

逆合成孔径成像激光雷达系统设计

何 劲¹, 杨小优¹, 张 群^{1,2}, 池 龙¹, 王 翀¹

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 复旦大学 波散射与遥感信息国家教育部重点实验室, 上海 200433)

摘 要:微波波段逆合成孔径雷达的成像分辨率受到发射信号带宽的限制,在对远距离目标、微小目标成像或提取目标精细微动特征时已不能提供足够高的距离分辨率。为解决这一问题,提出一种新体制雷达——逆合成孔径成像激光雷达,将逆合成孔径技术应用于激光波段,利用激光信号的极大带宽和极短波长实现对运动目标的超高分辨实时成像。分析了逆合成孔径成像激光雷达的高分辨原理,并结合激光信号和运动目标的特点,给出了雷达系统的初步设计方案。仿真实验证明:与利用微波信号成像的逆合成孔径雷达相比,逆合成孔径成像激光雷达能够实现运动目标更快速、更高分辨的成像。

关键词:逆合成孔径雷达;逆合成孔径成像激光雷达;运动目标;高分辨成像;实时成像

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.04.006

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)04-0026-05

成像雷达的方位向分辨率受到系统孔径的限制,要实现远距离高分辨成像需要很大的系统孔径,这在实际应用中会受到很多条件的限制。合成孔径技术利用雷达与目标的相对运动,通过对不同位置上接收到的信号的积累,经过信号处理后等效为一个很大的合成孔径天线^[1-2],有效解决了这一问题。逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)就是基于合成孔径技术的一种高分辨成像雷达,它主要用于针对运动目标成像。但是,在对微小目标、远距离目标进行成像或者提取目标运动过程中一些精细的微动特性时,微波波段的逆合成孔径雷达已不能提供足够的距离分辨率,需要更大带宽的发射信号以解决这一问题。

与微波信号相比,激光信号具有更大的带宽和更短的波长,因此,本文将逆合成孔径信号处理技术与极大带宽的相干激光雷达相结合,研究了一种新体制的成像雷达——逆合成孔径成像激光雷达(Inverse Synthetic Aperture Imaging Ladar, ISAIL)。光学波段的合成孔径技术的研究始于 20 世纪 70 年代^[3-6],近年来更是引起了广泛关注,2006 年 2 月美国国防高级研究计划局(DARPA)已经成功得到了第一组机载合成孔径激光雷达图像数据^[7]。但是,这些研究主要是针对固定目标或地面场景的合成孔径成像,而逆合成孔径成像要求的是对运动目标的实时成像。因此,本文分析了 ISAIL 对运动目标超高分辨实时成像的原理,并针对激光信号和运动目标的特点,给出了雷达系统的初步设计方案。最后通过仿真实验证明了 ISAIL 在成像效率和成像质量上的优势。

1 逆合成孔径成像激光雷达高分辨原理分析

合成孔径技术是在雷达实际孔径的基础上,利用雷达与目标的相对运动,把尺寸较小的真实天线孔径通

* 收稿日期:2010-01-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60971100;60672032);陕西省电子信息系统综合集成重点实验室基金资助项目(200903B)

作者简介:何 劲(1984-),男,福建南平人,博士生,主要从事合成孔径雷达信号处理研究;

E-mail: hjejva@163.com

张 群(1964-),男,陕西合阳人,教授,博士生导师,主要从事雷达成像技术,图像处理,电子对抗研究。

过数据处理的方法来合成为一较大的等效天线孔径。ISAIL 正是利用这一原理,突破了实际孔径对方位向分辨率的限制,通过合成孔径原理来实现高分辨率^[8]。

1.1 距离向高分辨原理

脉冲雷达的距离向分辨率可以表示为:

$$\rho_R = \frac{c}{2B} \quad (1)$$

式中: c 为光在真空中的传播速度; B 为信号带宽。

可以看出,距离向的分辨率是与信号的带宽密切相关的,带宽越大,分辨率越高。ISAIL 在运用逆合成孔径技术的基础上,进一步引入了带宽较微波信号大 3-5 个数量级的激光信号。因此,它的成像分辨率将大幅提高,这为实现目标的高分辨成像及细节特征提取奠定了基础。

