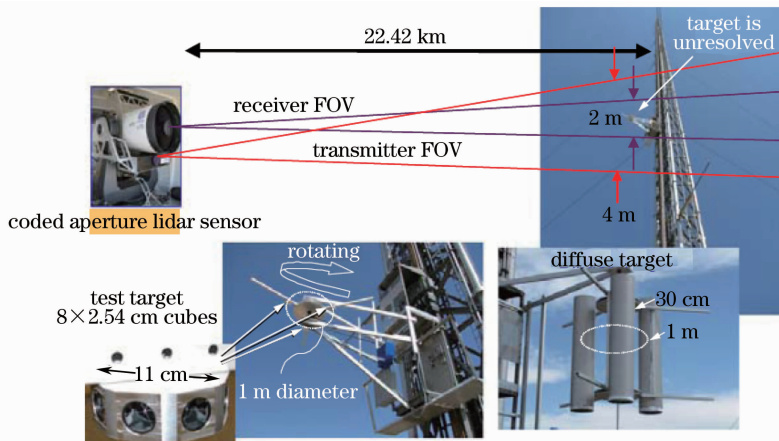


图 17 美国 Longmont 反射层析激光成像雷达结构图

Fig. 17 Diagram of reflective tomography lidar in US Longmont Lab

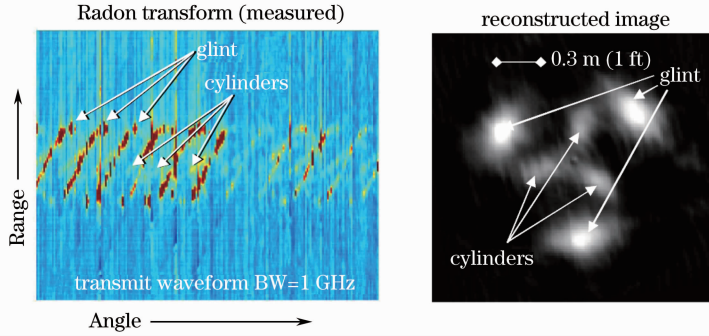


图 18 美国 Longmont 反射层析激光成像雷达目标重建图像

Fig. 18 Reconstructed image of reflective tomography lidar in US Longmont Lab

标的随机运动等因素的影响,获取的反射投影图数据很难控制在厘米量级内。因此,必须从投影图信息本身获知旋转中心信息,发展自动对准技术^[49,50]。

5 基于稀疏先验约束的关联成像激光雷达

5.1 基本原理

基于稀疏先验约束的关联成像激光雷达原理是利用光场的空间涨落分布和图像的稀疏与冗余表象特性获取目标图像信息来实现远距离目标的高分辨成像^[51]。一般来说,基于传统关联成像的激光雷达都具有双臂结构,如图 19 所示。脉冲激光器产生的相干光经过旋转的毛玻璃后产生具有空间和时间涨落的赝热光场,该光场经分束器(BS)分出目标臂和参考臂两束光路,这两路光具有一定的空间关联特性。在目标臂上,光场经过物镜到达目标,被目标反射的光子被望远镜系统接收,经过干涉滤光片由光电倍增管(PMT)探测;在参考臂上,光场经过透镜被 CCD 探测并记录其涨落分布。目标臂光电倍增管的探测时间流信号 \mathbf{Y} 是个一个 M 维的矢量,其中 M 为采样次数,对应于激光器发射脉冲个数;参考臂 CCD 的探测信号 \mathbf{A} 是一个 $M \times N$ 的矩阵,其中 N 为探测 CCD 的像素个数。目标臂测量信号 \mathbf{Y} 和参考臂测量信号 \mathbf{A} 可以通过空间关联特性建立起来关于目标 \mathbf{X} 的测量等式 $\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X}$ 。如果已知目标 \mathbf{X} 具有稀疏先验,即已知目标 \mathbf{X} 在表达基 Ψ 上的展开系数 α 是稀疏的,

$$\mathbf{X} = \Psi \cdot \alpha, \quad (3)$$

那么目标 \mathbf{X} 可以通过求解下列凸优化问题得到恢复:

$$\min \frac{1}{2} \|\mathbf{Y} - \mathbf{A}\mathbf{X}\|_2^2 + \tau \|\alpha\|_1 \quad \text{subject to } \mathbf{X} = \Psi \cdot \alpha, \quad (4)$$

