

逆合成孔径三维成像激光雷达研究

封同安¹, 何劲¹, 张群^{1,2}, 杨小优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: 三维图像能准确反应目标的物理特征, 提高目标识别的性能, 但传统的光学三维成像技术受到扫描体制或阵元个数的限制, 很难实现对运动目标的实时成像, 针对这一问题, 提出了一种将逆合成孔径技术、激光信号与干涉技术相结合的逆合成孔径三维成像激光雷达, 给出了系统的初步设计方案, 分析了成像的基本原理和实现方法, 构建了模拟系统, 进行了仿真分析, 实验结果验证了该雷达系统的可行性和成像中的优势, 最后讨论了系统实现过程中还需要解决的关键问题。

关键词: 逆合成孔径技术; 激光信号; 干涉技术; 运动目标; 逆合成孔径三维成像激光雷达; 实时成像

中图分类号: TN958 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.10.006

Research on inverse synthetic aperture 3-D imaging LADAR

FENG Tong-an¹, HE Jin¹, ZHANG Qun^{1,2}, YANG Xiao-you¹

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

Abstract: Three-dimensional Image can represent target's physical characteristic well and improve target recognition capability, but conventional optical imaging radar is limited by the array units or scan system and can not realize the imaging of moving targets. This paper combines the inverse synthetic aperture technology, laser signal and interferometric technology to suggest a new radar system which is called Inverse Synthetic Aperture 3-D Imaging LADAR. It describes the initial design of the system, analyzes the imaging theory and implement method, establishes the simulation system, finishes the imaging simulation. The simulation shows the system's feasibility and advantage. Finally, the key problems which are needed to solve are discussed.

Key words: inverse synthetic aperture technology; laser signal; interferometric technology; moving target; inverse synthetic aperture 3-D imaging LADAR; real time imaging

1 引言

二维图像所获取的目标特征信息在机器人视觉、计算机视觉、自动驾驶等领域发挥着重要的作用^[1]。但是, 由于缺少精确的距离及其他一些主要信息, 基于二维图像的目标识别方法所做出的决策经常是不准确的^[2]。而三维图像能够准确反映目标的物理尺寸, 提供有效的特征信息, 这极大地改进了对目标识别和分类的性能, 因而得到了更加广泛的应用。主动式光学成像技术是三维成像的重要手段之一, 现有的主动式光学三维成像技术包括了基

于干涉法测距的成像技术、基于脉冲测距的成像技术等^[3-5]。但是, 这些三维成像技术主要以扫描体制为主, 扫描的速度限制了它们在对高速机动目标成像时的应用。而基于阵列探测技术的非扫描成像技术虽然具有更高的成像效率, 但是它的成像分辨率受到阵列单元的限制, 在实现对目标超高分辨成

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 60971100)资助。

作者简介: 封同安, 男, 博士研究生, 主要从事信号处理、雷达成像、激光雷达系统设计等方面的研究。E-mail: hjelva@163.com

收稿日期: 2011-04-02; 修订日期: 2011-05-08

像方面存在困难。针对这些问题,本文将逆合成孔径技术、激光技术与干涉技术相结合,提出一种能实现运动目标超高分辨三维成像的主动式有源光学成像系统——逆合成孔径三维成像激光雷达。

逆合成孔径三维成像激光雷达(inverse synthetic aperture three-dimensional imaging LADAR, ISATIL)是在逆合成孔径成像激光雷达(inverse synthetic aperture imaging LADAR, ISAIL)的基础上进一步引入干涉技术以实现运动目标三维成像的。逆合成孔径成像激光雷达利用激光信号的超大带宽提高成像的距离分辨率,利用逆合成孔径信号处理技术提高成像的方位分辨率,从而获得目标的超高分辨二维图像^[6]。但是,这种方法获得的二维图像横向上反映的是目标散射点的多普勒分布,与光学投影像的几何关系并不一致,而且当目标存在复杂的运动特性时,二维成像的投影平面以及横向多普勒分布会随着目标的机动和姿态的变化而显著不同,这在很大程度上限制了二维成像的目标识别能力。但是,通过与干涉技术的结合后,能够得到准确反应目标尺寸的三维图像,将大大提高目标的鉴别能力。本文给出了逆合成孔径三维成像激光雷达系统设计的初步方案,研究了成像的基本理论,通过仿真分析证明了其在成像速率和成像质量上具有的优势性能,并讨论了逆合成孔径三维成像激光雷达进一步发展需要解决的关键问题。