1.2 方位向高分辨原理

完成对运动目标的平动补偿后,ISAIL 可近似为转台目标^[9],其方位向分辨率为:

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \quad (2)$$

式中: λ 为信号的波长; $\Delta\theta$ 表示雷达与目标的相对转角。

可见在波长一定的情况下,目标的累积转角越大,即等效天线孔径越大,横向距离分辨率越高,这就是逆合成孔径技术提高方位向分辨率的主要原理。与微波信号相比,ISAIL 采用的激光信号具有极短的波长,因此,在实现相同的方位分辨率时,它所需要的成像转角极小,时间极短,十分适合与对运动目标的高分辨实时成像。

2 雷达系统设计

2.1 发射系统设计

在系统设计过程中,发射光源至关重要,它直接影响了天线的增益、探测器件的选择等参量。为提高对目标的探测能力,ISAIL 系统应尽可能提供大的发射功率、大的天线增益和尺寸、较高的接收机灵敏度,并具有跟踪空中快速飞行目标的能力。本文设计的发射系统基本结构见图 1,主要由控制装置、激光二极管 LD、制冷与温控系统、光学耦合系统、增益介质 Nd:YAG 晶体、输出耦合镜及扩束器组成。

Nd:YAG 晶体两端面加工成光学平面,前端面镀双色膜,对泵浦波长 $0.8 \mu\text{m}$ 高透,透过率 $T = 99.4\%$,对振荡激光 $1.06 \mu\text{m}$ 高反,反射率 $R = 99.9\%$ ^[10]。输出镜选取为凹面镜,可以通过电光调制的方法产生高重复频率的宽频带线性调频激光信号或步进调频脉冲激光信号,其基本原理是把电压加到电光晶体上,通过电光晶体的折射率发生的变化引起通过该晶体的光波特性的变化,实现对光信号的调制。最后,要满足雷达探测范围的需求,可以选择对发射信号进行 20-30 mrad 的扩束处理,以增加雷达的探测范围。

LD 泵浦全固体激光器输出信号峰值功率可以达到几百 MW,能够满足雷达探测距离的要求,而且,与传统的闪光灯泵浦固体激光器相比,它的体积更小,但寿命更长,总体转换效率也提高了 5 到 10 倍,因此十分适合于 ISAIL 的使用。

ISAIL 可以发射多种波形的信号,包括窄脉冲串激光信号、线性调频连续激光信号、高重复频率的线性调频脉冲激光信号等等。本文设计的系统中引入了电光调制系统,通过让雷达发射高重复频率的线性调频脉冲激光信号以完成对目标的探测与成像。

2.2 接收系统设计

光接收机一般可分为 2 种基本类型,即直接探测接收机和外差接收机。由于激光信号的带宽极大,若要保证对回波信号不欠采样,所得的采样数据就会非常大,难以存储和处理。而且,ISAIL 一般用于探测远距

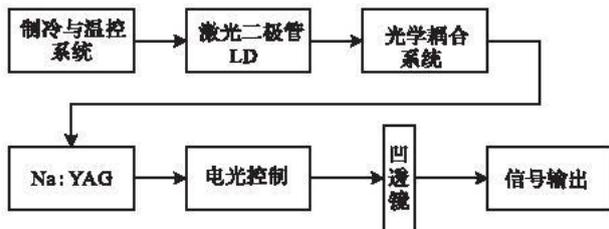


图 1 发射系统基本结构

Fig. 1 The structure of transmitting system

离目标,其光频段的相位信息难以通过直接探测获取,回波信号很微弱而且混在干扰噪声中不易分辨。因此,我们拟采用光外差相干探测的方法对信号进行探测。光外差相干探测是利用2个相干光场在探测器光敏面上的交迭相干性和探测器的平方律响应特性实现光混频,其差频部分保留了被探测光场的相位信息。与直接探测相比,光外差探测具有许多优点,包括转换增益高、滤波功能好、具有良好的空间和偏振鉴别能力等等。此外,通过外差接收后,得到的信号频率范围将减小很多,可以使用相对较小的采样频率完成采样,以降低光电转换和A/D采样的压力。因此,选择光外差探测手段较直接探测更加适合于ISAIL信号的接收。