式中 τ 是一个非负参数,而 $\|V\|_2$ 和 $\|V\|_1$ 分别表示参数 V 的欧几里得模和 l_1 模。

5.2 国内外进展

基于稀疏先验约束的关联成像激光雷达是近几年发展起来的一种新兴激光成像雷达系统。2009 年,基于关联成像结构的远距离遥感和预警的应用首次被提出^[52,53]。此时目标的恢复仍然基于传统关联计算,不但需要大量的采样次数,而且恢复结构的分辨率仍受限于光场的空间相干长度。同年,Katz 等^[54]提出将压缩感知技术^[55]应用在关联成像结构中,这为减少关联成像的采样次数起到重要作用。随后,关于应用稀疏信号获取与处理技术来提高关联成像质量和分辨率的研究也逐渐发展起来^[56~60]。2012 年,SIOM 首先给出

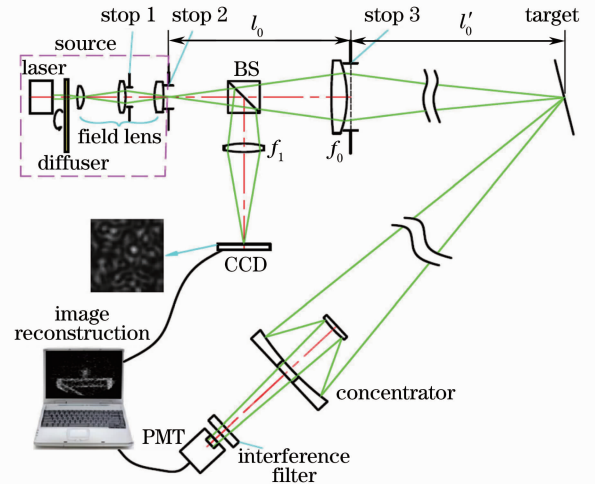


图 19 基于稀疏先验约束的关联成像激光雷达结构图

Fig. 19 Diagram of Ghost Imaging Lidar via Sparsity Constraints (GISC lidar) lidar

了基于稀疏先验约束的关联成像激光雷达的实验结果,如图 20 所示^[51],其中图 20(a)对应于距离 900 m 的反射目标成像结果,图 20(b)对应于距离 720 m 的自然目标(塔楼)成像结果。

