

逆合成孔径成像激光雷达系统建模及成像仿真

何 劲¹, 张 群^{1,2}, 杨小优¹, 封同安¹, 郑万泽¹

(1.空军工程大学电讯工程学院, 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: 逆合成孔径成像激光雷达能突破传统成像激光雷达扫描体制的限制, 实现对运动目标实时高分辨成像, 对运动目标的探测与识别具有重要意义。分析了逆合成孔径成像激光雷达的高分辨成像原理, 并综合考虑系统结构、大气衰减、背景噪声、目标散射特性等多方面因素, 建立了仿真模型, 对成像流程与分辨能力进行了详细分析。仿真实验证明了逆合成孔径成像激光雷达具有优于微波波段逆合成孔径雷达的成像效果以及文中建立的仿真模型的有效性。

关键词: 逆合成孔径成像激光雷达; 系统建模; 成像仿真; 运动目标; 雷达成像

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2012) 03-0632-06

System Modeling and Imaging Simulation of ISAIL

HE Jin¹, ZHANG Qun^{1,2}, YANG Xiao-you¹, FENG Tong-an¹, ZHENG Wan-ze¹

(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: Inverse synthetic aperture imaging LADAR (ISAIL) can break through the limitation of conventional imaging laser radar operating with scan mode, and realize high resolution imaging for the moving targets in time. Therefore, ISAIL is very important for target detection and recognition. *The imaging theory of ISAIL was analyzed and the simulation system based on the consideration of system structure, atmosphere attenuation, background noise and target scatter characteristic was established. The imaging simulation was finished and the imaging flow and resolution capability were analyzed.* The simulation shows that the images which are achieved by the ISAIL system have higher quality than the microwave inverse synthetic radar system, and prove the validity of simulation system.

Key words: inverse synthetic aperture imaging LADAR (ISAIL); system modeling; imaging simulation; moving targets; radar imaging

引 言

激光信号极高的工作频率和良好的相干性能使得激光雷达拥有很好的分辨率, 并具备“四抗”能力(抗电磁能力、抗反辐射导弹攻击能力、抗低空/超低空突防能力、抗隐身目标能力)。因此, 激光雷达被广泛应用于航空遥感、大气监测、卫星探测、军事侦察等各个领域^[1]。但是现有的成像激光雷达采用的都是真实孔径, 其工作体制或是采用单元探测器对目标进行光栅式逐点扫描成像, 速率较慢, 且较难对运动目标成像; 或是采用阵列探测器的非扫描式成像, 利用泛光照射目标来实现瞬时成像, 但是图像分辨率受到探测器阵元个数的限制。这些缺陷限制了它们在运动目标识别领域

的应用。为有效解决这些问题, 人们将合成孔径技术被引入光波波段, 开始了光波波段合成孔径雷达的研究, 逆合成孔径成像激光雷达(Inverse Synthetic Aperture Imaging LADAR, ISAIL)是光波波段合成孔径雷达的一个重要属类, 它是一种主动式有源成像系统, 主要针对运动目标成像^[2]。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后, ISAIL 能实现对运动目标的超高分辨实时成像, 因此在预警探测、目标识别等领域具有重要的应用价值。

光波波段合成孔径雷达的研究最早开始于 20 世纪 60 年代, 最初发展得较为缓慢。进入 20 世纪 90 年代后, 随着激光技术的成熟和信号处理技术的进步, 越来越多的相关实验在美国各大实验室内开展。1994 年 MIT 林肯实验室成功研制的固体激光合成孔径雷达实验装置。2002 年美国海军研究实验室也在实验室中完成了对目标的二维成像^[3]。但国内的相关研究还处于起步阶段, 仅有西安电子科技大学和上海光机所开展了一些相关实验^[4,5], 其它单位更多进行的是理

收稿日期: 2010-01-11

修回日期: 2010-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(60971100); 陕西省电子信息系统集成重点实验室基金(200903B); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2007F28)

作者简介: 何劲(1984-), 男, 广东大埔, 博士生, 研究方向为雷达成像及目标识别; 张群(1964-), 男, 陕西合阳, 教授, 博导, 研究方向为雷达信号处理、雷达目标识别。

论方面的研究^[6]。由于 ISAIL 采用的是激光信号作为辐射源, 所以虽然它的成像基本原理与微波波段的逆合成孔径雷达相似, 但在系统的设计仍存在较大区别。考虑到雷达系统的构造复杂且耗费极高, 本文拟在系统设计前利用计算机的建模和仿真模拟雷达的性能, 为 ISAIL 的工程化实现奠定理论基础。在激光雷达仿真系统的研究方面, 德国 STREICHERJ 等人曾开发过大气激光雷达端到端的仿真工具^[7]; 美国海军研究实验室和 Planning Systems 公司也共同开发了用以比较不同激光雷达系统的模型^[8], 主要研究大海表面变化对激光雷达成像的影响。但还未见有报道针对 ISAIL 的较为完整的系统建模与仿真工作。

