

# 基于角度-多普勒分辨的反射层析激光成像雷达研究

金晓峰 严毅 孙建锋 吴亚鹏 周煜 刘立人

(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** 设计了一种基于角度-多普勒分辨的接发同轴反射层析激光成像雷达系统,给出了基本成像原理和数学表达,相应分析了目标横向距离分辨率和单个角度采样时间的关系。并在实验室平台上模拟远场衍射传输,获取探测目标的角度-多普勒分辨的反射投影图,采用滤波反投影算法实现目标横截面图像重建。此方法采用相干外差探测,可以大大提高雷达接收信号灵敏度,同时不涉及光频空间相位和时间相位,成像中没有相位匹配过程,降低了实施技术难度,具有一定的实际意义和使用价值。

**关键词** 成像系统;激光成像雷达;反射层析;多普勒分辨;相干探测;外差平衡接收

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0828001

## Angle-Doppler Resolved Reflective Tomography Laser Imaging Radar

Jin Xiaofeng Yan Yi Sun Jianfeng Wu Yapeng Zhou Yu Liu Liren

(Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** A system of angle-Doppler resolved reflective tomography laser imaging radar and its algorithm are given. The issue between transverse range resolution and the sampling time of single angle is solved. The condition of far-field diffraction transmission in the laboratory is designed, and the angle-Doppler reflective projections of the target are collected. Filtered back-projection algorithm is used to reconstruct the cross section of the target image. Because of the utilization of coherent detection of coaxial beams, both the imaging signal to noise ratio and the receiving sensitivity are improved. Due to the simplification in configuration and operations without involving signal phase processing, this technique has a great potential for applications in extensive laser radar imaging fields.

**Key words** imaging systems; laser imaging radar; reflective tomography; Doppler-resolved; coherent detection; heterodyne balanced reception

**OCIS codes** 280.3640, 100.6950, 280.3340

## 1 引 言

激光技术因为其在成像方面的巨大应用潜力在过去十几年中得到了快速的发展。很多国家将激光雷达应用于空间目标识别,实现对卫星或者其它感兴趣的目标的探测、跟踪和远距离成像<sup>[1~3]</sup>。反射层析激光成像雷达是其中一种有效的实现目标高分辨率成像的方法。在反射层析激光成像雷达系统中,根据目标旋转速度快慢,接收端可以获得基于距离分辨,基于多普勒分辨和基于距离-多普勒分辨三种不同的

反射投影信息。其中距离分辨的反射层析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)均可实现不同角度反射投影信息探测,而多普勒分辨的反射层析成像雷达和距离-多普勒分辨的反射层析成像雷达只能在相干外差探测系统中获取投影信息<sup>[2]</sup>。之后采用医学 CT 类非相干处理的成像算法可实现目标横截面图像重建。

1988 年,林肯实验室 Parker 等<sup>[1]</sup>进行了距离分辨的反射层析激光成像雷达实验,采用直接探测

收稿日期: 2012-02-05; 收到修改稿日期: 2012-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(61108069)资助课题。

作者简介: 金晓峰(1985—),男,博士研究生,主要从事激光雷达成像方面的研究。E-mail: jxf2008@siom.ac.cn

导师简介: 孙建锋(1978—),男,副研究员,硕士生导师,主要从事空间激光通信和激光雷达等方面的研究。

E-mail: sunjianfengs@163.com

方式,在距离分辨率 12.6 cm 下实现远处 10 m 的圆锥目标横截面图像重建。同年,林肯实验室也相应进行了多普勒分辨的反射层析激光成像雷达实验,实现了圆锥目标和火箭模型二维截面局部细节(尖角或不连续点)图像重建<sup>[2]</sup>。2001 年, Air Force 实验室的 Matson 等<sup>[3]</sup>首次实现了反射层析成像雷达的卫星在轨实验,他们利用 HI-CLASS 系统在红外波长采用外差测量的方法基于地面对卫星上两个角反射镜进行探测和成像,并对图像的信噪比等参数进行了理论推导和实验验证<sup>[4,5]</sup>。2010 年, Murray 等<sup>[6]</sup>采用伪随机码脉冲序列实现了基于距离分辨率 15 cm 的远处 22.4 km 目标图像重建。