2 逆合成孔径三维成像激光雷达系统设计方案

2.1 发射系统设计

逆合成孔径三维成像激光雷达主要针对远距离运动目标成像,因此,在设计发射系统时,选择的激光器能应尽可能提供大的发射功率、大的天线增益和尺寸、合适的脉冲重复频率和理想的相干信号,并具有跟踪空中快速飞行目标的能力。目前在合成孔径成像激光雷达中运用的主要是Nd:YAG固体激光器,但是,逆合成孔径成像激光雷达需要的探测距离往往更远,因此,可以选择波长为 μm 、发射功率为2~3 MW的CO₂气体激光器作为发射光源。与固体激光器相比,CO₂激光器有更好的相干性能,而且受到大气影响更小,所以在远距离目标成像领域中具有更广泛的应用前景。

在选择CO₂气体激光器的基础上,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。通常情况下,只要调制后的脉冲信号重复频率(PRF)稳定在2~3 kHz,就能实现对目标的有效成像。为满足雷达探测范围的需求,可以选择对发射信号进行60~80 mrad的扩束处理,以增加雷达的探测范围(如果与X波段雷达结合使用,可以利用X波段雷达先确定目标范围,以缩小扩束的角度,增大探测距离)。发射系统的基本结构如图1所示。

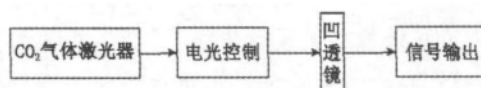


图1 发射系统基本结构

2.2 接收系统设计

光接收机一般可分为两种基本类型,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,在探测远距离目标时,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,在接收过程中,我们拟采用光电外差相干探测的方法对信号进行探测。光电外差探测的另一个优势在于它能大大减小回波信号的频率范围,降低信号的采样压力。假设雷达与目标中心的距离为 R ,则目标的大小可以表示为 $(R - (l/2), R + (l/2))$,其中 l 表示目标的长度。因此,差频范围可以确定为 $(-K_r(l/c), K_r(l/c))$,其中 K_r 表示信号的调频率。根据奈奎斯特采样定理,距离向采样频率只需要满足 $F_s \geq K_r \cdot 2(l/c)$ 即可,远小于两倍的信号带宽。光电外差探测的原理如图2所示。

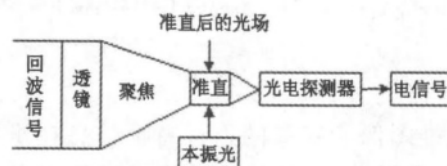


图2 光电外差探测的基本原理

由于光学接收望远镜主镜的尺度要比信号的波长大3~6个数量级,因此,回波信号到达接收天线时,会随着距离变化相对于光学天线产生不同的波面像差,这将极大影响外差光电探测效率,甚至导致探测失效。因此可以考虑使用已经在合成孔径成像激光雷达中得到应用的望远镜离焦波面变换方法以

消除回波信号的衍射波面像差,以实现有效的外差探测^[7]。

整个接收系统主要由接收望远镜、光电探测器、A/D转换器、显示及控制器等构成。选择的接收望远镜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,因此可以选择口径较大的反射式卡塞格伦(Cassegrain)望远镜,这有助于提高增益、降低天线的制造难度、提高天线的可靠性、减轻质量。而由于采用的光电外差探测,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,因此拟选择碲镉汞红外探测器作为接收信号的探测器。此外,还可以考虑使用接收灵敏度更高的超导单光子探测器。接收系统的基本结构如图3所示。

