

聚束非相干合成孔径激光成像雷达研究

严毅 金晓峰 孙建锋 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 反射层析激光成像雷达只能获得目标的二维轮廓像,不能对平面目标进行成像。报道了聚束模式下的非相干合成孔径激光成像雷达实验,在这种成像模式下,可以对二维平面目标进行图像重构。采用侧视观察的模式获取目标的角度-距离-强度信息,然后通过滤波反投影实现平面目标的图像重建,并进行了计算机仿真,证明了实验结果的正确性。该系统作为非相干合成孔径激光雷达的一种,实现了区别于目标轮廓的二维成像,具有一定的实际意义和使用价值。

关键词 成像系统;聚束非相干合成孔径激光成像雷达;二维平面成像;角度-距离分辨

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0211003

Research of Spotlight Mode Incoherently Synthetic Aperture Imaging Ladar

Yan Yi Jin Xiaofeng Sun Jianfeng 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 In the earlier research of reflective tomography laser imaging radar, only the silhouette image of the target rather than the image of the target plane can be reconstructed. An experiment of spotlight mode incoherently synthetic aperture imaging ladar is reported. With this method, the two-dimension image of the target plane is got. In the experiment, the angle-range-intensity data are collected in terms of the rotated side-looking incoherent projections of the target and the image is reconstructed by filtered back-projection algorithm. Computer simulation results is acquired as verification for the image reconstructed from experimental data. As a kind of incoherently synthetic aperture imaging ladar, this system has great practical significance for applications in extensive imaging fields.

Key words imaging system; spot-mode incoherently synthetic aperture imaging ladar; two-dimensional image construction; angle-range resolved

OCIS codes 110.6955; 280.6730; 100.6950; 170.3010; 100.0100

1 引 言

远距离超高分辨成像技术是研究人员长期以来努力追寻的目标,许多新型的成像技术相继提出,其中最有可能获得突破的就是合成孔径激光成像雷达(SAIL)技术^[1~3]。合成孔径雷达成像(SAR)是对多个不同角度的目标信息进行相干综合处理,从而获得高分辨率目标图像的技术,在光学波段实现脉

冲间的相干合成难度非常大。在医学上,常用层析技术^[4]对一些人体内部器官或者其他不可破坏的样本进行检测。主要方式是使用 X 射线透射目标获得多角度的信息,然后通过层析成像获得其二维横截面图像。而在合成孔径雷达系统中,则主要是利用空载或者机载雷达在不同角度对目标表面进行照射,采集目标反射回波,对数据进行综合处理后可获

收稿日期: 2011-07-19; 收到修改稿日期: 2011-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(60907006)资助课题。

作者简介: 严毅(1986—),男,博士研究生,主要从事激光雷达成像方面的研究。E-mail: yanyi2008@siom.ac.cn

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

E-mail: sunjianfeng@163.com

得目标表面的二维图像。在 Munson^[5] 的文章中, 对这两种成像方式的相同点进行了很详细的阐述, 因此在合成孔径激光雷达成像中, 可以采用反射层析的原理进行数据处理, 从而获得目标的重建图像^[6]。

1988 年, 林肯实验室 Parker 等^[7] 首先提出了激光反射层析成像雷达的概念, 将计算机层析技术应用到远距离超分辨率成像领域, 采用 532 nm 锁模 Nd:YAG 激光器作为发射端, 光电倍增管作为接收端, 在距离分辨率为 12.6 cm 来探测 10 m 之外的圆锥(轴高为 170 cm, 底面直径为 53 cm) 目标, 用滤波反投影算法实现了圆锥横截面图像重建。以往的反射层析实验也采用计算机层析术的概念和算法, 但是只是对于被测物体的横截面观察, 因而得到的是物体的表面轮廓像^[8~10], 这就限制了其应用范围。2001 年, Air Force 实验室的 Matson 等首次实现了反射层析成像雷达的卫星在轨实验, 利用 HI-CLASS 在红外波长采用外差测量的方法基于地面对卫星进行探测和成像, 并对图像的信噪比等参数进行了理论推导和实验验证。

前文提到的反射层析激光成像雷达的原理和实验, 也采用计算机层析术的概念和算法, 但是对于被测物体的横截面观察得到的是物体的表面轮廓像。而实际上, 人们往往对平面目标的成像更加感兴趣。本文采用侧视观察的模式获取目标的角度-距离-强度信息, 然后通过层析算法实现平面目标的图像重建。因此成像方式完全不同, 是真正意义上的通过反射层析算法实现雷达对目标二维成像的方法。本方法与传统的合成孔径激光成像雷达相比, 有如下特点: 由于采用非相干处理的孔径合成, 不需要考虑光频的时间和空间相位特性, 因此大大降低了实施技术难度, 简化了雷达硬件结构^[11]。本方法由于同时具备合成孔径激光雷达多角度探测成像以及反射层析算法非相干处理的特点, 因此可以称作是非相干合成孔径激光雷达成像方法。