之前本课题组已经进行了基于脉冲测距的直接探测反射层析激光成像雷达实验,不仅实现了目标二维横截面轮廓图像重建<sup>[7-9]</sup>,而且可以实现目标二维表面图像重建<sup>[10,11]</sup>。但是基于脉冲测距的直接探测反射层析激光成像雷达的接收灵敏度较低,需要较高的激光发射功率。采用相干外差探测的方法可以大大提高激光雷达的接收灵敏度,同时不涉及光频空间相位,有利于反射层析激光雷达的未来实际应用。在目标旋转速度较快的情况下,多普勒信号探测将成为接收端获取目标信息的主要手段。基于此,进行了基于相干外差探测的多普勒分辨的反射层析激光成像雷达实验,采用单频连续激光发射和收发同轴外差探测方式获取目标多个不同角度的多普勒反射投影信息,实现目标图像重建。本文主要分为以下几个部分,给出了多普勒分辨反射层析激光成像雷达基本原理图和相应的数学分析,目

标成像横向距离分辨率的确定。第三部分给出了实验光路图及具体实验参数,第四部分为目标截面图像重建结果以及成像分析。

## 2 角度-多普勒分辨的反射层析激光成像雷达基本原理

基于多普勒分辨的反射层析激光成像雷达基本结构如图 1 所示,主要由单频连续激光发射端,光电外差接收端和图像处理三部分组成。为了分析方便这里先定义坐标系和时间系统:雷达激光发射端时间为  $t_1$ ,目标面时间为  $t_2$ ,接收端时间为  $t_3$ ,目标面坐标系统为  $(x, y)$ ,如图 1 所示。文中以发射端的时间系统和目标面的空间坐标为参考坐标系,空间坐标原点位于  $(x = 0, y = 0; t_2 = t_1 - z/c)$ 。激光器发射频率为  $f_c$  的单频连续光,假若发射端主镜出瞳直径为  $d$ ,主镜后的波前分布为

$$u_0(r, t_1) = \text{circle}\left(\frac{r}{d/2}\right) \exp(j2\pi f_c t_1), \quad (1)$$

在传播距离  $Z$  上的远场衍射<sup>[12-14]</sup>  $u_1(x, y; z)$  为

$$u_1(x, y; z, t_1) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left(j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda z}\right) \frac{\pi d^2}{4} \times S(x, y) \exp\left\{j\left[2\pi f_c \left(t_1 - \frac{2z}{c}\right) + \varphi_s\right]\right\}, \quad (2)$$

式中艾里斑函数为

$$S(x, y) = \frac{2J_1\left(\frac{\pi d \sqrt{x^2 + y^2}}{\lambda z}\right)}{\frac{\pi d \sqrt{x^2 + y^2}}{\lambda z}}.$$

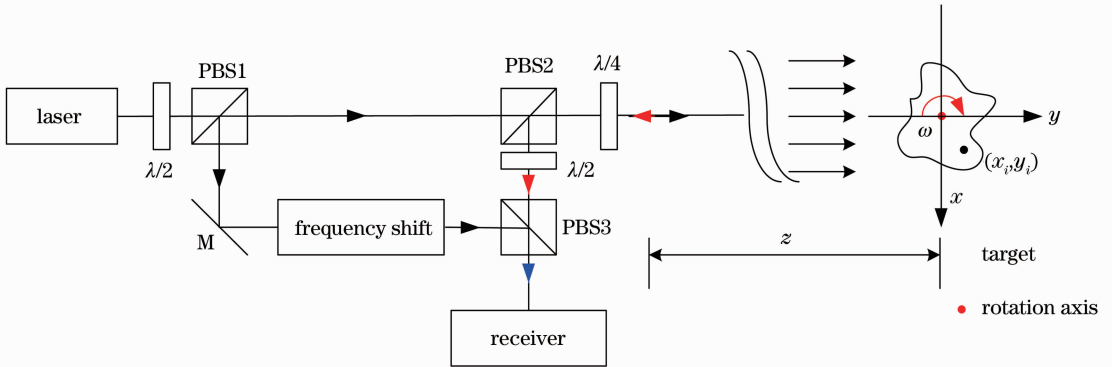


图 1 多普勒分辨反射层析激光成像雷达基本原理示意图

Fig. 1 Basic principle of Doppler-resolved reflective tomography laser imaging radar

为了简化数学表达,公式中的复系数都用常数  $A_1$  表示,所以图 1 中到达目标面的照明波前分布  $u_2(x, y; z, t_1)$  为

$$u_2(x, y; z, t_1) = A_1 S(x, y) \exp\left\{j\left[2\pi f_c \left(t_1 - \frac{z + y}{c}\right) + \varphi_s\right]\right\}, \quad (3)$$