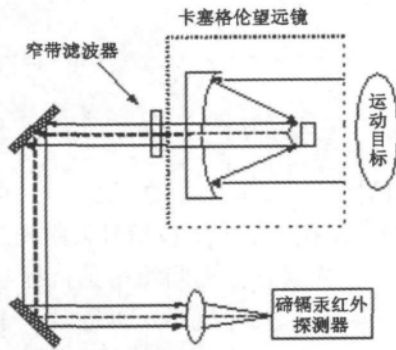


图3 接收系统基本结构

2.3 接收望远镜设置

利用 ISAIL 已经能够完成对运动目标的实时超高分辨成像,但是,与 ISAR 像类似,ISAIL 像也是依靠目标相对于雷达射线的姿态变化所产生的多普勒效应作横向分辨成像的,其横坐标是多普勒。与光学二维像不同,这种横向的多普勒的分布与目标和雷达的相对转速有关,在转速不能估计的情况下,目标的真实尺寸无法确定^[8-9],这主要是因为多普勒分布依赖于姿态变化率,不同的变化率下,成像平面可能有大的区别,只有有效确定目标横向距离^[10-11]才可以得到反应目标真实形状的距离-方位像。而通过引入干涉技术后,就能够获取与目标尺寸相一致的三维像,而且具有实时性强和分辨率高的特点,比现有的主动式光学成像雷达更适合于对运动目标的成像与识别。

ISAIL 采用的是单发单收的收发模式,而逆合成孔径三维成像激光雷达的最大特点在于它采用的是单发多收或多发多收的模式,通过不同接收天线接收回波信号的相位差获得目标的水平和高

度信息。这里一发三收的模式说明 ISAITL 三维成像的原理,假设发射和接收望远镜的设置如图4所示。

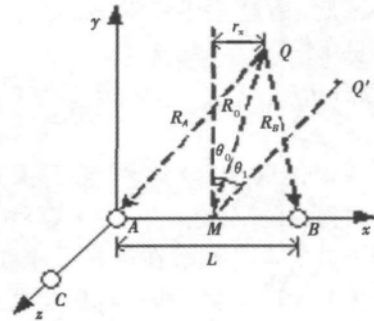


图4 逆合成孔径三维成像激光雷达天线设置

这种设置的基本原理是通过在A点处布置激光信号发射系统和接收望远镜,在B点和C点分别布置一套接收望远镜,利用各个接收望远镜获得的回波信号的相位差,计算出目标点Q相对于基线的水平与高度信息,再利用激光信号测距得到目标的距离信息,就可以实现对目标的三维成像^[12-13]。假设雷达发射的信号为 $s(t) = \exp(j2\pi ft)$,则A点与B点接收到的目标Q点的回波信号分别可以表示为:

$$s_A(t) = \rho_A \exp\left[j2\pi f\left(t - \frac{2R_A}{c}\right)\right] \quad (1)$$

$$s_B(t) = \rho_B \exp\left[j2\pi f\left(t - \frac{R_A + R_B}{c}\right)\right] \quad (2)$$

对信号进行干涉处理后,可以得到:

$$s_{AB} = s_B(t) s_A^*(t) = \rho_B \rho_A^* \exp\left[j2\pi f\left(\frac{R_A - R_B}{c}\right)\right] = \rho_B \rho_A^* \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{2r_x L}{R_A + R_B}\right)\right] \quad (3)$$

在远场假设下($R_A + R_B \gg L$ 且 $R_A + R_B \gg r_x$), $R_A + R_B \approx 2R_0$,且当 r_x 变化时, $R_A + R_B$ 可以近似为常数,则 s_{AB} 的相位与 r_x 成正比。利用激光信号测距可以较为精确地测量出 $R_A + R_B$,记 s_{AB} 的相位为 φ_{AB} :

$$\varphi_{AB} = j\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{2r_x L}{R_A + R_B}\right) \quad (4)$$

可以通过计算 s_{AB} 的相位得到 r_x :

$$r_x = \varphi_{AB} \lambda R_0 / 2\pi L \quad (5)$$

因为相位差以 2π 为周期,所以如果要保证相位 φ_{AB} 不发生模糊,就要求 $|2\pi r_x L / \lambda R_0| < \pi$,即要求目标尺寸 $X \in [-\lambda R_0 / 2L, \lambda R_0 / 2L]$ 。