2 聚束非相干合成孔径激光成像雷达工作模式

传统的聚束模式合成孔径雷达是指雷达作直线运动, 在运动中光学足迹恒定地指准在被测目标平面内所关注的成像区域, 如图 1 所示。其能进行信号采集的角度范围是有限的, 为

$$\theta = 2\arctan\left(\frac{S}{\sqrt{D^2 + H^2}}\right). \quad (1)$$

式中 S 为合成孔径长度, H 为飞机相对于地面的高度, D 为飞机运行轨迹与目标之间的水平距离。一般来说, 对于传统相干聚束合成孔径雷达 θ 范围很小^[12], 对于非相干的合成孔径雷达 θ 范围大概在 60° 左右^[9]。

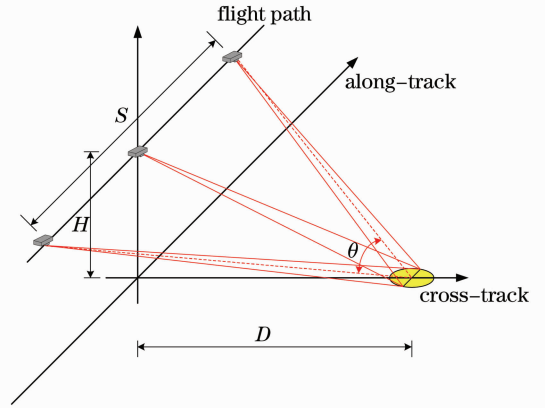


图 1 传统聚束模式合成孔径激光雷达示意图
Fig.1 Schematic of traditional spotlight mode SAIL

传统的聚束模式中, 飞机飞行在不同位置时与目标的距离以及发出的信号光在目标表面的反射角度都会有所差别, 这些都会对回波信号产生一定的影响。为了降低飞机运动轨迹对信号采集的影响, 假设机载雷达以目标中心所在的垂直线为轴做圆周运动, 如图 2 所示。机载雷达在与目标中心的距离相等且夹角相等的不同角度位置上进行探测, 这与反射层析雷达的成像方式相类似, 因此可以称作是层析聚束模式的合成孔径激光雷达。

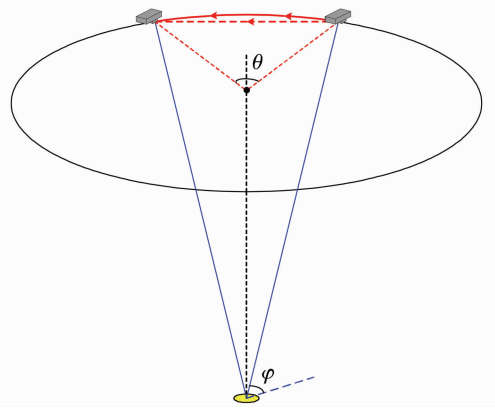


图 2 机载雷达绕目标做圆周运动

对于图 2 所示机载雷达, 当雷达转到某一角度时, 取基准参考面垂直于入射光。由于雷达绕目标做圆周运动, 因此基准参考面与雷达的距离在任意角度都是相等的, 设为一定值 Z , 目标平面与基准参考面的夹角为 $\pi/2 - \varphi$, 如图 3 所示。由图 3 可知,

目标平面绕 x 轴旋转 $\pi/2 - \varphi$ 后即与基准参考面重合。基准面与目标面在沿入射光方向的坐标对应关系为

$$\begin{cases} x' = x \\ y' = y \cos(\pi/2 - \varphi) = y \sin \varphi \end{cases} \quad (2)$$

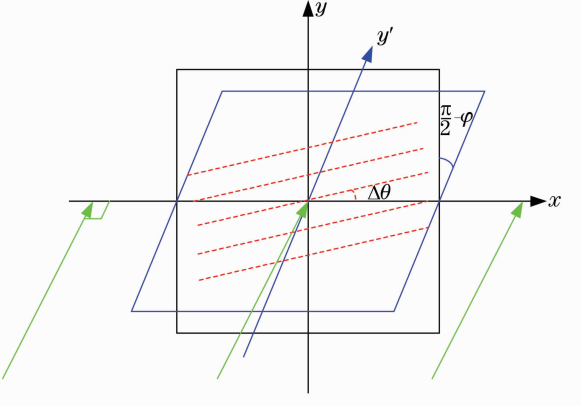


图3 雷达转动相对坐标系

Fig. 3 Relative coordinate system for the rotation of radar

设雷达探测角度范围起始时入射光与 x 轴所在平面垂直于 y 轴, 则基准面的距离等位线为平行于 x 轴的直线。当雷达转过一定角度 $\Delta\theta$ 时, 基准面上的距离等位线如图3所示, 为