一个目标点  $(x_i, y_i; t_2 = t_1 - \frac{z + y_i}{c})$  以角速度  $\omega$  绕坐标原点  $o$  旋转，其运动函数可以表达为

$$f_i(x, y; t_2) = f(x_i, y_i) \delta[x - \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\omega t_2 + \theta), y - \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin(\omega t_2 + \theta)], \quad (4)$$

式中  $\theta = \arctan(y_i/x_i)$ ,  $f(x_i, y_i)$  为目标点反射系数。远场衍射光斑中心和目标旋转中心  $o$  对准时，目标点在光斑中的运动轨迹为

$$\begin{cases} x = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\omega t_2 + \theta) \\ y = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin(\omega t_2 + \theta) \end{cases}, \quad (5)$$

从而得到点目标的反射回波为

$$e_s(t_3) = A_2 f(x_i, y_i) S[\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\omega t_2 + \theta), \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin(\omega t_2 + \theta)] \times \exp\left\{j\left[2\pi f_c \left[t_1 - 2 \frac{z + \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin(\omega t_2 + \theta)}{c}\right] + \varphi_{s1}\right]\right\}, \quad (6)$$

式中  $t_3 = t_1 - 2 \frac{z + \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin(\omega t_2 + \theta)}{c}$ ，本振一路经移频之后信号表达式为

$$e_L(t_1) = A_3 \exp\{j[2\pi(f_c + \Delta f)t_1 + \varphi_L]\},$$

目标端反射回波与本振信号平衡外差输出为

$$s(t_1) = 2A_2 A_3 f(x_i, y_i) S[\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\omega t_2 + \theta), \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin(\omega t_2 + \theta)] \times \cos\left[2\pi \Delta f t_1 + 4\pi \frac{z + \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin(\omega t_2 + \theta)}{\lambda} + \Delta \varphi\right], \quad (7)$$

从而得到了多普勒频移量

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt_1} \phi(t_1) = \frac{2f_c}{c} \frac{d}{dt_1} \left[2\pi \Delta f t_1 + 4\pi \frac{z + \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin(\omega t_2 + \theta)}{\lambda} + \Delta \varphi\right] = \Delta f + \frac{2\omega}{\lambda} \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\omega t_2 + \theta) = \Delta f + \frac{2\omega x}{\lambda}, \quad (8)$$

远场衍射条件下，已知移频系统引入的频移量  $\Delta f$ ，目标点旋转运动产生的多普勒频移与目标点横向距离坐标  $x$  存在比例关系<sup>[2]</sup>，其中比例系数与旋转角度速度  $\omega$  成正比，与入射激光波长  $\lambda$  成反比。其幅值大小与目标点反射系数和目标点在艾里斑光斑中的位置有关。假设初始角度为  $\theta_0$ ，那么采用滤波反投影重建图像  $g_B$  的数学表达式为

$$g_B(x, \omega t_i + \theta_0) = \sum_{i=1}^m p\left(\frac{2\omega}{\lambda} x, \omega t_i + \theta_0\right) \omega \Delta t, \quad (9)$$

式中投影  $p$  为角度  $\omega t_i + \theta_0$  下回波信号  $s(t_1)$  中不同多普勒频移量  $\frac{2\omega}{\lambda} x$  对应的幅值函数， $t_i$  为对应的第  $i$  个投影  $p$  对应的时间量， $\Delta t$  为相邻两个投影的时间间隔， $m$  为投影角度总数目。实际操作中可以将获得的平衡外差接收信号  $s(t_1)$  进行傅里叶变换操作，得到对应角度的投影函数  $p$

$$p\left(\frac{2\omega}{\lambda} x, \omega t_i + \theta_0\right) = \mathcal{F}_1 s(t_1, \omega t_i + \theta_0), \quad (10)$$

由于采用傅里叶变换，投影的频率分辨率与单个角度对应的信号采样时间有关。假定单个角度

所对应采样时间为  $\Delta T$ ，单个角度回波信号的多普勒频率分辨率间隔  $\Delta f_d$  为

$$\Delta f_d = \frac{1}{\Delta T}, \quad (11)$$

根据(8)式，

$$\Delta f_d = \frac{2\omega}{\lambda} \Delta x, \quad (12)$$

从而得到单个角度反射投影对应的横向距离分辨率  $\Delta x_n$  为

$$\Delta x_n = \frac{\lambda}{2\omega \Delta T} = \frac{\lambda}{2\Delta \theta}, \quad (13)$$