同理,利用A点与B点处两个望远镜接收到的目标Q点的回波数据进行干涉处理,可获得它沿z轴的投影坐标,计算出它的高度信息,记为:

$$r_z = \varphi_{AC} \lambda R_0 / 2\pi L \quad (6)$$

在远场正视的情况下, Q 点在 y 轴上的坐标和 Q 点到 A 点的斜距近似相等, 这可以通过激光信号测距得到。因此, 通过上述步骤, 就能有效获得 Q 点的三维信息。

3 成像原理分析

3.1 ISAIL 成像

如果目标仅仅只有 1 个散射点, 只要通过干涉原理就能够获得它的三维信息, 但是实际情况下, 目标会包含多个散射点, 因此, 在进行干涉处理之前, 要首先对利用 ISAIL 技术完成对目标的高分辨二维成像以实现散射点进行分离。

逆合成孔径成像激光雷达通过雷达与目标的相对运动合成大的天线孔径以实现目标的高分辨成像, 通过平动补偿后, 雷达与目标的关系可以等效为如图 5 所示的转台模型^[14]。

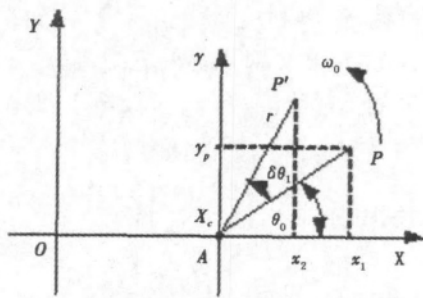


图5 目标转台模型示意图

假设雷达位于 O 点, 目标旋转中心位于 A 点, 目标以均匀角速度绕 Z 轴作旋转运动。雷达与 A 点之间的距离为 r_{OA} , 目标绕点旋转的角频率为 ω_0 。则在起始时刻, 目标上第 k 个散射点 P 到雷达的距离为:

$$r_{OP} = [r_{OA}^2 + r_{AP}^2 + 2r_{OA}r_{AP}\cos(\theta_0 + \omega_0 t)]^{1/2} \approx r_{OA} + r_{AP}\cos\theta_0\sin(\omega_0 t) + r_{AP}\sin\theta_0\cos(\omega_0 t) \quad (7)$$

回波信号的多普勒频率由目标上散射点相对于雷达的径向运动速度 ν_r 决定的, 因此, 回波信号的多普勒频率可以写成:

$$f_d = \frac{2\nu_r}{\lambda} = \frac{2}{\lambda} \cdot \frac{dr_{OP}}{dt} = \frac{2\omega_0 r_{AP}\cos\theta_0}{\lambda} \cos(\omega_0 t) + \frac{2\omega_0 r_{AP}\sin\theta_0}{\lambda} \sin(\omega_0 t) \quad (8)$$

式中 λ 为雷达信号的波长。由于激光信号的波长极端, 因此, 成像所需的累积转角 $\delta\theta_1$ 极小, 因此 $\sin(\omega_0 t) \approx 0$, $\cos(\omega_0 t) \approx 1$, 可以将式(7)和式(8)近似为:

$$r_{OP} \approx r_{OA} + r_{AP}\sin\theta_0 \quad (9)$$

$$f_d \approx \frac{2\omega_0 r_{AP}\cos\theta_0}{\lambda} \quad (10)$$

于是通过测量回波信号的延时和多普勒频率, 就能够得出目标各个散射点的位置参数, 完成对目标的成像。

假设雷达发射信号的脉宽为 T_p , 脉冲重复间隔为 t_{PRI} , 调频率为 K_r , 发射信号可表示为:

$$s_i(t, \tau) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp[j2\pi(f_c t + \frac{1}{2}K_r t^2)] \quad (11)$$

式中, t 表示一个脉冲内的时间, 即快时间, $t \in [-T_p/2, T_p/2]$; τ 为脉冲发射时间, 也称为慢时间, $\tau = nT_p$, n 为整数; f_c 为发射信号的载频, $K_r = \Delta f/t_{PRI}$ 。

设在 t 时刻目标距雷达的瞬时距离为 R_t , 则回波信号可以表示为:

$$s_i(t, \tau) = A \cdot \text{rect}\left(\frac{t - 2R_t/c}{T_p}\right) \exp[j2\pi(f_c(t - 2R_t/c) + \frac{1}{2}K_r(t - 2R_t/c)^2)] \quad (12)$$