$$y = x \tan \Delta\theta + z_k. \quad (3)$$

因此此时目标面上的等距离线为

$$y' = \frac{x' \tan \Delta\theta + z_k}{\sin \varphi}, \quad (4)$$

式中 z_k 代表不同的目标距离。

对于某一确定角度 $\Delta\theta$, 目标面上在同一等距离线上的回波将叠加在一起, 不同等位线的回波在时间轴上分开, 组成这一角度的一维距离投影。

综上所述, SAIL 可能的聚束模式可以分为以下四种^[13]: (1) 传统聚束模式, 即 SAIL 作直线运动, 在运动中光学足迹恒定地指准在被测目标平面内所关注的成像区域, 如图4(a)所示; (2) 逆聚束模式, 即被测目标作直线运动而 SAIL 作跟踪使得光学足迹恒定地指准目标, 如图4(b)所示; (3) 层析聚束模式, 即被测目标保持静止, SAIL 绕被测目标旋转并保持光学足迹恒定指准目标, 如图4(c)所示; (4) 逆层析模式, 即 SAIL 与被测目标相对静止, 被测目标在光学足印中只绕固定轴作旋转运动, 如图4(d)所示。这四种聚束模式成像原理本质上是相通的, 都是通过测得不同角度下被测物体各个部分到 SAIL 的距离由于运动而随时间变化的反射回波, 再通过反射层析算法进行目标图像的重建, 其中模式(a), 模式(b)比模式(c), 模式(d)要多一个平动的

距离补偿量, 实验中我们主要采用的是逆层析聚束模式的方法。

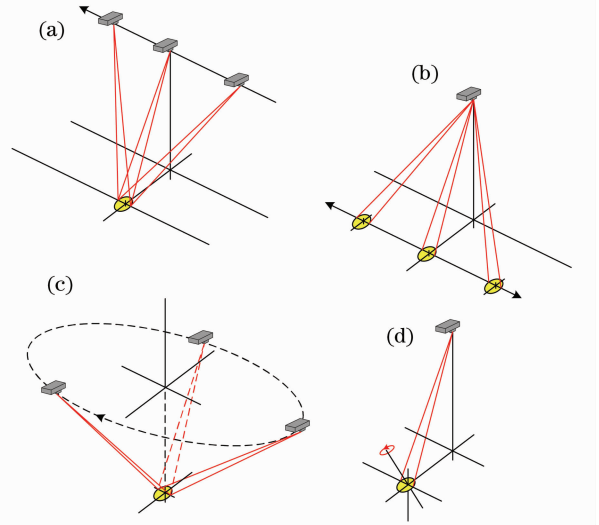


图4 SAIL 聚束模式示意图。(a)传统聚束模式;(b)逆聚束模式;(c)层析聚束模式;(d)逆层析聚束模式

Fig. 4 Schematic diagram of SAIL spotlight mode. (a) Traditional spotlight mode; (b) inverse spotlight mode; (c) tomography spotlight mode; (d) inverse tomography spotlight mode

3 聚束层析图像重建的方法

聚束层析图像重建^[14]可以按照反射层析图像重建的方法, 利用探测器采集不同角度下的目标反射强度信息, 采用反射层析投影成像算法进行对目标图像的重建。本文中所用到的反射层析图像重建方法主要是滤波反投影算法。

在反射层析投影成像中, 反投影成像是把取自有限物体空间的射线投影值反投影到射线所及的所有空间点^[15,16]。数学过程如下。

如图5所示, $g(x, y)$ 为待建图像, $L_{r, \phi}$ 为对应的直线, $r = x \cos \phi + y \sin \phi$, 在均匀光强假设下, $p(r, \phi)$ 正比于 $g(x, y)$ 沿直线 $L_{r, \phi}$ 的物体表面反射特征系数的积分, 即角度 ϕ 所对应的一维反射投影:

$$p(r, \phi) = \int_{L_{r, \phi}} g(x, y) ds, \quad (5)$$

反投影成像方法重建图像为

$$g(x, y) = \sum_{i=1}^m p(x \cos \phi_i + y \sin \phi_i) \Delta\phi, \quad (6)$$