基于光外差探测的接收系统主要由光学接收天线(望远镜)、光电探测器、A/D转换器、显示及控制器等构成。接收天线要有较高的接收增益、较低的光学损耗,接收视场要满足探测空间和搜索空域的要求,所以选择孔径较大的反射式卡塞格伦(Cassegrain)望远镜以提高增益、降低天线的制造难度、提高天线的可靠性、减轻重量。而由于采用了光电外差探测,所以需要选择高灵敏度、高光电转换效率、高增益及低噪声系数的探测器,因此,可以考虑选择硅雪崩光电二极管(Si-APD)作为接收信号的探测器。接收系统的基本结构见图2。

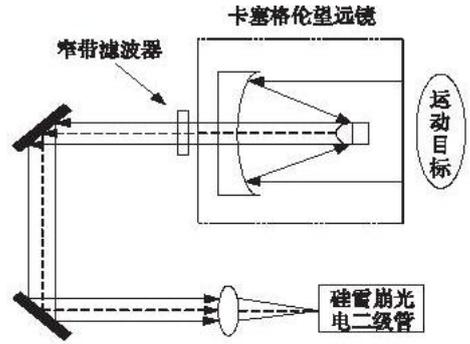


图2 接收系统基本结构

Fig. 2 The structure of receiving system

3 成像处理与仿真实验

ISAIL通过发射大带宽的线性调频激光信号对目标进行探测。假设发射信号的脉宽为 T_p ,脉冲重复间隔为 t_{PRI} ,脉冲重复频率为 f_{PRF} ,调频斜率为 K_r ,理论距离分辨率为 Δ_R ,理论方位分辨率为 Δ_a ,则发射信号可以表示为:

$$s_i(t, \tau) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}K_r t^2\right)\right] \quad (3)$$

式中: t 为一个脉冲内的时间,即快时间, $t \in \left[-\frac{T_p}{2}, \frac{T_p}{2}\right]$; τ 为脉冲发射时间,即慢时间, $\tau = nT_p$, n 为整数; f_c 为发射信号的载频; K_r 为调频斜率。

设雷达与目标初始时刻距离为 R_0 ,在 t 时刻瞬时距离为 R_t ,则回波信号可以表示为:

$$s_r(t, \tau) = A \text{rect}\left(\frac{t - \frac{2R_t}{c}}{T_p}\right) \exp\left[-j2\pi\left(f_c\left(t - \frac{2R_t}{c}\right) + \frac{1}{2}K_r\left(t - \frac{2R_t}{c}\right)^2\right)\right] \quad (4)$$

式中 A 为目标反射激光信号的幅度变化,是与相位无关的量。对接收到的回波信号采用光外差技术进行处理,可以先通过激光测距得到目标与雷达的大致参考距离确定本振光信号,再通过基于运动参数估计的方法实现对回波信号的运动补偿。

假设能够准确估计目标与雷达直接的距离 R_{ref} ,则可以从激光器发射信号中选取一束信号,令其延时 t_{ref} 作为本振光信号, $t_{ref} = \frac{2R_{ref}}{c}$,则得到的本振光信号可以表示为:

$$s_{ref}(t, \tau) = A \text{rect}\left(\frac{t - \frac{2R_{ref}}{c}}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_c\left(t - \frac{2R_{ref}}{c}\right) + \frac{1}{2}K_r\left(t - \frac{2R_{ref}}{c}\right)^2\right)\right] \quad (5)$$