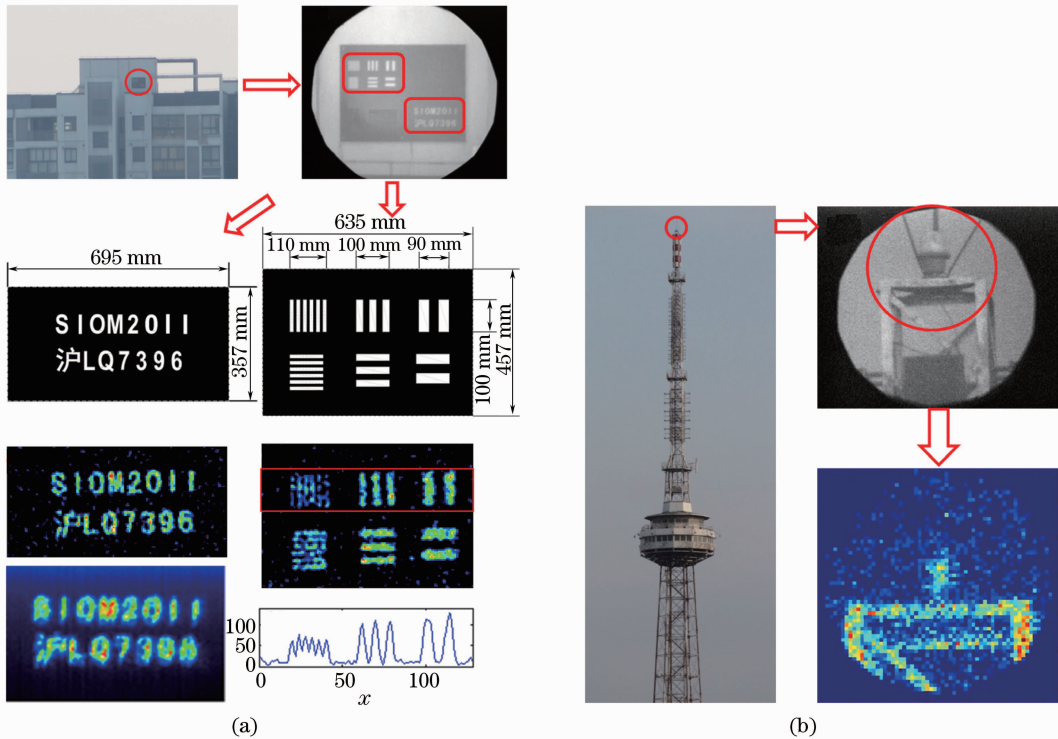


图 20 SIOM 所基于稀疏约束的关联成像雷达成像结果。(a) 900 m 距离高反射率目标成像结果(3000 次脉冲测量);
(b) 720 m 自然目标(塔楼)成像结果(3000 次脉冲测量)

Fig. 20 Imaging results of GISC lidar of SIOM. (a) High-reflection target at 900 m range (with 3000 measurements);
(b) natural target (the overhead target of a tower) at 720 m range (with 3000 measurements)

与此同时,应用关联成像结构在遥感方面的理论分析也逐步开展起来。目前,国际上已有一些关于大气湍流对于关联成像的影响理论分析、数值模拟和改善方法^[61~65],这些结果有助于提高该雷达技术在远距离成像方面的目标恢复质量。在基于稀疏先验约束的关联成像激光雷达技术中,光源的设计是十分重要的。目前该雷达技术主要是利用激光通过旋转的毛玻璃产生的赝热光场,实际上满足空间和时间涨落的自然光在理论上也可以作为该雷达的照明光源。美国的 Maryland 大学和美国陆军实验室首次发表了利用太阳光进行关联成像的实验结果^[66]。另一方面,为了摒弃传统关联成像结构中分束器和参考臂对雷达系统的限制,近几年提出了一些基于周期点光源阵列和稀疏阵赝热光照明系统的关联成像结构^[67,68]。这些主动照明结构的设计为这种基于稀疏先验的关联成像激光雷达指出了一种潜在的应用前景。

6 结束语

远距离高分辨激光成像雷达在军事侦查上可应用于星载、机载平台,实现对地对空远距离目标超光学衍射极限成像,因而深入研究和发​​展此类激光成像雷达具有重要意义。本文介绍了基于“点发射、面照射、点接收”工作模式的四种类型的激光成像雷达系统,分别给出了其对应的基本成像原理、工作模式、成像处理模式、关键技术难点、成像分辨率分析等参考因素,可总结如下。

合成孔径激光成像技术的难点在于啁啾差频的时间同步和相位历程的精确空间二次项的产生。该成像技术采用两轴相干处理,成像分辨率理论上为光学系统孔径的一半,适用于对地对空观察。非涅耳望远镜全孔径合成激光成像技术的难点在于目标延时距离的精确确定。该成像技术采用同轴相干处理,成像分辨率理论上为光学系统孔径的一半,适用于对地对空观察。反射层析激光成像雷达技术采用非相干处理,理论上的成像分辨率与作用距离无关,只与探测器带宽、脉冲带宽和噪声因素有关,适用于对地对空观察。基于稀