式中 ϕ_i 为第 i 次投影所对应的角度, $\Delta\phi$ 为投影角度采样间隔, m 为总的投影采样数。为了减少重建图像伪迹, 对获得的投影信息进行滤波来增强高频信息, 减弱低频信息。滤波反投影重建图像为

$$g_{FB}(x,y) = \sum_{i=1}^m \mathcal{F}_1^{-1} \{ |u| \mathcal{F}_1[p(r,\phi)] \} \Delta\phi. \quad (7)$$

式中 $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_1^{-1}$ 为一维傅里叶变换及其逆变换, r, ϕ 代表空间域变量, u 为空间频率域变量。

4 实验光路及仿真

4.1 实验光路

实验所用光路图如图 6 所示,采用的是同路收发的系统,光束从光源出来后经过偏振分束棱镜和 $1/4$ 波片后进入望远镜放大系统,放大后以大孔径的平行光出射照在目标面上,目标反射回波按原路返回,在偏振分束镜上反射至接收光耦合器中,最终通过信号采集系统获得目标反射回波的强度信息。

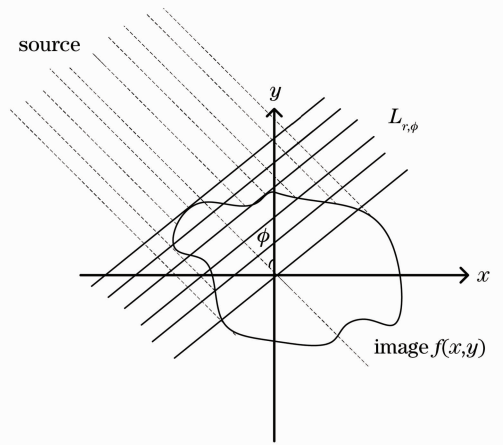


图 5 滤波反投影示意图

Fig. 5 Schematic of filtered backprojection

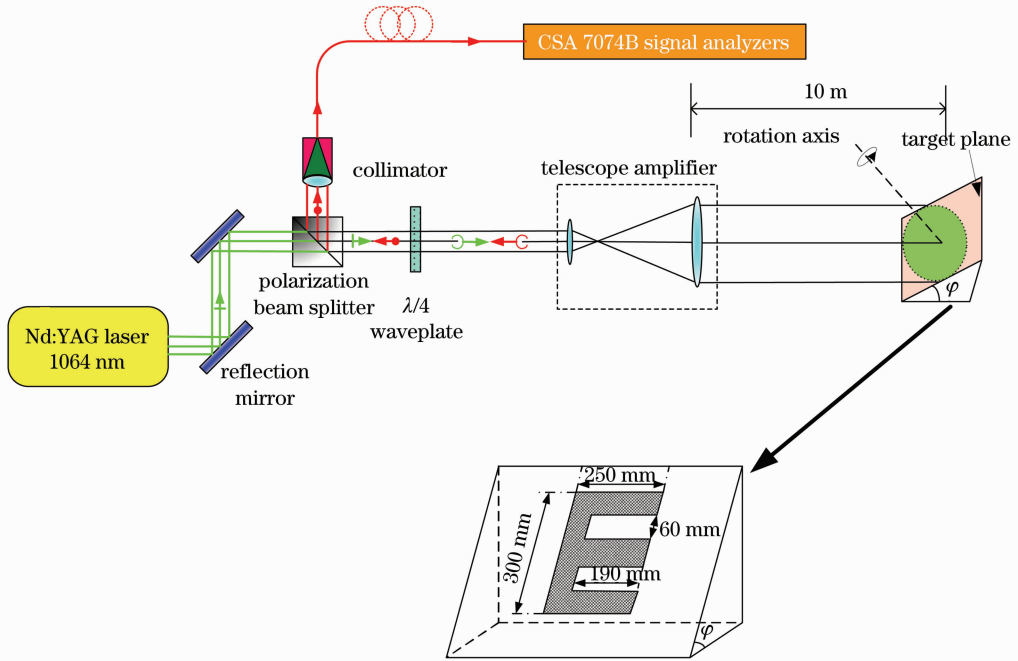


图 6 实验光路示意图

Fig. 6 Schematic diagram of experimental setup

实验中使用的调 Q 固体激光器(Passat Compiler 1064)发出脉宽为 $8 \text{ ps}^{[17,18]}$, 波长为 1064 nm 红外波段的短脉冲,单脉冲能量在 0.2 mJ 左右,经过两级放大后以光斑直径为 300 mm 的平行光照射到被测目标。接收器所探测到的反射回波信息是光强随时间的变化,对应于被测目标的表面反射系数随被测目标深度的变化。被测目标为用 3M 反射膜(3M super high intensity grade micro prismatic sheeting, Series 983D)制作的字母 E,尺寸设定如图 6 所示,并放置于与水平面成 62° 倾角的平面上。采集系统从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 进行反射投影数据采集,为了与实际雷达系统相对应,图像重建过程中只选取一部分角度范围的反射投

