

文章编号: 1000-5862(2016)04-0396-04

基于 ISAIL 的空间小目标成像系统设计与仿真

阚晓婷¹ 刘智超^{1,2} 杨进华²

(1. 长春理工大学光电信息学院, 吉林 长春 130000; 2. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130000)

摘要: 为了实现对空间小目标的毫米级成像, 设计了基于转台模型的逆合成孔径成像激光雷达系统, 实现了距离向和方位向的数据融合并完成了模拟目标的2维图像重建. 系统采用窄线宽光纤激光器、大带宽电光调制器完成了对激光脉冲的线性调频, 并利用外差干涉的原理提高了回波信号的信噪比. 结合空间小目标的运动特性, 推演了含有旋转分量的激光雷达回波信号方程. 在R-D算法中代入旋转分量完成图像重建的校正, 实现了对模拟空间小目标的2维图像重建. 实验用毫米级铝条模拟空间小目标, 用步进电机使转台匀速旋转, 模拟目标旋转过程. 实验结果显示: 当目标固定时通过回波能量即可获得1维距离向图像, 峰值位置与真实目标的特征位置一致; 当目标运动时通过数据压缩、R-D算法及旋转分量的校正可获得模拟小目标ISAIL的2维重建图像, 验证了系统可实现对毫米级模拟小目标的图像重建.

关键词: 逆合成孔径成像激光雷达; 图像重建; 旋转运动; 空间小目标

中图分类号: TP 274 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2016.04.13

0 引言

为了实现对空间小目标的毫米级成像, 激光雷达和逆合成孔径技术结合的方法应运而生, 理论上可完全实现毫米级成像探测的技术手段^[1]. 激光雷达具有高能量、强穿透力、准直性好的优点, 即使在远距离上, 也可以获取极高的分辨率, 从而为高精度成像提供有效的数据信息. 合成孔径技术可在不同位置上得到更多的检测数据, 而不同位置上检测数据由处理算法可反演被测区域的图像信息. 逆合成孔径技术中光源和探测器的位置固定, 对空间小目标聚焦实现2维成像的重构^[2-6].

国内外对逆合成孔径雷达技术的研究越来越广泛, 尤其对航天航空的重要性不言而喻. 美国空军研究实验室^[7]采用CO₂激光器和红外探测器组合, 完成了红外波段的合成孔径实验. 1994年, 美国林肯实验室^[8]开发了基于固体激光器的合成孔径雷达装置, 采用1.06 μm的Nd:YAG激光器, 通过外差干涉实现了逆合成孔径成像. 日本通信研究实验室^[9]在1998年采用CO₂激光器实现了合成孔径激光雷达的2维成像, 完成了1维合成孔径雷达系统, 对1维数据进行了合成计算. 美国航空航天局^[10]在2005年开发了世界上第1台扫描2维合成孔径激光雷达

系统, 对漫反射目标成功成像, 精度优于100 μm. 2010年, Casey J. Pellizzari等^[11]采用逆合成孔径激光雷达对地球同步轨道卫星成像, 并通过构建数学模型, 提出2维傅里叶滤波算法提高系统信噪比^[12]. 国内在该领域研究起步较晚, 大多科研单位及院校的研究主要集中在理论论证和原理验证阶段.

本文的主要研究内容是基于实验室平台构建完成的, 主要针对空间小目标, 如空间垃圾、重要目标识别等. 采用转台模型模拟空间小目标的飞行过程, 再通过设计重建图像方法及计算回波信号表达式等, 进而完成对空间小目标的2维ISAIL图像重建.

1 ISAIL 系统

系统由发射模块、接收模块及处理模块构成, 结构如图1所示. 其中发射模块由CPU控制声光调制器将激光调制为脉冲光, 再利用电光调制器得到大带宽线性调频信号. 激光脉冲在分束器1处分为2束, 一束照射到被测目标上, 被测目标为尺寸固定的金属细铝条, 被放置在倾斜角度已知的匀速转台上. 另一束作为参考光. 当被测目标的反射光被光学天线收集并准直后, 与参考光相干, 产生外差干涉信号, 再由光电探测器采集. 最后, 处理模块将探测器得到的相干信号进行滤波、放大处理, 由R-D算法

收稿日期: 2016-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(60637010)和吉林省教育厅“十二五”科学技术研究规划[2014]B060)资助项目.