式中 A 为目标反射激光信号的幅度变化, 是与相位无关的向量。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} , $t_{ref} = 2R_{ref}/c$ 作为本振光信号, 则得到的本振光信号可以表示为:

$$s_{ref}(t, \tau) = A \cdot \text{rect}\left(\frac{t - 2R_{ref}/c}{T_p}\right) \exp[j2\pi(f_c(t - 2R_{ref}/c) + \frac{1}{2}K_r(t - 2R_{ref}/c)^2)] \quad (13)$$

经过差频处理后的回波信号就可以表示为:

$$s(t, \tau) = s_i(t, \tau) \cdot s_{ref}^*(t, \tau) = A \cdot \text{rect}\left(\frac{t - 2R_t/c}{T_p}\right) \cdot \exp[-j4\pi K_r \frac{2\Delta R}{c} t] \cdot \exp[-j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R] \cdot \exp[j \frac{4\pi K_r}{c^2} \Delta R^2] \quad (14)$$

式中 $s(t, \tau)$ 中共包含三个相位项, 其中第一项为距离项, 表明 stretch 处理后得到的脉冲为一系列单频信号, 第二项带来相位的变化并产生多普勒平移, 第三项为剩余视频相位(RVP), 对成像没有帮助, 需要补偿^[14]。

对式(14)进行傅里叶变换, 可以得到:

$$s_j(f_i) = T \text{sinc} \left[T \left(f_i + 2 \frac{K_r}{c} \Delta R \right) \right] \cdot$$

$$\exp \left\{ -j \left[4\pi \Delta R / \lambda - 4\pi \Delta R^2 / c^2 + 4\pi f_i \Delta R / c \right] \right\} \quad (15)$$

式(15)中最后一个相位项为包络斜置相位,也需要补偿。这样对成像有用的相位就只有式(15)中的第一个相位项了。将式(15)补偿后,对 τ 进行傅里叶变换,就可以得到目标的二维图像了。

这样得到的图像,距离分辨率与发射信号的带宽 B 密切相关,可以表示为:

$$\rho_R = \frac{c}{2B} \quad (16)$$

其中 c 表示光在真空中的传播速度。

可以看出,带宽越大,分辨率越高。ISAIL工作在激光波段,激光信号的带宽通常要比微波信号大3~5个数量级,因此,它的成像分辨率将比ISAR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基础。

而横向分辨的基础在于多普勒频率的差异,可以表示为^[10]:

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \quad (17)$$

式中 λ 表示信号的波长; $\Delta\theta$ 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,逆合成孔径成像激光雷达采用的激光信号波长极短,因此,在实现相同的方位分辨率时,它所需要的成像转角更小,时间更短,这满足了对运动目标实时成像的要求。

3.2 干涉处理及三维成像

在进行干涉处理前,首先进行ISAIL成像,是为了将不同散射点分离,因为如果一个距离单元内包含了多个散射点,会严重影响干涉的效果。在完成ISAIL成像后,只要采用具有一对正交基线的多个接收望远镜接收回波信号构型来确定三维空间坐标,就能得到目标的三维图像^[15],因此,至少需要如图4所示的三个呈L形布阵的接收望远镜(也可以更多)。由于在不同望远镜接收到的回波信号存在差异,因此需要解决的核心问题是各个ISAIL像之间的图像配准问题。

如图4所示,假设目标中的一个散射点 Q 以角速度 ω 绕雷达视线方向转动,在成像时间内与基线中心连线的运动角度为 θ_2 ,发射信号如式(11)所

示,则 A 点接收的回波信号可以表示为:

$$s_A(t, \tau) = A \cdot \delta_A \exp \left\{ \left[j \frac{4\pi}{\lambda} (R_A(t) + y \cos \omega t + x \sin \omega t) \right] + \frac{1}{2} K_r [2(R_A(t) + y \cos \omega t + x \sin \omega t) / c] \right\} \approx A \cdot \delta_A \exp \left\{ \left[j \frac{4\pi}{\lambda} (R_A(t) + y + x \omega t) \right] + \frac{1}{2} K_r [2(R_A(t) + y + x \omega t) / c] \right\} \quad (18)$$