影信息。

4.2 实验参数推算

为了从投影中精确地重建目标图像,有必要确定目标投影采样角度数和单投影上采样点数。根据尼奎斯特采样定理,要想从傅里叶频域 $F(u,v)$ 中得到目标的空域图像,傅里叶域 $F(u,v)$ 采样间隔须小于 $1/x_{\max}$, x_{\max} 为目标某一方向上的最大尺寸。除此之外,目标 $f(x,y)$ 是客观的物理量,具有有限的能量,那么傅里叶域 $F(u,v)$ 同样也具有有限的能量范围。尽管傅里叶域 $F(u,v)$ 带宽无限长,但是随着 u,v 的变大, $F(u,v)$ 取值逐渐趋向于零。因而可以根据所占能量的百分比来确定不同的截止频率

u_{\max} , 进而限定傅里叶域 $F(u, v)$ 带宽, 得到物体频域有限带宽 u_{\max} 。假设目标空域最大尺寸为 x_{\max} , 频域截止频率为 u_{\max} , 要想完全重建目标图像, 应采用标准的奈奎斯特采样定律, 频域采样间隔要小于 $1/x_{\max}$ 。如图 7 所示, 可以得到投影角度间隔 $\Delta\phi$ ($\Delta\phi$ 比较小) 采样限制条件^[5] 为

$$\Delta\phi \leq \frac{1}{x_{\max} u_{\max}}, \quad (8)$$

根据(8)式, 可求得投影个数 N_ϕ , 单个投影上采样点 N_p 的限制条件为

$$N_\phi \geq \frac{\theta}{\Delta\phi} = \theta x_{\max} u_{\max}, \quad (9)$$

$$N_p \geq \frac{x_{\max}}{1/2u_{\max}} = 2x_{\max} u_{\max}, \quad (10)$$

式中 θ 为采样角度范围, 对于传统的反射层析有 $\theta = 2\pi$ 。

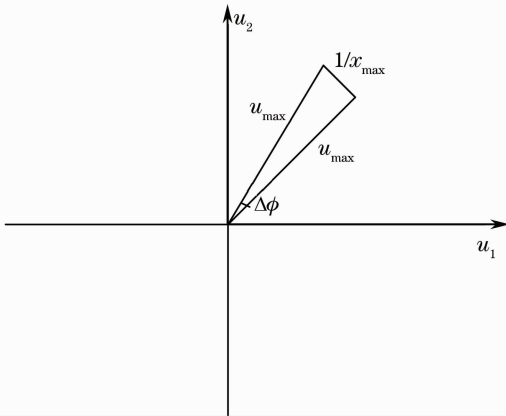


图 7 最小采样角度间隔示意图

Fig. 7 Schematic of minimum sampling angle interval

在反射层析中, 截止频率 u_{\max} 可由探测器和激光脉冲所确定的距离分辨率进行近似计算, 具体过程为: 选取探测器和光脉冲二者中对应的较低的距离分辨率作为系统距离分辨率 ΔR , 转换到频域,

$$\mathcal{F}\left[\text{rect}\left(\frac{x}{\Delta R}\right)\right] = \text{sinc}(\Delta R u) = \text{sinc}(\Delta R u). \quad (11)$$

定义频域 sinc 函数第一个零点为图像频域截止频率, 即

$$u_{\max} = 1/\Delta R, \quad (12)$$

从而可以得到实验中反射层析成像目标的采样角度数目和单个投影上采样点数限制条件。

本实验中, 激光脉冲持续时间为 8 ps, 对应可得距离分辨率为

$$\Delta R_1 = c\Delta\tau/2 = 1.2 \text{ mm}.$$

探测器采样率为 20 GHz, 对应距离分辨率为

$$\Delta R_2 = c/2B = 7.5 \text{ mm}.$$

故系统的总分辨率为

$$\Delta R = 7.5 \text{ mm}$$

物体最大尺寸为 $x_{\max} = 300 \text{ mm}$, 按照(8)式可得采样角度最大间隔为

$$\Delta\phi \leq \frac{1}{x_{\max} u_{\max}} = \frac{\Delta R}{x_{\max}} = 1.43^\circ.$$

但是在实际图像重建过程中, 由于运用了反射层析算法, 将对重建图像的分辨率要求有一定的提高^[10], 因此采样角度最大间隔应该比直接用探测器限制分辨率小, 实验中设定的采样角度间隔为 1° 。