式中  $\Delta \theta$  为目标在单个角度采样时间  $\Delta T$  内所旋转的角度。由(13)式可以看出，单个角度采样时间  $\Delta T$  越长，探测信号对应的横向距离分辨率就越高。但单个角度时间  $\Delta T$  足够长，目标点会从一个多普勒分辨单元移动到另一个分辨单元，其反射回波信号在  $\Delta T$  时间内不再对应同一个多普勒分量<sup>[15~17]</sup>。时间的延迟将会导致点目标多普勒频移量的不精确测量，最终所得的目标重建图像将会模糊，成像分辨率降低。为保证重建图像质量，将目标点始终停留

在同一个多普勒分辨单元内作为单个角度采样时间  $\Delta T$  限定条件:

$$D_r \tan(\omega \Delta T) < \Delta x_n, \quad (14)$$

式中  $D_r$  为目标最大径向距离分布的一半,如图 2 所示,将(13)式代入(14)式,

$$D_r \tan(\omega \Delta T) < \lambda / (2\omega \Delta T), \quad (15)$$

假定目标旋转较快,单个角度采样时间  $\Delta T$  很小的条件下,可以得到  $\Delta T$  的限制条件为

$$\Delta T < \omega^{-1} (\lambda / 2D_r)^{1/2}. \quad (16)$$

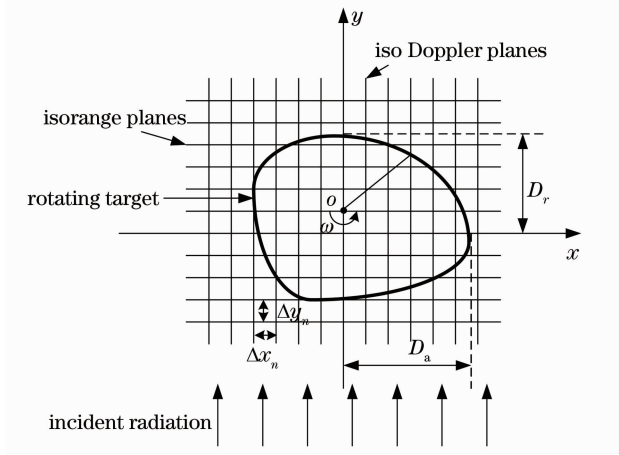


图 2 单个角度采样时间  $\Delta T$  的确定示意图

Fig. 2 Schematic diagram of determination of single-angle sampling time  $\Delta T$

由(16)式可以看出实际实验中,单个角度时间  $\Delta T$  要根据目标旋转角速度,入射光波长和目标实际尺寸进行相应调整。根据确定的单个角度采样时间  $\Delta T$ ,可以将目标旋转时域回波信号分成多个角度,分别进行傅里叶变换,之后根据(9)式可实现目标图像重建。值得注意的是,为保证移频之后正频信号包含目标旋转产生的所有频率信息,频移量  $\Delta f$  需满足条件:

$$\Delta f \geq \frac{2\omega}{\lambda} x_{\max}, \quad (17)$$

式中  $x_{\max}$  为目标偏离旋转中心最大尺寸。根据尼奎斯特采样定理,信号采集端的采样率  $f_s$  需满足条件:

$$f_s \geq \frac{8\omega}{\lambda} x_{\max}. \quad (18)$$

### 3 角度-多普勒分辨的反射层析激光成像雷达实验

图 3 为基于多普勒分辨的反射层析激光成像雷达实验光路图。单模单频连续激光(波长 1550 nm)通过偏模单模光纤和准直透镜形成平行光,再通过圆孔产生圆偏振的发射/本振光束。偏振镜用于提高光源的偏振度,旋转  $\lambda/2$  波片控制发射光束与本振光束的光束强度比。直接透过偏振分光镜(PBS)