其中 $\delta_A = \text{rect} \left(\frac{t - 2R_A/c}{T_p} \right)$ 。

B 点接收的回波信号为:

$$s_B(t, \tau) = B \cdot \delta_B \exp \left\{ \left[j \frac{4\pi}{\lambda} (R_B(t) + y \cos \omega t + x \sin \omega t) \right] + \frac{1}{2} K_r [2(R_B(t) + y \cos \omega t + x \sin \omega t) / c] \right\} = B \cdot \delta_B \exp \left\{ \left[j \frac{4\pi}{\lambda} (R_A(t) - \frac{1}{2} L \theta_2 + y + x \omega t) \right] + \frac{1}{2} K_r [2(R_A(t) - \frac{1}{2} L \theta_2 + y + x \omega t) / c] \right\} \quad (19)$$

假设能准确估计目标与接收望远镜 A 之间的距离,并用它设计本振信号分别与两组回波信号进行拉伸处理,并进行相位补偿后,可以得到回波信号 A 和回波信号 B 的相位分别为:

$$\phi_A = \frac{4\pi}{\lambda} x \omega t \quad (20)$$

$$\phi_B = \frac{4\pi}{\lambda} (x \omega t - \frac{1}{2} L \theta_2) \quad (21)$$

从式(20)和式(21)可以看出,它们之间的相位差异为:

$$\Delta\phi_{AB} = \frac{2\pi}{\lambda} L \theta_2 \quad (22)$$

在由 A 、 B 两组接收系统接收到的回波信号获得的ISAIL像中,散射点 Q 的横向位置是不同的,整个ISAIL图像会在多普勒方向上产生一个整体偏移。解决这一问题的关键在于有效估计运动角度 θ_2 的大小,这可以采用在干涉式逆合成孔径雷达中使用的角运动参数估计和补偿的方式加以解决^[16]。即在得到目标横向像的基础上,获取目标散射中心的变化曲线,通过拟合得出俯仰角和水平角的变化曲线,最有利用估计出的角运动参数对回波信号 A 和 B 进行补偿,就可以完成图像配准。结束图像配准后,通过干涉处理就可以获得目标各个散射点的三维信息,得到目标的三维图像。因此,逆合成孔径三维成像激光雷达的成像流程如图6所示。

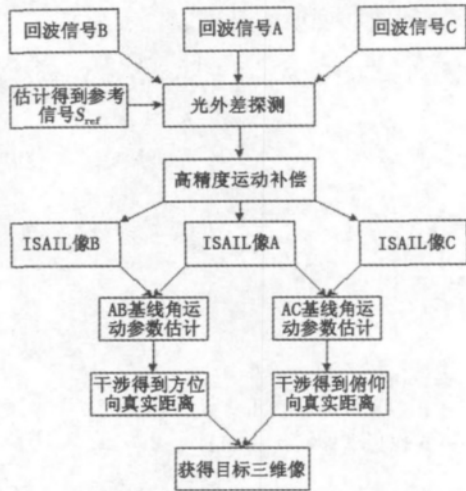


图6 逆合成孔径三维成像激光雷达成像流程

4 仿真分析

雷达的仿真参数如表1所示,发射与接收望远镜的布置采用如图4所示的一发三收模式方式,假设不同望远镜之间的基线长度为1.5 m。

目标模型的三视图如图7所示,是由275个散射点构成的飞行模型。模型的长度、宽度和高度分别为3.55 m、2.95 m和0.45 m。仿真过程中认为起始时刻目标位于Z轴,雷达位于原点,目标与雷达的初始距离为10 km,目标的飞行方向与X轴夹角为 $\pi/2$,俯仰角为 $\pi/6$,以400 m/s的速度匀速飞行。仿真过程中忽略大气扰动对信号的影响。

表1 实验仿真参数

参数	ISAR	ISAIL
信号载频 f_c /Hz	3×10^{10}	3×10^{13}
信号带宽 B /GHz	1	30
脉冲重复频率 PRF /Hz	500	5000
脉冲持续时间 T_p / μ s	1.5	1.5
雷达与目标的初始距离 R_A /km	10	10
理论成像分辨率/m	0.15×0.15	0.005×0.005
成像所需的最小理论转角/rad	0.033	0.001