4.3 计算机仿真

进行计算机仿真主要是为了对实验结果进行验证, 计算机仿真过程如下: 确定目标信号采集的角度范围以后, 首先对单一角度的目标进行投影, 将其投影到观察平面上, 然后按照信号采集的角度范围以及角度间隔获得多个投影图像, 将多角度的投影图像进行叠加, 仿真流程如图 8 所示。

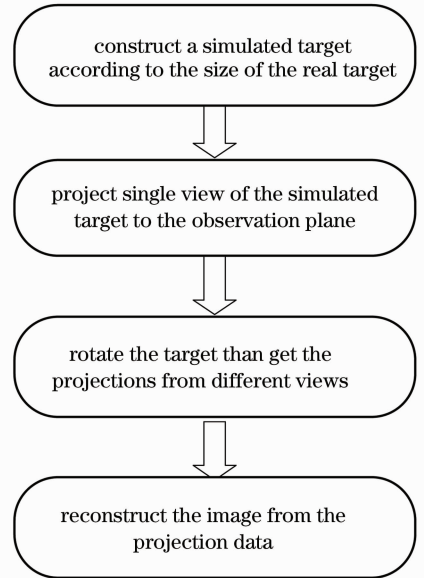


图 8 计算机仿真流程图

Fig. 8 Flow chart of computer simulation

获得的仿真结果如图 9 所示, 采用这种仿真方法与实验中使用的反射层析算法并不相同, 计算机模拟的是二维目标的直接投影图, 是未经过信号处理和图像重建的直观图像, 而实验中单一角度采集到的是目标一维的距离投影信息。要通过一系列的信号处理和图像重建过程才能获得目标图像。若实验结果与仿真结果基本相同, 就可以验证所使用的反射层析算法是正确可行的。

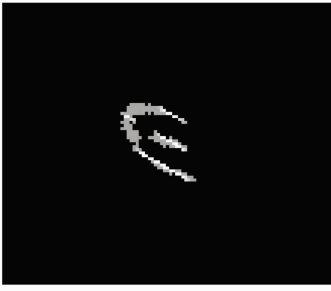


图 9 计算机仿真结果

Fig. 9 Results of the computer simulation

5 实验结果

实验中,将目标固定在倾斜平台平面上,目标绕着平台的法线进行旋转,如图 10(a)所示。旋转过程中,目标等位线如图 10(b)所示。相同角度下位于同一距离等位线上的目标反射回波叠加在一起形成一维的投影图,如图 10(c)所示。将所有角度不同距离的一维反射投影综合在一起,可得目标的二维投影图,如图 10(d)所示。图 10(d)为去除放大望远镜反射光以及背景噪声后所得到的目标的 360°光强投影图以及其中 0°~60°投影图的放大图,其纵坐标为距离坐标 1 bin=7.5 mm,横坐标代表不同的角度。