作者简介: 阚晓婷(1982-), 女, 吉林延吉人, 讲师, 主要从事光电检测技术和信号处理的研究.

完成方位向数据和距离向数据的融合,从而重建 ISAIL 2 维图像.

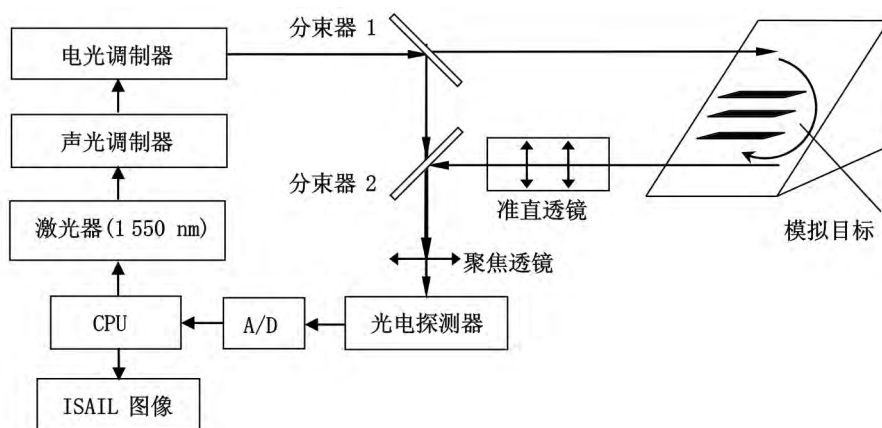


图1 逆合成孔径成像激光雷达

ISAIL 图像是由外差信号得到的,是通过 R-D 算法对 1 维强度数据进行 2 维重建的结果,故图像不同维的分辨率是由不同求解方式决定的.对于距离向而言,其分辨率 ρ_r 可表示为

$$\rho_r = c / (2B), \quad (1)$$

其中 c 为光速 B 为激光带宽.由(1)式可知,获得清晰的图像必须要提高调频带宽.经计算可知,目标细铝条宽度为毫米级,系统带宽应在 15 GHz 以上才能分辨.方位向分辨能力取决于多普勒效应,当系统固定不动时,被测物飞过被测区域时,可表示为视场内视角变化的叠加.当被测物飞行轨迹是直线时,对激光信号的线性调频可实现对多普勒效应的计算.若飞行物保持匀速运动,则多普勒系数为常数,通过傅氏变换对信号作相干处理,再完成脉冲压缩就可以有效地集中回波信号的能量,从而达到远距离探测目标的效果.由此可见,方位向分辨率 ρ_a 可表示为

$$\rho_a = \lambda / (2\Delta\theta),$$

其中 λ 为激光波长 $\Delta\theta$ 为积累的视角角度.

2 空间小目标特性分析

空间小目标的飞行轨迹如图 2 所示 $s(n)$ 为目标上散射点 p_i 的行进轨迹 $R(n, p_0)$ 为空间小目标轴心点和系统的距离 $R(n, p_i)$ 为空间小目标任意散射点 p_i 到系统的距离.设激光脉冲信号为

$$s(\hat{t}, n) = \exp(i2\pi(f_c \hat{t} + \beta \hat{t}^2 / 2)),$$

其中 f_c 为载频, \hat{t} 为快时间, T 为慢时间,全时间为 $t = \hat{t} + nT$ β 为调频率.