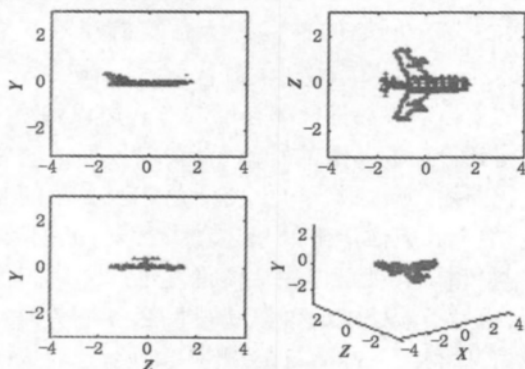


图7 目标模型

首先对 ISAR 和 ISAIL 的二维成像结果进行比较,ISAR 和 ISAIL 的仿真参数如表1所示。图8(a)和图8(b)分别为基于 ISAIL 和 ISAR 的二维成像结果,从图8可以看出,由于受到信号带宽的限制,ISAR 的成像分辨率有限,无法有效对目标进行成像和识别,而 ISAIL 能够以较高的分辨率完整地还原目标。但是,通过 ISAIL 成像虽然能够得到准确的目标距离向信息,却无法得到目标的高度信息和方位向信息,这是因为 ISAIL 像是目标在距离-多普勒平面上的二维投影像,当距离-多普勒平面和目标实际的坐标平面不一致时,得到的二维像就不容易反映出目标的形状信息了,这给目标的识别带来了困难。因此,本文在此基础上,进一步引入了干涉技术,利用 ISAITL 来完成对目标的三维成像,准确还原目标的长度、高度和宽度信息。基于 ISAITL 的三维成像结果如图9所示。

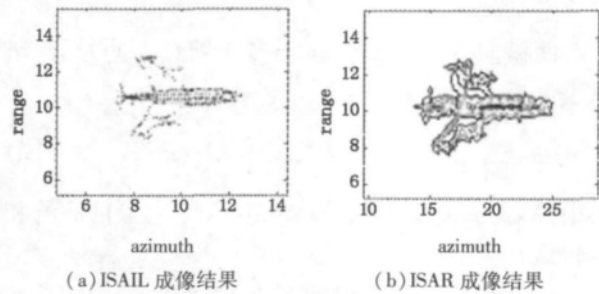


图8 二维成像结果比较

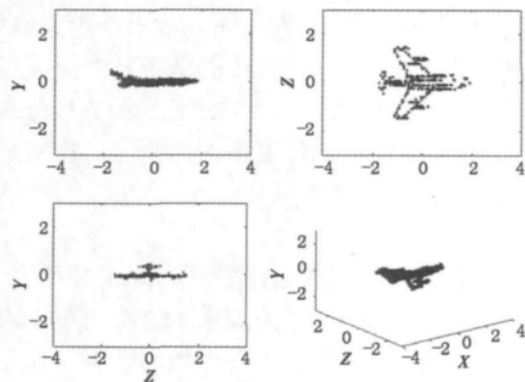


图9 ISAITL 三维成像结果

从图9中不同视角的图像可以看出,利用 ISAITL 进行三维成像可以较好地还原目标的真实物理信息,所得到的图像尺寸与图7中的目标模型基本一致,而且成像分辨率较高。因此,与 ISAIL 成像相比,ISAITL 能有效提高目标的识别概率。

与传统的三维成像激光雷达相比,ISAITL 的最大优势在于它具有对运动目标瞬时成像的能力。仿真中,得到如图9所示的仿真结果,仅需0.1985 s的时间,这种实时成像的能力在实际应用中将起到

至关重要的作用。而与基于 ISAR 成像的 InISAR 技术^[15]相比,由于 ISAIL 能够提供更高的成像分辨率,ISAIL 不仅可以更准确地完成对目标重要部位的精确成像,还能实现对小目标的有效成像和识别,而且由于激光信号的波长极短,ISAIL 的成像时间也将远小于利用微波信号成像的 InISAR 技术。