疏先验约束的关联成像激光雷达技术的难点在于远距离热光场的产生。该成像技术采用非相干处理,成像分辨率与目标稀疏程度、复杂程度和照明光场涨落特性有关,适用于对地对空观察。

国外合成孔径激光成像雷达技术和反射层析激光成像雷达技术已经走向工程化阶段,国内尚处于实验室阶段。菲涅耳望远镜全孔径合成激光成像雷达和基于稀疏约束的关联成像激光雷达属于近几年发展起来的新兴激光成像雷达系统,国内外尚处于实验室阶段,此两种类型激光成像雷达在克服大气干扰方面具有相当大的潜力。

参 考 文 献

- Joseph W. Goodman. Introduction to Fourier Optics (3rd ed.)[M]. Qin Kecheng, Liu Peisen, Chen Jiabi et al. Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011
Joseph W. Goodman. 傅里叶光学导论(第三版)[M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家壁 等译. 北京: 电子工业出版社, 2011
- Sun Jianfeng, Yan Aimin, Liu Dean *et al.*. Progress on long-range laser imaging lidar[J]. *laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(8): 49~54
孙建锋, 闫爱民, 刘德安 等. 远距离激光成像雷达进展[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(8): 49~54
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- J. C. Curlander, R. N. Mcdonough. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing[M]. Han Chuanzhao Transl.. Publishing House of Electronics Industry, 2006
J. C. Curlander, R. N. Mcdonough. 合成孔径雷达-系统与信号处理[M]. 韩传钊 译. 北京: 电子工业出版社, 2006
- M. Bashkansky, R. L. Lucke, E. Funk *et al.*. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(22): 1983~1985
- M. L. Bashkansky, L. Robert, Lee J. Rickard *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
- S. M. Beck, J. R. Buck, W. F. Buell *et al.*. Synthetic-aperture imaging laser radar; laboratory demonstration and signal processing[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(35): 7621~7629
- W. Buell, N. Marechal, J. Buck *et al.*. Demonstration of synthetic aperture imaging lidar[C]. *SPIE*, 2005, **5791**: 152~166
- J. Ricklin, M. Dierking, S. Fuhrer *et al.*. Synthetic Aperture Lidar for Tactical Imaging [R]. DARPA Strategic Technology Office, 2007
- J. C. Ricklin, P. G. Tomlinson. Active Imaging at DARPA[C]. *SPIE*, 2005, **5895**: 589505
- J. R. Buck, B. W. Krause, A. I. R. Malm *et al.*. Synthetic aperture imaging at optical wavelengths[C]. OSA/CLEO/IQEC, 2009. PTHB3
- D. J. Philip Gatt, Bert Bradford, Joe Marron *et al.*. Performance bounds of the phase gradient autofocus algorithm for synthetic aperture lidar[C]. *SPIE*, 2009, **7323**: 73230P
- Brian W. Krause, J. Buck, Chris Ryan *et al.*. Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]. OSA/CLEO, 2011. PDPB7
- Li Fan, Wu Shuangyang, Zheng Yongchao *et al.*. Overview of the development of synthetic aperture lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(1): 55~65
李 番, 邬双阳, 郑永超 等. 合成孔径激光雷达技术综述[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(1): 55~65
- Yang Lin. Research of Key Techniques of Synthetic Aperture Lidar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008