任意散射点 p_i 对应的回波信号可表示为

$$s_r(\hat{t}, n) = \sigma \exp(i2\pi(f_c(t - 2R(n, p_i)/c) + \beta(\hat{t} - 2R(n, p_i)/c)^2 / 2),$$

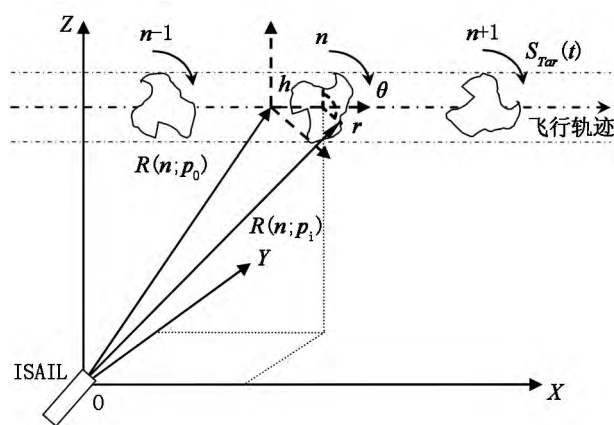


图2 空间小目标运动图

其中 σ 为 p_i 点上对应的散射强度值.

将 $R(n, p_i)$ 在轴心位置作泰勒展开,而 $s(n)$ 又可看作是 p_i 相对 p_0 的运动矢量.当目标作水平运动时 $s(n)$ 为常向量 v .当目标旋转时 $s(n) = v + \omega$, 其中 v 为常向量 ω 为旋转向量.故回波信号化简为

$$D(\hat{t}, n; \bar{P}_i) = \sigma \exp(iK_0 \hat{t}(\bar{v} + \bar{\omega})(\bar{P}_i - \bar{P}_0)) \cdot \exp(iK_1 \bar{v}(\bar{P}_i - \bar{P}_0)) \exp(iK_1 \bar{\omega}(\bar{P}_i - \bar{P}_0)). \quad (2)$$

由(2)式可知,该表达式中的 3 项分别表示距离向分量、多普勒项分量以及旋转分量.相比无旋转的飞行目标而言,带旋转的目标多包含一个旋转相位量,即(2)式中的最后一项乘式.通过计算推导获得了旋转分量引入的相位变化量,只要将该项参数导入 ISAIL 图像重建程序即可提高重建图像的质量.

3 模拟目标的仿真实验

3.1 实验环境

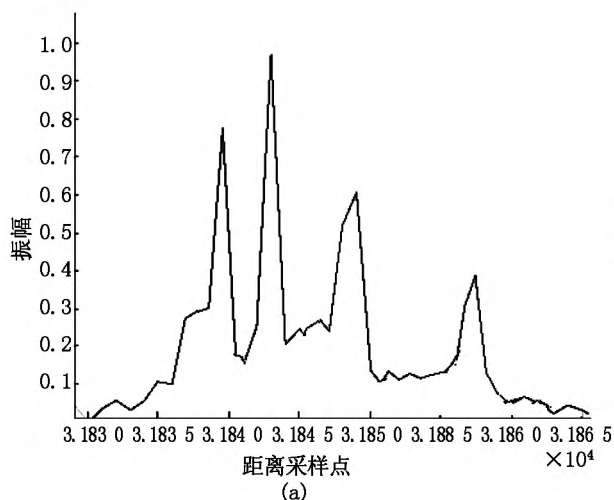
系统采用 OLW 公司的 ES-1 550 nm 光纤激光器、CETC 公司 TSGMN-5Q 声光调制器、KG-PM1 550

电光调制器、Picometrix 公司的 P-48A 型 PIN 光电探测器. 金属铝条目标的尺寸为 $13 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 平行放置, 间距为 1 mm 、 2 mm 、 3 mm , 目标被固定在 45° 倾角的转台上匀速旋转.

3.2 结果分析

在以上实验平台上完成对模拟空间小目标的 2 维重构, 首先对目标进行距离向成像, 通过距离向能量的分布变化关系得到其回波数据的距离向图像, 如图 3(a) 所示.

图 3(a) 中横坐标为采样点, 纵坐标为振幅值归一化系数, 可以看出当目标固定不动时, 由于到系统的距离不同而使其回波能量具有不同的分布效果,



这反映了真实目标的位置及距离信息. 为了得到 ISAIL 2 维图像, 需要对距离向数据进行数据压缩, 采用 Matlab 仿真软件完成距离向压缩, 压缩结果如图 3(b) 所示.