5 结 论

本文根据现有的光学三维雷达所存在的问题,提出了一种将逆合成孔径技术、激光信号和干涉技术相结合的逆合成孔径三维成像激光雷达系统设计方案,该雷达系统能够利用激光信号和逆合成孔径技术提高二维成像的分辨率,并通过与干涉技术相结合完成对运动目标的超高分辨实时三维成像。因此在目标探测与识别等领域将具有广泛的应用前景。

逆合成孔径三维成像激光雷达虽然有较好的应用前景,但该雷达实用化过程中还有待解决的关键问题,包括高精度的运动补偿技术,大气扰动补偿技术,高精度图像配准技术,完善的相位解缠绕技术等,这些问题将在下一步的研究工作中加以解决。

参考文献:

- [1] Cai Xiping, Li Huimin, Liu Jianbo, et al. Overview of active optical three-dimensional imaging technology [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(1): 22 - 25. (in Chinese)
蔡喜平, 李惠民, 刘剑波, 等. 主动式光学三维成像技术概述 [J]. *激光与红外*, 2007, 37(1): 22 - 25.
- [2] Dixon G J. Laser radar produce three dimensional pictures [J]. *Laser Focus World*, 1998, 34(8): 137 - 146.
- [3] Zhang Yunhua, Jiang Jingshan, Zhang Xiangkun, et al. Principle model and preliminary flight experiment of the three-dimensional imaging radar altimeter [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(6): 899 - 902. (in Chinese)
张云华, 姜景山, 张祥坤, 等. 三维成像雷达高度计机载原理样机及机载试验 [J]. *电子学报*, 2004, 32(6): 899 - 902.
- [4] Garcia P, Anthes J P, Pierce J T, et al. Characterization of a scannerless LADAR system [C]. *Applied Laser Radar Technology*, 1993, 1936: 23 - 30.
- [5] Li Fan, Wu Shuangyang, Yang Hongguo, et al. Multi-element array detecting technology of lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 295 - 299. (in Chinese)
李番, 鄢双阳, 杨红果, 等. 激光雷达多元阵列探测技术 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 295 - 299.
- [6] He J, Luo Y, Feng T A. Inverse synthetic imaging LI-DAR: No targets can hide [C]. *Workshop for Space, Aeronautical and Navigational Electronics, Shanghai 2009*, 11: 177 - 181.
- [7] 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. (in Chinese)
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.
- [8] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [9] Chen C C, Andrews H C. Target motion induced radar imaging [J]. *IEEE Trans on AES*, 1980, 16(1): 2 - 14.
- [10] Wang G Y, Xia X G, Chen V C. Three-dimensional ISAR Imaging of maneuvering targets using three receivers [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2001, 10(3): 436 - 447.
- [11] Zhang Q, Yeo T S. Novel registration technique for InISAR and InSAR [J]. *IEEE Trans on GRS*, 2003, 41(1): 206 - 208.
- [12] Fortuny J, Sieber A J. Three-dimensional synthetic aperture radar imaging of a fir tree: first results [J]. *IEEE Trans on GRS*, 1999, 37(2): 1006 - 1014.
- [13] Zhang Q, Yeo T S. Three-dimensional SAR imaging of a ground moving target using the InISAR technique [J]. *IEEE Trans on GRS*, 2004, 42(9): 1818 - 1828.
- [14] Luo Ying, Zhang Qun, Feng Tongan, 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)
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.
- [15] Li L Y, Yuan W M, Liu H W, et al. Radar automatic target recognition based on InISAR images [C]. *1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Huangshan 2007*: 497 - 502.
- [16] Luo Bin Feng, Zhang Qun, Yuan Tao, et al. Analysis and compensation of mismatching between two ISAR images in interferometric inverse synthetic aperture radar 3-D imaging [J]. *Journal of Xidian University*, 2003, 30(6): 739 - 743. (in Chinese)
罗斌凤, 张群, 袁涛, 等. InISAR 三维成像中的 ISAR 像失配准分析及其补偿方法 [J]. *西安电子科技大学学报*, 2003, 30(6): 739 - 743.