- 杨 林. 合成孔径激光雷达的关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008
- 21 Zhang Yun. Synthetic Aperture Ladar[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2006
- 张 云. 合成孔径激光雷达[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2006
- 22 Deng Yili. Study on Synthetic Aperture Ladar Technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2008
- 郑益丽. 合成孔径激光雷达技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008
- 23 Guo Liang. Study on Experiment and Algorithm of Synthetic Aperture Imaging Lidar[D]. Xi'an: Xidian University, 2009
- 郭 亮. 合成孔径成像激光雷达实验与算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009
- 24 Bureau of High-Tech Research and Development Chinese Academy of Sciences. Special edition of Space Optical and Electrical Technology (Issue of Synthetic Aperture Lidar Techniques)[C]. 2007
- 中国科学院高技术研究与发局. 空间光电科技专辑(合成孔径雷达技术专题)[C]. 2007
- 25 Liu Liren, Zhou Yu, Zhi Ya'nan *et al.*. A large-aperture synthetic aperture imaging ladar 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
- 26 Liu Liren. Fresnel telescope full-aperture synthesized imaging ladar: principle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0128001
- 刘立人. 菲涅耳望远镜全孔径合成成像激光雷达:原理[J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0128001
- 27 Zhou Yu, Sun Jianfeng, Luan Zhu *et al.*. Aperture-synthesizing experiment of a down-scaled synthetic aperture imaging ladar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2446~2448
- 周 煜, 孙建锋, 栾 竹 等. 尺度缩小合成孔径激光成像雷达的孔径合成实验[J]. 光学学报, 2008, **28**(12): 2446~2448
- 28 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu *et al.*. 2D imaging experiment of a 2D target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging ladar[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
- 29 Yu Zhou, Aimin Yan, Nan Xu *et al.*. A multi-purpose SAIL demonstrator design and its principle experimental verification [C]. *SPIE*, 2009, **7468**: 74680S
- 30 Yu Zhou, Yanan Zhi, Aimin Yan *et al.*. A synthetic aperture imaging ladar demonstrator with 300 mm antenna and changeable footprint[C]. *SPIE*, 2010, 7818: 78180T
- 31 Dai Enwen, Sun Jianfeng, Yan Aimin *et al.*. Demonstration of a laboratory Fresnel telescope synthetic aperture imaging ladar[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
- 32 R. M. Marino, R. N. Capes, J. K. Parker *et al.*. Tomographic image reconstruction from laser radar reflective projections [C]. *SPIE*, 1988, **999**: 248~263
- 33 J. K. Parker, E. B. Crag, D. I. Klick *et al.*. Reflective tomography: image from range-resolved laser radar measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(13): 2642~2643
- 34 F. K. Knight, D. Klick, D. P. Ryan-Howard *et al.*. Laser radar reflective tomography utilizing a steak camera for precise range resolution[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(12): 2196~2198
- 35 F. K. Knight, D. I. Klick, D. P. Ryan-Howard *et al.*. Visible laser radar: range tomography and angle-angle-range detection[J]. *Opt. Engng.*, 1991, **30**(1): 55~65
- 36 C. L. Matson, E. P. Magee, D. H. Stone. Reflective tomography for space object imaging using a short-pulselength laser [C]. *SPIE*, 1994, **2302**: 73~82
- 37 E. P. Magee, C. L. Matson, D. H. Stone. Comparison of techniques for image reconstruction using tomography[C]. *SPIE*, 1994, **2302**: 95~102
- 38 C. L. Matson, E. P. Magee, Donald E. Holland. Reflective tomography using a short pulse-length laser: system analysis for artificial satellite imaging[J]. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(9): 2811~2820
- 39 C. L. Matson. Tomographic satellite image reconstruction using ladar E-field or intensity projections: computer simulation results[C]. *SPIE*, 1995, **2566**: 166~176
- 40 C. L. Matson, J. K. Boger. Laboratory validation of heterodyne laser radar signal-to-noise expressions for intensity projection generation and image reconstruction[C]. *SPIE*, 1995, **2562**: 195~202
- 41 C. L. Matson. Reconstructed image signal-to-noise issues in range-resolved reflective tomography[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **137**(4-6): 343~358
- 42 James B. Lasché, C. L. Matson, Stephen D. Ford *et al.*. Reflective tomograph for imaging satellites experimental results [C]. *SPIE*, 1999, **3815**: 178~188
- 43 C. L. Matson, D. E. Mosley. Reflective tomography reconstruction of satellite features: field results[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(14): 2290~2296
- 44 James Murray, Gregory Fetzer, Ryan Epstein *et al.*. Tomographic Lidar [C]. OSA/ASSP/LACSEA/LS&C, 2010, LSWA1
- 45 N. Takeuchi, N. Sugimoto, H. Baba *et al.*. Random modulation CW lidar[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(9): 1382~1386