3.3 仿真分析及图像重建

在距离向数据实现数据压缩处理后, 就能与方位向数据进行数据融合了, 方位向数据是由多普勒平移得到, 其中在转台模型中, 平动补偿采用包络对齐以及初相校正的方法实现. 最后, 将距离向数据和方位向数据融合, 利用 R-D 算法完成 ISAIL 2 维图像重建, 仿真图像如图 4(b) 所示, 图 4(a) 为目标实物照片.

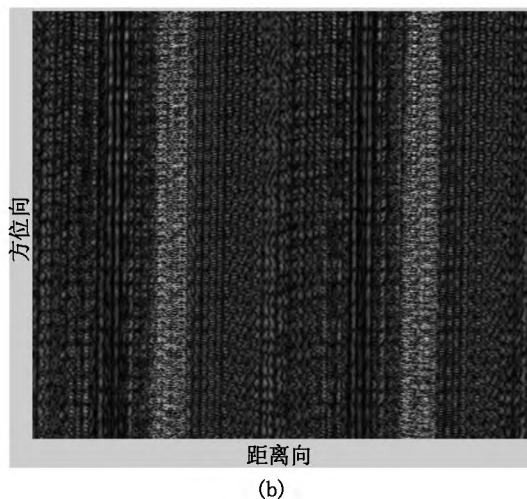


图 3 目标 1 维距离向及数据压缩图

由图 4 可知, 系统可以实现对模拟空间小目标的 ISAIL 2 维图像重构, 其尺寸、位置分布和真实目标相近, 可通过逆合成孔径激光雷达实现毫米级成像. 仿真图 4 中, 重建目标图像的两侧信号较强, 中间较弱与真实目标有一定差异, 在改变被测目标长

度的实验中该种现象有所改善, 造成分析认为因为重建图像算法的平动补偿是基于原点范围内的重构, 故当目标在 x 、 y 轴方向上尺寸不同时, 会出现图像回填效果不均匀的问题, 可以在后续处理算法中改进.

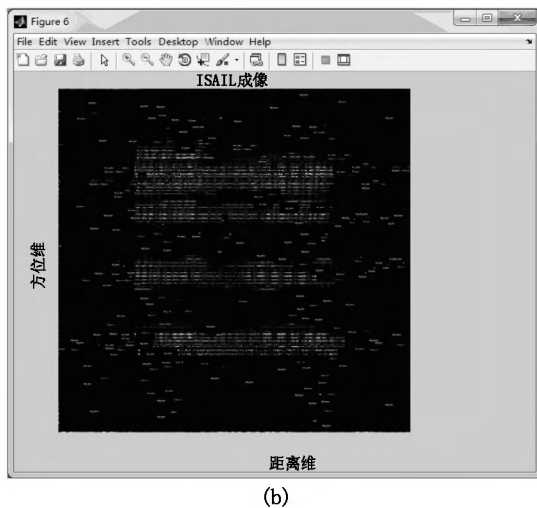
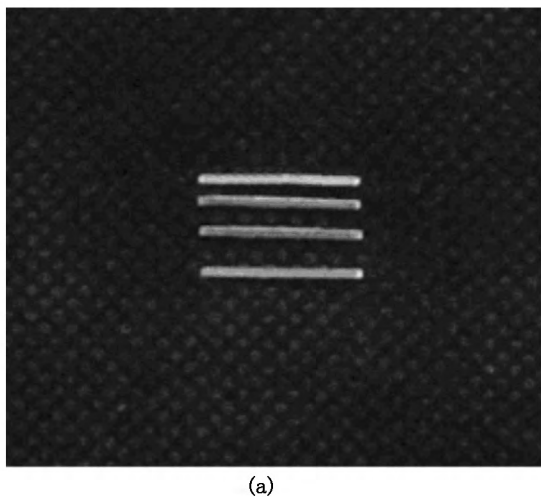