本文在分析 ISAIL 高分辨成像原理的基础上, 综合考虑了 ISAIL 在成像过程中可能遇到的大气衰减、背景噪声、探测效率、目标散射特性等诸多因素, 利用计算机完成了对 ISAIL 的系统建模和成像仿真, 详细分析了雷达的成像流程与分辨能力, 并对各种情况下的成像结果进行了分析比较, 为真实系统的工程实现提供有效的技术支持。

1 逆合成孔径成像激光的雷达高分辨原理

1.1 逆合成孔径成像激光雷达系统的基本结构

ISAIL 的基本结构如图 1 所示, 它的发射系统与普通激光雷达存在较大差异, 它主要由控制装置、发射激光器和扩束装置组成, 由于雷达与目标的距离通常较远, 因此要求激光器能够输出高质量、大功率、高重频、频率稳定、相干性强的激光光束, 通常选择固体激光器或 CO₂ 气体激光器作为发射光源。激光发射以后需要进行一定的扩束处理, 使发射的激光信号光束在一定距离外能够有效覆盖足够大的区域, 当运动目标穿越激光波束后, 雷达与目标之间的转角会发生变化, 利用转角变化带来的相位信息变化可以完成对目标的实时成像。

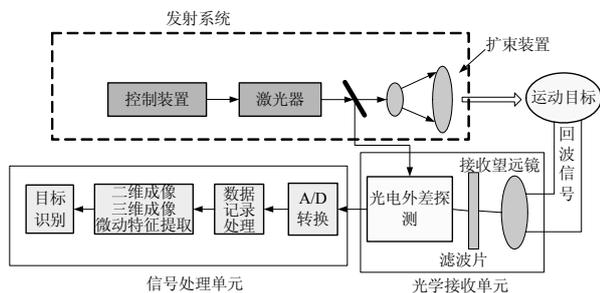


图 1 逆合成孔径成像激光雷达系统结构

由于激光信号的相位信息难以通过直接探测来获取, 而且回波信号很微弱, 其中还混杂着干扰噪声, 不容易分辨。因此, 在设计接收系统时, 需要采用光外差相干探测的方式接收回波信号。信号的强度、相位信息可以通过光外差相干探测的方式来获得, 而且利用光外差探测能够有效降低回波

信号的带宽, 减少信号采样的压力。利用外差方法接收到信号后, 通过有效的信号处理技术和成像方法就能够实现对运动目标的二维成像、三维成像、精细微动特征提取, 并在此基础上进一步实现对运动目标的鉴别识别。

1.2 高分辨原理

ISAIL 运用了逆合成孔径技术来实现对目标的高分辨成像。与真实孔径雷达相同之处是在距离向上两者都是利用发射宽带信号来获得高的距离向分辨率, 但在方位向上, 真实孔径雷达的分辨率是衍射极限分辨率, 而 ISAIL 是通过合成孔径原理来实现高分辨率^[9,10]。当探测距离较远时, 真实孔径雷达要想获得高的方位向分辨率必须把天线波束做得非常窄, 而这需要非常大的天线孔径, 工程上实现起来非常困难, 但 ISAIL 突破了实际孔径对方位向分辨率的限制, 可以用小的发射天线孔径来获得高的方位向分辨率。

ISAIL 通过发射脉冲激光信号来完成对目标的探测与成像, 脉冲雷达的距离向分辨率可以表示为:

$$\rho_R = \frac{c}{2B} \tag{1}$$

其中 c 表示光在真空中的传播速度, B 表示信号带宽。

可以看出雷达的距离向分辨率是与信号带宽相关, 带宽越大, 分辨率越高。逆合成孔径成像激光雷达工作在激光波段, 激光信号的带宽通常要比微波信号大 3-5 个数量级, 因此, 它的距离像成像分辨率比微波雷达有大幅提高, 有利于对目标细节特征的提取。

完成对运动目标的平动补偿后, ISAIL 可以通过近似的转台模型实现成像, 其方位向分辨率可以表示为^[11]:

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \tag{2}$$

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。因此, ISAIL 十分有利于实现对运动目标的高分辨实时成像。