- 46 N. Takeuchi, H. Baba, K. Sakurai *et al.*. Diode-laser random-modulation CW lidar[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(1): 63~67
- 47 C. Nagasawa, M. Abo, H. Yamamoto *et al.*. Random modulation CW lidar using new random sequence[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(10): 1466~1470
- 48 Hyo Sang Lee, Ravi Ramaswami. Study of pseudo-noise CW diode laser for ranging applications[C]. *SPIE*, 1992, **1829**: 36~45
- 49 S. D. Ford, C. L. Matson. Projection registration in reflective tomography[C]. *SPIE*, 1999, **3815**: 189~198
- 50 Jin Xiaofeng. Research on Key Technologies of Imaging Ladar Based on CT Principles[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012
金晓峰. 基于 CT 原理的激光成像雷达关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2012
- 51 Chengqiang Zhao, Wenlin Gong, Mingliang Chen *et al.*. Ghost imaging lidar via sparsity constraints[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **101**(14): 141123
- 52 W. Gong, P. Zhang, X. Shen *et al.*. Ghost ‘pinhole’ imaging in Fraunhofer region[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(7): 071110
- 53 W. Gong, S. Han. Lens ghost imaging with thermal light: from the far field to the near field[J]. *Phys. Lett. A*, 2010, **374**: 3723~3725
- 54 O. Katz, Y. Bromberg, Y. Silberberg. Compressive ghost imaging[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(13): 131110
- 55 E. J. Candes, M. B. Wakin. An introduction to compressive sampling[J]. *IEEE Signal Process.*, 2008, **25**: 21~30
- 56 W. Gong, S. Han. Super-Resolution Far-Field Ghost Imaging via Compressive Sampling[OL]. e-print arXiv: 0911.4750 [Quant-ph]
- 57 S. Gazit, A. Szameit, Y. C. Eldar *et al.*. Super-resolution and reconstruction of sparse sub-wavelength images[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 23920~23946
- 58 Y. Shechtman, S. Gazit, A. Szameit *et al.*. Super-resolution and reconstruction of sparse images carried by incoherent light [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(8): 1148~1150
- 59 J. Du, W. Gong, S. Han. The influence of sparsity property of images on ghost imaging with thermal light[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(6): 1067~1069
- 60 Hui Wang, Shensheng Han, Mikhail I. Kolobov. Quantum limits of super-resolution via sparsity constraint[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(21): 23235~23252
- 61 J. Cheng. Ghost imaging through turbulent atmosphere[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(10): 7916~7921
- 62 P. Zhang, W. Gong, X. Shen *et al.*. Correlated imaging through atmospheric turbulence[J]. *Phys. Rev. A*, 2010, **82**(3): 033817
- 63 P. B. Dixon, G. A. Howland, K. W. C. Chan *et al.*. Quantum ghost imaging through turbulence[J]. *Phys. Rev. A*, 2011, **84**(5): 051803R
- 64 N. D. Hardy, J. H. Shapiro. Reflective ghost imaging through turbulence[J]. *Phys. Rev. A*, 2011, **84**(6): 063824
- 65 R. E. Meyers, K. S. Deacon, Y. Shih. Turbulence free ghost imaging[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **98**(11): 111115
- 66 Sanjit Karmakar, Ronald E. Meyers, Yanhua Shih. The first observation of a ghost image with sun light[C]. *SPIE*, 2012, **8518**: 851805
- 67 Hu Li, Zhipeng Chen, Jin Xiong *et al.*. Periodic diffraction correlation imaging without a beam-splitter[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(3): 2956~2966
- 68 Chen Mingliang, Li Enrong, Wang Hui *et al.*. Ghost imaging based on sparse array pseudothermal light system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0503001
陈明亮, 李恩荣, 王 慧 等. 基于稀疏阵赝热光系统的强度关联成像研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(5): 0503001