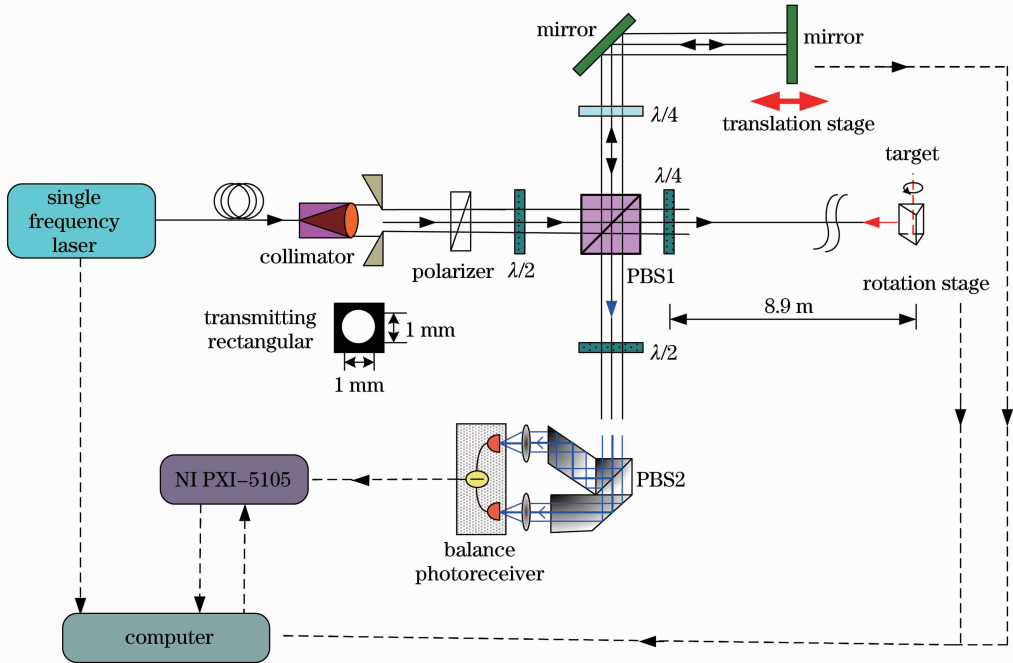


图 3 基于角度-多普勒分辨的反射层析激光成像雷达实验光路图

Fig. 3 Experimental setup for angle-Doppler resolved reflective tomography laser imaging radar

的水平偏振分量作为发射光束通过  $\lambda/4$  波片变成圆偏振光射向目标,回波再通过该  $\lambda/4$  波片变成垂直偏振光由同一偏振分光镜折出。通过偏振分光镜反射的垂直偏振分量作为本机振荡器光束,通过  $\lambda/4$  波片经过水平位移台上反射镜折回后再通过该  $\lambda/4$  波片变成水平偏振光而直接通过该分光镜。水平偏振的本振光束和垂直偏振的目标回波光束共同通过  $\lambda/2$  波片旋转偏振方向  $45^\circ$ 。它们共同的垂直偏振分量被第二个偏振分光镜反射折出,由 PIN 型光电二极管进行外差平衡接收。PIN 管前设置接收孔,相当于接收天线以控制光学外差接收视场。本振信号的频移量是用水平位移台的相对运动产生。

三棱柱目标表面覆盖 3M 反射膜 (Series 983D),使用变频器控制目标旋转速度,模拟多普勒反射层析激光雷达和目标之间的相对旋转运动实施聚束扫描工作模式。激光器准直光束直径为 2.1 mm,圆孔直径为 1 mm,其到目标的距离为 8 m,满足夫琅禾费衍射条件,因此目标表面产生光斑直径为 30 mm。接收孔直径为 1 mm,发射光束发散度和外差接收视场基本满足匹配条件<sup>[18~20]</sup>。

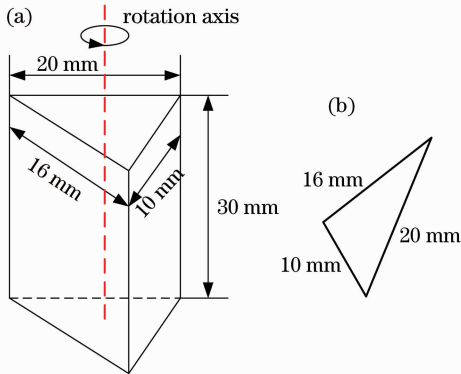


图 4 (a)目标尺寸与旋转轴位置示意图;(b)目标截面图

Fig. 4 (a) Target size and position of rotation axis;

(b) cross section of the target

实验限制条件:1)小孔衍射距离 8 m,光斑大小 30 mm;2)水平位移台最快运动速度 40 mm/s,对应于本振信号多普勒频移 50 kHz。为满足光斑大小和(17)式频移条件,目标截面尺寸设定为 20, 16, 10 mm,高度设定为 30 mm,如图 4 所示,旋转角速度  $\omega$  设定为  $\frac{216\pi}{180}$ 。充分采样,实验中采集卡采集频率设定为 800 kHz/s。根据(16)式可以得到单个角度采样时间  $\Delta T < 0.0023$  s,可以得到目标旋转一周  $360^\circ$  连续采样回波信号在满足限定条件下可以分割成 720 个角度反射投影信息,角度间隔为  $0.5^\circ$ 。