经过差频处理后的回波信号就可以表示为:

$$s(t, \tau) = s_i(t, \tau) s_{ref}^*(t, \tau) = A \text{rect}\left(\frac{t - \frac{2R_t}{c}}{T_p}\right) \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R_\Delta\right] \exp\left[-j4\pi K_r \frac{R_\Delta}{c}t\right] \exp\left[j\frac{4\pi K_r}{c^2}R_{ref}^2 + R_t^2\right] \quad (6)$$

式中 $R_\Delta = R_{ref} - R_t$ 。

对差频信号 $s(t, \tau)$ 在快时间 t 和慢时间 τ 上进行 2 次傅立叶变换, 就可以得到目标图像。

根据系统设计中采用器件的情况, 本文通过计算机仿真对 ISAIL 和 ISAR 成像的结果进行了比较, 仿真参数设置见表 1。

表 1 仿真实验参数

Tab. 1 Simulation parameters

方式	f_c/Hz	B/GHz	$f_{\text{PRF}}/\text{kHz}$	$T_p/\mu\text{s}$	R_0/km	Δ_R/mm	Δ_i/mm
ISAR	3×10^{10}	2	0.5	1	5	75	75
ISAIL	3×10^{13}	20	5	1	5	7.5	7.5

目标为图 3(a) 所示的飞机模型, 由范围在 $[-5\text{m}, 5\text{m}]$ 内的散射点组成。图 3(b) 和图 3(c) 分别为微波波段 ISAR 和 ISAIL 的成像结果。从图 3(b) 中可以看出, ISAR 成像的分辨率仅能达到 75 mm, 成出的目标像效果差, 难以识别, 而从图 3(c) 中可以看出, 利用 ISAIL 能达到的成像分辨率为 7.5 mm, 它能很好地完成超高分辨的成像, 并有效分辨出所有的散射点。

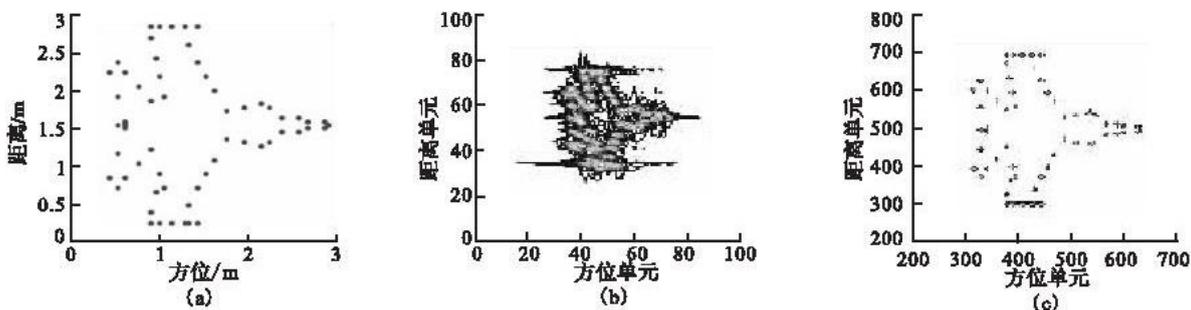


图 3 成像结果比较

Fig. 3 The results of imaging

此外, 通过计算可以得出利用 ISAR 成像需要的成像时间约为 167 ms, 而利用 ISAIL 进行成像只需要 16.7 ms, 这说明 ISAIL 在成像实时性方面要优于微波波段的 ISAR, 而且, 这一优势在对远距离目标进行探测时将体现得更加明显。

4 结束语

逆合成孔径成像激光雷达是一种能够实现对运动目标的高分辨实时成像的新体制雷达, 具有重要的应用价值。本文结合其针对运动目标探测的特点, 给出了雷达系统设计的初步方案, 并通过计算机对成像结果进行仿真, 证明了它在成像分辨率和成像时间上所具备的优势。尽管 ISAIL 有许多优点, 但是由于选择了激光信号作为辐射源, 其还需要解决许多微波雷达中不曾遇到的新问题, 比如信号在传输过程中容易受到大气湍流的影响, 在探测远距离目标时回波信号微弱, 相干探测时对光源和空间条件要求较高等问题, 这些都有待下一步工作中加以解决。