图 4 模拟目标的 ISAIL 重建图

4 结论

本文研究了一种基于逆合成孔径成像激光雷达的空间小目标 2 维成像系统. 采用光纤激光器及电光调制器获得大带宽的线性调频范围, 从而实现距离向高分辨率. 在采用数据压缩、旋转参量导入、平动补偿、R-D 算法等进行距离向与方位向数据融合后, 实现了目标 ISAIL 2 维图像重构. 实验获得了空间小目标的 1 维距离向图像. 在推导了包含旋转分量的回波函数的基础上, 利用 Matlab 软件完成了空间小目标的 ISAIL 2 维图像的重建.

5 参考文献

- [1] Lewis T S, Hutchins H S. A synthetic aperture at optical frequencies [J]. Proc IEEE, 2012, 58(1): 587-588.
- [2] 刘智超, 杨进华, 王晨阳 等. 基于聚束逆合成孔径激光成像雷达组的三维目标重构的研究 [J]. 光子学报, 2013, 8(24): 95-99.
- [3] 张云, 吴谨, 唐永新. 合成孔径成像激光雷达 [J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(7): 48-50.
- [4] 张文睿, 曾晓东, 满祥坤. 激光外差实验研究 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 146-147.
- [5] 郭亮, 邢孟道, 梁毅 等. 合成孔径成像激光雷达成像算法研究 [J]. 光子学报, 2009, 38(2): 448-452.
- [6] Matson C L, Mosley D E. Reflective tomography reconstruction of satellite features-field results [J]. Appl Opt, 2011, 40(14): 2290-2296.
- [7] Dempster A P, Laird N M, Rubin D B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm [J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B, 1977, 39(1): 2-20.
- [8] Lena P J. Astrophysical results with the Comeon Adaptive Optics System [J]. Proc SPIE, 1994, 22(1): 1099-1109.
- [9] Yoshkad S, Aruga T. Feasibility study of synthetic aperture infrared laser radar techniques for imaging of static and moving objects [J]. Appl Opt, 1998, 37(24): 5631-5639.
- [10] Steven M Beck, Joseph R Buck, Walter F Buell et al. Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing [J]. Appl Opt, 2005, 44(35): 7621-7629.
- [11] Sun Jianfeng, Jin Xiaofeng, Zhou Yu. Short pulse-length direct-detect laser reflective tomography imaging: field results [C]. US: SPIE, 2010, 7780017.
- [12] 金晓峰, 严毅, 孙建锋. 基于角度-多普勒分辨的反射层析激光成像雷达研究 [J]. 光学学报, 2012, 32(8): 828001-828007.

Imaging System Design and Simulation for Space Small Target Based on ISAIL

KAN Xiaoting¹, LIU Zhichao^{1,2}, YANG Jinhua²

(1. College of Optical and Electronical Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin 130000, China;

2. School of Optoelectronic Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin 130000, China)

Abstract: In order to achieve the goal of a small space millimeter imaging, inverse synthetic aperture imaging laser radar (ISAIL) system was designed based on turntable models. Data fusion of distance and azimuth had been realized, and two-dimensional reconstruction image for simulated targets was done. The narrow linewidth fiber lasers and high-bandwidth optical modulator were used in the system, and using heterodyne interferometry principle to improve the signal to noise ratio of the echo signal. Combined with the motion characteristics of the space small target, laser radar echo signal equation containing the rotating component was derived. In the R-D algorithm, the correction of image reconstruction was completed, contain rotational components, the two-dimensional image reconstruction were realized to simulated space small targets. Experimental results show that it can get a one-dimensional distance of the target fixed by the consistent position to echo energy feature image, the peak position of the real target. When target moves, ISAIL two-dimensional reconstruction image can be got by data compression, R-D algorithm and rotational components calibration for simulation small target. It verifies the system can achieve image reconstruction millimeter analog small targets.

Key words: inverse synthetic aperture imaging laser radar (ISAIL); image reconstruction; rotation; space small target

(责任编辑: 冉小晓)