图 5 为本振水平位移台以速度 40 mm/s,角速

度为  $\frac{6\pi}{5}$  下目标旋转一周时域采集外差回波信号。

图 6 为提取图 5 从  $2 \times 10^5 \sim 2.03 \times 10^5$  局部信号,可以看到原始载波信号受到目标不同角度下反射系数的调制。按照实验参数设置,将图 6 目标旋转一周连续采样分割成 720 个角度反射投影信息。根据(10)式,每个角度反射回波投影信息分别进行傅里叶变换操作,可以得到角度-多普勒反射投影图,其中投影图的中心频率值为本振水平位移台相对运动产生的频移 50 kHz,即对应横坐标频率的第 111 个点,如图 7 所示。值得注意的是,图 7 所记录的外差回波信号包括两部分,一部分是目标旋转反射回波信号与本振频移回波信号进行外差得到中频信号  $f_{d1}$ ,另一部分为偏振分束镜和  $1/4$  波片的镜面反射回波信号与本振频移回波信号进行外差得到中频信号  $f_{d2}$ ,  $f_{d1} = \Delta f - \frac{2\omega}{\lambda}x_n$ ,  $f_{d2} = \Delta f$ ,此两项多普勒频移将会在  $\Delta f$  产生混迭,角度-多普勒反射投影图

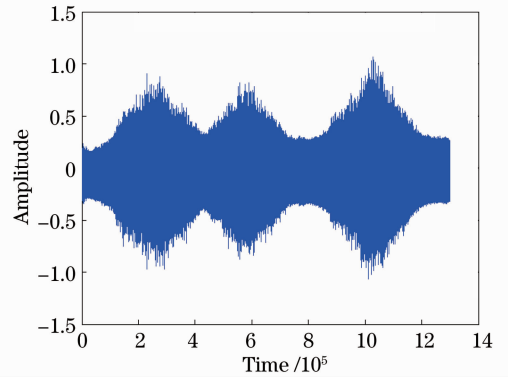


图 5 目标旋转一周时域采集信号

Fig. 5 Acquired time-domain signals of a circle of rotating target

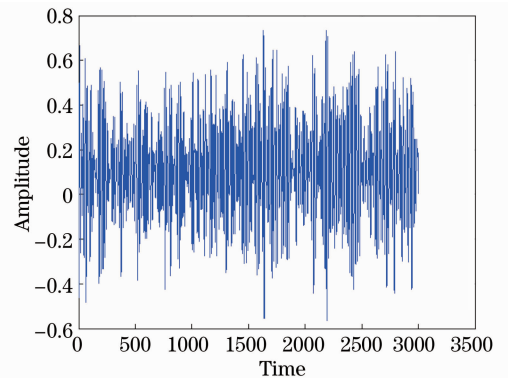


图 6 目标旋转一周时域局部采集信号

( $2 \times 10^5 \sim 2.03 \times 10^5$ )

Fig. 6 Local acquired signal of the rotating target

( $2 \times 10^5 \sim 2.03 \times 10^5$ )



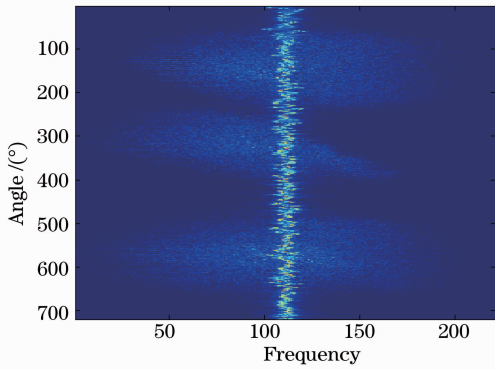


图 7 目标旋转时域采集信号划分为 720 个角度-多普勒投影图

Fig. 7 Acquired time-domain signals are divided into 720 angle-Doppler projections of rotating target

中心频率值对应的较强幅值主要来自于中频信号  $f_{d2}$ , 其频率值在 50 kHz 偏移是由于本振水平位移台运动速度不是严格均匀, 振动等因素引起回波信号频域展宽, 不再对应单一频率值 50 kHz。记录目标静止不动, 本振水平位移台 40 mm/s 移动的外差信号回波, 即对应中频信号  $f_{d2}$ , 并获得其角度-多普勒反射投影图, 如图 8 所示。用目标旋转角度-多普勒反射投影图 7 减去目标静止角度-多普勒反射投影图 8, 可以从外差接收信号  $f_{d1}$  和  $f_{d2}$  混迭中去掉  $f_{d2}$  得到目标旋转外差中频信号  $f_{d1}$ 。此外本振水平位移台前后运动存在差异, 中频信号  $f_{d2}$  不能完全去除, 采用可调节的滤波器(如图 9 所示)用于压低面间反射回波中频信号  $f_{d2}$ , 以增强目标旋转反射回波中频信号  $f_{d1}$ 。图 10 给出了去掉外差中频信号  $f_{d2}$  和加入可调节滤波器之后的角度-多普勒投影图。