参考文献:

- [1] 保铮, 邢孟道. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
BAO Zheng, XING Mengdao. Technologies of Radar Imaging [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2005. (in Chinese)
- [2] 张志敏, 张群, 郭英. 基于线性调频步进信号的 SAR 实测数据成像[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2006, 7(2): 51-54.
ZHANG Zhimin, ZHANG Qun, GUO Ying. Imaging of Real SAR Date Based on LFM-stepped Chirp Signal[J]. Journal of Air Force Engineering University: Nature Science Edition, 2006, 7(2): 51-54. (in Chinese)
- [3] 张云, 吴谨, 唐永新. 合成孔径激光雷达[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(7): 48-50.
ZHANG Yun, WU Jin, TANG Yongxin. Synthetic Aperture Ladar[J]. Laser & Optonics Progress, 2005, 42(7): 48-50. (in Chinese)

- [4] 郭亮, 邢孟道, 梁毅, 等. 一种机载合成孔径成像激光雷达聚束模式成像算法[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1183 - 1190.
GUO Liang, XING Mengdao, LIANG Yi, et al. Algorithm for Airborne Spotlight Synthetic Aperture Imaging Ladar Data Processing [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1183 - 1190. (in Chinese)
- [5] Karr Thomas J. Synthetic Aperture Ladar Resolution through Turbulence[J]. Proc SPIE, 2003, 4976: 22 - 33.
- [6] Marcus Stephen, Barry D Colella, Thomas J Green. Solid - state Laser Synthetic Aperture Radar[J]. Appl Opt, 1994, 33(6): 960 - 964.
- [7] Buell Walter F, Marechal Nicholas J, Steven M, et al. Synthetic Aperture Imaging Ladar[J]. The Aerospace Corporation Magazine of Advances Technology, 2005, 22(5): 661 - 668.
- [8] Jin He, Ying Luo, Tongan Feng, et al. Inverse Synthetic Imaging Lidar: No Targets Can Hide[C]//Workshop for Space, Aeronautical and Navigational Electronics. Shanghai: Fudan University, 2009: 177 - 181.
- [9] 罗迎, 张群, 封同安, 等. 强杂波下含旋转部件的目标成像及微多普勒提取[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(2): 261 - 264.
LUO Ying, ZHANG Qun, FENG Tong'an, et al. Imaging and Micro - doppler Extraction of Targets with Rotating Parts in Strong Ground Clutter[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(2): 261 - 264. (in Chinese)
- [10] 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.
YANG Lin. The Key Technique Research of Synthetic Aperture Ladar[D]. Chengdu: University of Electronic and Technology, 2008. (in Chinese)

(编辑: 田新华)

The System Design of Inverse Synthetic Aperture Imaging LADAR

HE Jin¹, YANG Xiao-you¹, ZHANG Qun^{1,2}, CHI Long¹, WANG Chong¹

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, 710077, China; 2. Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (Ministry of Education), Fudan University, Shanghai, 200433, China)

Abstract: The range resolution of inverse synthetic aperture radar (ISAR) is limited by the bandwidth of signal. Therefore, ISAR cannot supply high enough imaging resolution for long distance targets, small targets, and so on. A new radar system which is called inverse synthetic aperture imaging laser radar (ISAIL) is proposed in this paper. The use of ISAIL can realize real time and high resolution imaging for moving target with the laser signal's large bandwidth and short wavelength. In this paper, the imaging theory of ISAIL is analyzed, the characters of laser signal and moving target are researched, and the system design project is proposed. Simulation shows that the images achieved by this ISAIL are of higher quality and within shorter time than those achieved by ISAR.

Key words: inverse synthetic aperture radar; inverse synthetic aperture imaging laser radar; moving target; high resolution imaging; real time imaging