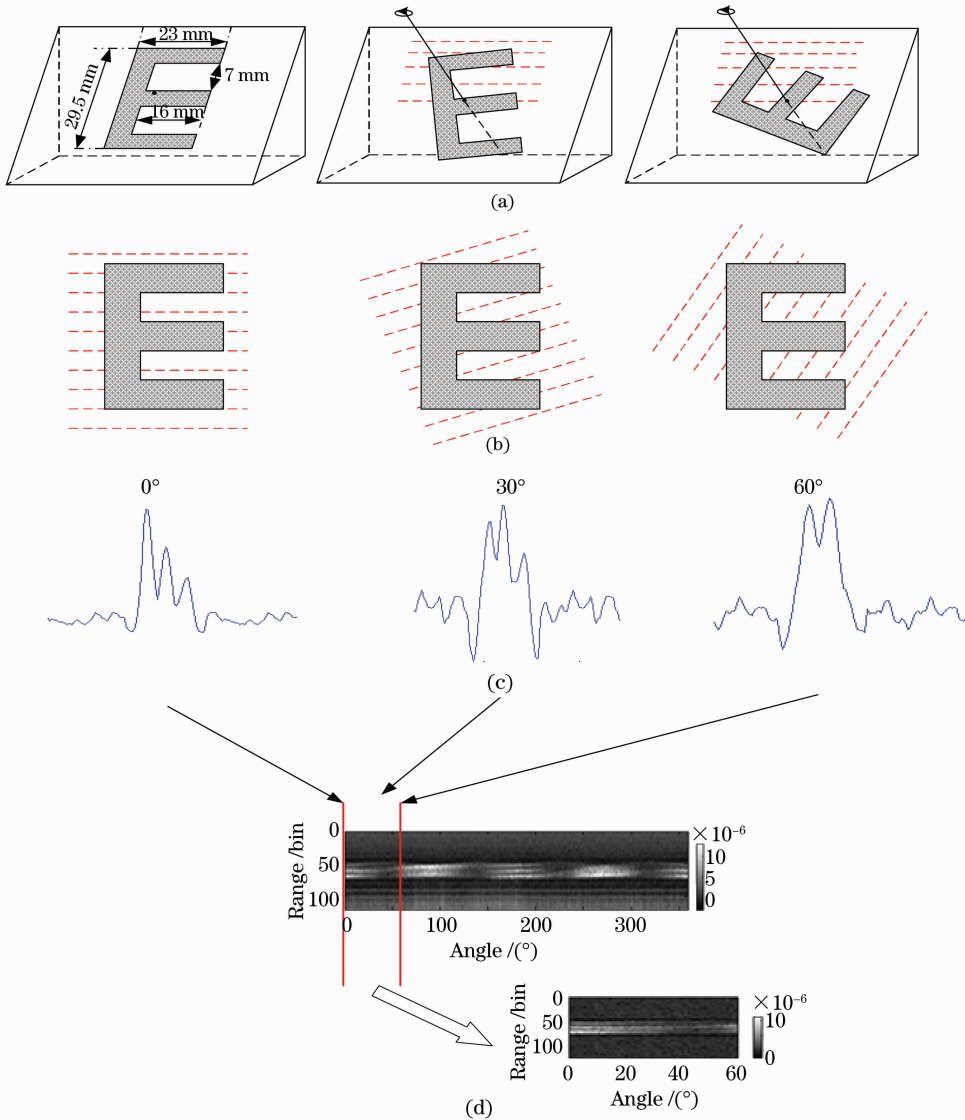


图 10 目标多角度反射投影图

Fig. 10 Multiple angle reflective projections of the target

图 11 为不同角度范围的投影进行重建后的图像,由于聚束非相干机载雷达的探测角度有限,按(1)式可得一般成像角度在 60°左右,因此我们只取

0°~60°投影数据进行图像重建,60°滤波反投影图像重建结果如图 12 所示。由图 12 可知,成像结果与计算机仿真结果在目标形状大小上基本一致,由于

成像算法本身会产生伪迹,因此导致图像出现模糊。另外由图 11 可知,当成像角度增多时,图像的伪迹效果就会减弱,如果能获得目标 360° 投影进行重建,就能很好地抵消伪迹影响,重建清晰完整的目标图像。但是实际的雷达探测过程中只能探测到局域角度的目标投影,因此重建过程中的伪迹影响不仅

会造成模糊,而且会使重建图像产生一定的畸变。要得到局域角度的目标清晰图像,就还需对局域角度的成像算法进行改进。但是综合来说本实验图像重建的结果与计算机仿真的结果基本匹配,且能从中较清楚的分辨出目标的具体信息,基本能达到对二维平面目标的成像要求。

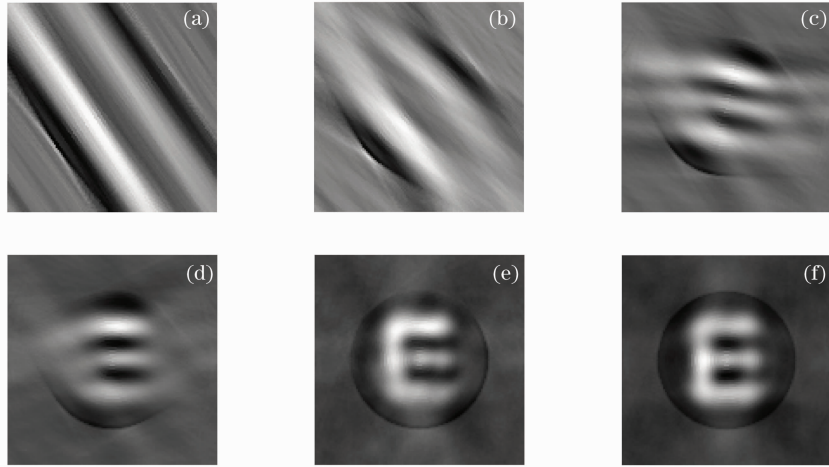


图 11 不同角度范围投影重建图像。(a) 10°; (b) 30°; (c) 60°; (d) 90°; (e) 180°; (f) 360°

Fig. 11 Images reconstructed from projections in different angle ranges. (a) 10°; (b) 30°; (c) 60°; (d) 90°; (e) 180°; (f) 360°