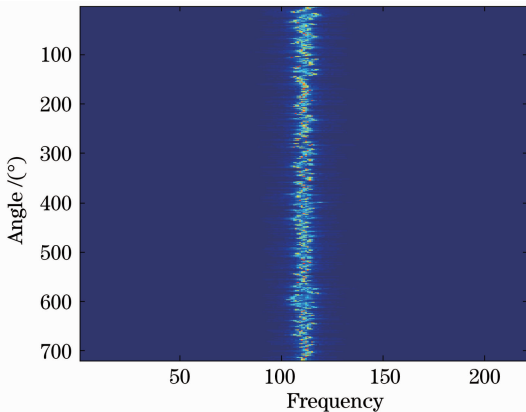


图 8 目标静止时域采集信号划分为 720 个角度-多普勒投影图

Fig. 8 Acquired time-domain signals are divided into 720 angle-Doppler projections of static target

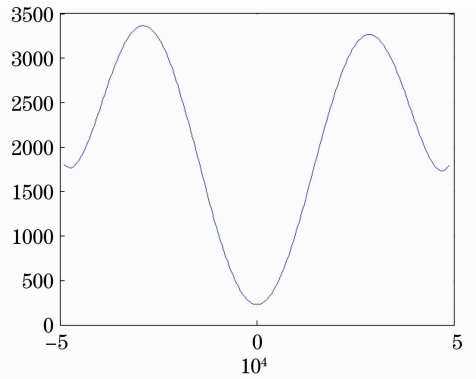


图 9 可调节滤波器压低增强目标旋转反射回波信号

Fig. 9 Adapted filter using for increasing reflective projections from target

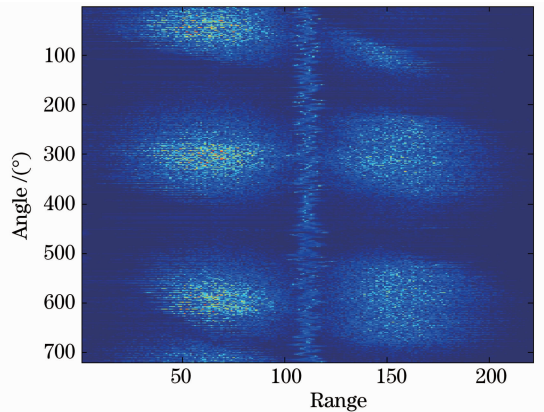


图 10 减去目标静止角度-多普勒投影图和加入可调节滤波器调整后角度-多普勒投影图

Fig. 10 Modified angle-Doppler projections after subtracting the angle-Doppler projections of the static target and with adjustable-filter processing

#### 4 图像重建结果

根据(9)式, 采用与距离分辨反射层析成像相同的滤波反投影算法对图 10 角度-多普勒反射投影图进一步处理, 可得到目标横截面重建图像, 如图 11 所示。重建图像像素为 251 pixel  $\times$  251 pixel, 像素间隔与横向距离分辨率相等, 为 0.091 mm。像素间隔与亮边所对应的像素个数相乘所得的目标重建截面尺寸与实际目标尺寸相匹配, 达到了基于角度-多普勒分辨反射层析激光成像雷达实验的基本目的。目标单边存在大约 4.2 mm 的展宽, 原因在于本振水平位移台没有保持严格的匀速运动, 频移信号对应的原始零频存在漂移, 从而导致角度-多普勒投影图中心错位<sup>[20]</sup>, 成像质量下降。此外, 由于采用了相干外差探测, 覆盖在目标表面的 3M 微棱镜结构反射膜反射产生的光斑噪声同样降低了成像分辨率。