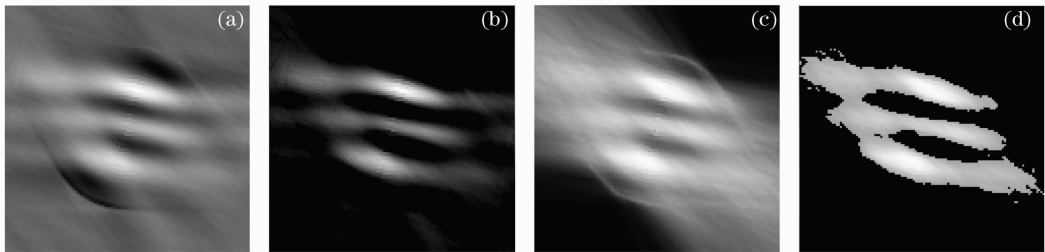


图 12 滤波反投影重建图像。(a)滤波反投影直接重建;(b)取阈值后直接重建;(c)投影图归一化后重建;(d)归一化阈值后重建

Fig. 12 Images reconstructed by filtered backprojection. (a) Direct filtered backprojection; (b) after thresholding; (c) normalized projection before filtered backprojection; (d) after normalized thresholding

6 结 论

聚束非相干合成孔径激光雷达扩展了合成孔径雷达的应用范围,具有结构简单,操作灵活多样的特点。本文从具体实验出发,通过模拟层析聚束模式的合成孔径激光雷达,证明了聚束非相干合成孔径激光雷达的可行性,并实现了利用实验数据对二维平面目标的图像重建,并用计算机仿真对重建图像进行了验证。与以往的轮廓成像相比,本文方法的适用范围更广泛,是真正意义上的聚束非相干合成孔径激光雷达二维成像。在图像重建过程中,由于算法和局域角度^[19,20]信息量不足的问题,对重建出

来的目标图像会造成一定的模糊和畸变,这些都是在将来工作中可以改进和深入研究的。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 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
- 3 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
- 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
- 4 A. C. Kak, M. Slaney. Principles of Computerized Tomographic Imaging [M]. New York: IEEE Press, 1987. 297~322
- 5 D. C. Munson, J. D. Obrien, W. K. Jenkins. A tomographic formulation of spotlight-mode synthetic aperture radar[C]. Proc. IEEE, 1983, **71**(8): 917~925
- 6 C. V. Jakowatz, P. A. Thompson. A new look at spotlight mode synthetic aperture radar as tomography: imaging 3-D target [C]. IEEE Transaction on image processing, 1995, **4**(5): 699~703
- 7 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
- 8 Charles L. Matson, Eric P. Magee, Donald e. Holland. Reflective tomography using a short-pulselength laser: system analysis for artificial satellite imaging[J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(9): 2811~2820
- 9 C. L. Matson, D. E. Mosley. Reflective tomography reconstruction of satellite features-field results[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(14): 2290~2296
- 10 J. B. Lasché, C. L. Matson, S. D. Ford *et al.*. Reflective tomography for imaging satellites: experimental results [C]. *SPIE*, 1999, **3815**: 178~188
- 11 Liu Liren. Spotlight-mode incoherently-synthetic aperture imaging lidar: fundamentals[C]. *SPIE*, 2010, **7818**: 78180U
- 12 W. Buell, N. Marechal, J. Buck *et al.*. Demonstrations of synthetic aperture imaging lidar [C]. *SPIE*, 2005, **5791**(1): 157~71
- 13 Liu Liren. Incoherently synthetic aperture imaging lidar: architecture and algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 109~116
- 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
- 14 Eric P. Magee, Charles L. Matson, David H. Stone. Comparison of techniques for image reconstruction using tomography[J]. *SPIE*, 1994, **2302**: 95~102
- 15 R. M. Marino, R. N. Capes, W. E. Keicher *et al.*. Tomographic image reconstruction from laser radar reflective projections[C]. *SPIE*, 1989, **999**: 248~268
- 16 Jin Xiaofeng, Sun Jianfeng, Yan Yi *et al.*. Small system imaging simulation for reflective tomography laser radar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 747~752
- 金晓峰, 孙建锋, 严毅等. 反射层析激光雷达小系统成像模拟[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 747~752
- 17 Jianfeng Sun, Xiaofeng Jin, Yu Zhou *et al.*. Short pulselength direct-detect laser reflective tomography imaging lidar: field results[C]. *SPIE*, 2010, 778017
- 18 Jianfeng Sun, Xiaofeng Jin, Liren Liu. Study on the short pulselength direct detect laser reflective tomography imaging lidar [C]. *SPIE*, 2009, **7419**: 74190W
- 19 R. Rangayyan, A. P. Dhawan, R. Gordon. Algorithms for limited view computed tomography an annotated bibliography and a challenge[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(23): 4000~4012
- 20 Takuso Sato, Stephen J. Norton, Melvin Linzer *et al.*. Tomographic image reconstruction from limited projections using iterative revisions in image and transform spaces [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(3): 395~399

栏目编辑: 李文喆