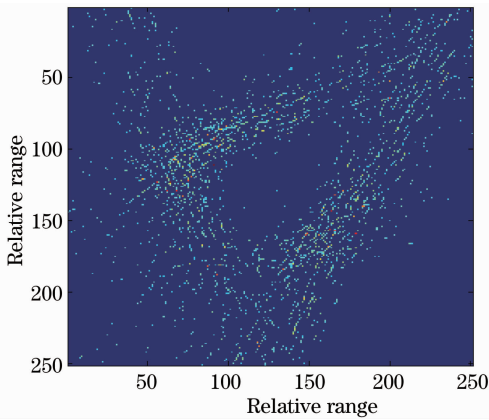


图 11 目标图像重建

Fig. 11 Image reconstruction of the target

## 5 结 论

给出了角度-多普勒分辨反射层析激光成像雷达基本原理,并从具体实验出发,在远场衍射传输条件下获取目标角度-多普勒反射投影图,采用滤波反投影算法实现了目标截面轮廓的图像重建,达到了预期实验设计。采样了相干外差探测和层析成像处理,具有灵敏度高,操作相对简单的优点。下一步将开展基于多普勒的聚束非相干合成孔径激光成像雷达实验,其成像结果为目标二维平面像,不再是文中的目标截面轮廓像<sup>[10,21]</sup>。由于算法和局域角度信息量不足的问题,目标重建图像存在模糊和畸变,具体工作正在进行中。

## 参 考 文 献

- 1 J. K. Parker, E. B. Craig, D. I. Klick *et al.*. Reflective tomography-image from range-resolved laser radar measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(13): 2642~2643
- 2 R. M. Marino, R. N. C., W. E. Keicher *et al.*. Tomographic image reconstruction from laser radar reflective projections [C]. *SPIE*, 1988, **999**: 248~263
- 3 C. L. Matson, D. E. Mosley. Reflective tomography reconstruction of satellite features-field results [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(14): 2290~2296
- 4 C. L. Matson. Short pulselength heterodyne laser radar reflective tomography-projection generation and signal-to-noise ratios [C]. *SPIE*, 1995, **2562**: 184~194
- 5 C. L. Matson, D. E. Holland, S. R. Czyzak. Heterodyne laser radar for space-object imaging: results from recent field experiments [C]. *SPIE*, 1995, **2580**: 288~295
- 6 J. Murray, J. T., Gregory Fetzer *et al.*. Tomographic Lidar [C]. OSA/ASSP/LACSEA/LS&C, 2010

- 7 Jianfeng Sun, Xiaofeng Jin, Yu Zhou *et al.*. Short pulse-length direct-detect laser reflective tomography imaging lidar: field results [C]. *SPIE*, 2010, **7780**: 778017
- 8 Jianfeng Sun, Xiaofeng Jin, Liren Liu. Study on the short pulselength direct detect laser reflective tomography imaging lidar [C]. *SPIE*, 2009, **7419**: 74190W
- 9 Xiaofeng Jin, Jianfeng Sun, Yi Yan *et al.*. Feature tracking for projection registration in reflective tomography laser radar imaging [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(18): 3475~3480
- 10 Yan Yi, Jin Xiaofeng, Sun Jianfeng *et al.*. Research of spotlight mode incoherently synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0211003
- 11 严毅, 金晓峰, 孙建锋等. 聚束非相干合成孔径激光成像雷达研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0211003
- 12 Yi Yan, Jianfeng Sun, Xiaofeng Jin *et al.*. Two-dimension image construction for range-resolved reflective tomography laser radar [C]. *SPIE*, 2011, **8162**: 816207
- 13 Liu Liren. Synthetic-aperture lidar (II): spatial phase biased telescope for transmitting antenna [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1197~1200
- 14 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
- 15 Liu Liren. Synthetic aperture lidar (III): circulated duplex telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1405~1410
- 16 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
- 17 Liu Liren. Fresnel telescope full-aperture synthesized imaging lidar: principle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0128001
- 18 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
- 19 Dale A. Ausherman, A. K., Jack L. Walker *et al.*. Developments in radar imaging [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, 1984, **AES-20**(4): 363~400
- 20 J. W. McCoy, N. M., B. K. Chang. coherent Doppler tomography - a technique for narrow band SAR [J]. *IEEE ASE-M*, 1991: 19~22
- 21 V. C. Chen. Joint time-frequency transform for radar range-Doppler imaging [J]. *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Systems*, 1998, **34**(2): 486~499
- 22 A. Arvizu, F. J. M., R. Chavez. Balanced photoreceiver for coherent optical communications [J]. *Instrumentation and Development*, 1998, **3**(10): 3~14
- 23 Zhou Yu, Sun Jianfeng, Luan Zhu *et al.*. Aperture-synthesizing experiment of a down-scaled synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2446~2448
- 24 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
- 25 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
- 26 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
- 27 Liu Liren. Incoherently synthetic aperture imaging lidar: architecture and algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 109~116
- 28 刘立人. 非相干合成孔径激光成像雷达: 体系结构和算法 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 109~116

栏目编辑: 李文洁