2 逆合成孔径成像激光雷达系统模型

逆合成孔径成像激光雷达的基本工作过程是通过发射系统发射脉冲激光信号, 经过大气传输后辐射到目标面, 由接收系统接收目标面发射回来的回波信号, 再经过信号处理技术从中提取有用的信息实现对目标的成像。因此, 在对雷达系统进行建模和性能分析时, 需要重点考虑环境因素和系统参数的影响, 主要的影响因素包括: 激光器的输出功率、激光的工作波长和带宽、目标的散射特性、大气的传输条件、

接收机灵敏度、探测器指标、雷达与目标之间的距离、背景噪声等。下面将分别对这些因素进行分析。

2.1 雷达回波信号功率

可以利用激光雷达方程来计算发射信号功率、目标散射特性、大气传输条件和接收机灵敏度对雷达回波信号功率的影响。激光雷达方程可以表示为：

$$P_r = \frac{4P_s \Gamma_A \eta_r \Gamma}{\pi \theta_r^2 R_1^2} \cdot \frac{T_{A2}}{4\pi R_2^2} \cdot \frac{\pi D^2 \eta_r}{4} \quad (3)$$

式中， P_r 为回波信号功率， P_s 为激光器发射功率，0.5m 是激光源到目标的大气传输系数，0.005m 为发射系统效率， θ_r 为束散角， R_1 为发射机到目标的距离， Γ 为目标的激光截面积， T_{A2} 为目标到接收机的大气传输系数， R_2 是目标到接收机的距离， D 为接收望远镜的孔径， η_r 为接收系统效率^[12]。

可以看出，ISAIL 的性能将受到发射功率、大气环境，目标散射截面积等诸多因素的影响。在系统模拟过程中，最主要的物理现象是激光信号的散射，它包括目标和杂波两个方面，在某些情况下，还包括多散射效应、衰减和色散等。因此要根据雷达可能遇到的各种实际环境来实现功能模拟。

2.2 大气传输模型

首先需要考虑的是大气环境的影响，激光信号在大气中传输，大气的吸收、散射及大气湍流等线性非线性对光束质量都将产生影响。假定传输路径上大气均匀或分层均匀分布，根据 Beer 定律，激光信号在大气中传输距离 R 后，信号功率将衰减为：

$$P_1 = P_0 \cdot \exp[-\sigma(\lambda) \cdot R] \quad (4)$$

式中 $\sigma(\lambda)$ 表示大气的消光稀疏度，这是大气分子的吸收系数和散射系数之和。根据大气对激光传输的吸收和散射的原理，大气的消光稀疏度 $\sigma(\lambda)$ 可以表示为：

$$\sigma(\lambda) = k(\lambda) + \gamma(\lambda) \quad (5)$$

$k(\lambda)$ 表示大气的吸收系数， $\gamma(\lambda)$ 表示大气的散射系数。

大气中的水汽、二氧化碳、臭氧、一氧化碳、一氧化二氮和甲烷等气体对激光都有吸收作用，其中水汽的吸收起到最主要的作用，它的吸收系数可以表示为^[13]：

$$k = \frac{C_s^0(\nu) P_s}{k_b T} \times [P_s + 0.002(P - P_s)] e^{\frac{1800(\frac{1}{T} - \frac{1}{296})}{T}} \quad (6)$$

其中， P_s 和 P 分别表示水汽分压和大气压强， $C_s^0(\nu)$ 表示温度 $T = 296K$ 时的自展宽吸收系数，表达式为：

$$C_s^0(\nu) = 1.23 \times 10^{-12} + 2.31 \times 10^{-24} e^{-0.0083} \quad (7)$$

大气分子对激光信号的散射体现为瑞利分布，气溶胶的散射可以近似为米散射^[8]，因此，大气分子的消光系数与激光波长 λ 和水平能见度 R_s 之间的关系公式可以表示为：

$$\gamma(\lambda) = \frac{3.91}{R} \left\{ \frac{550}{\lambda} \right\}^q (km)^{-1} \quad (8)$$

当能见度较好时（大于 80 km）， $q = 1.6$ ，能见度中等时， $q = 1.3$ ，能见度较差时， $q = 0.585R^{1/3}$ 。

2.3 噪声模型

ISAIL 可能会遇到的噪声包括背景噪声、探测器噪声、放大器及热噪声等。背景噪声是指在不考虑主动激光对抗的情况下，由太阳或其它光源带来的直接辐射，地物、大气等对太阳光的反射、散射以及地物、大气自身的热辐射等^[14]。从背景中得到的光子或辐射出的能量会引起探测器中载流子激发数量的起伏和浓度的随机变化，这就带来了散粒噪声。散粒噪声电流的均方值可以表示为：

$$i_N^2 = 2eP_b \gamma B \quad (9)$$

式中， e 为电子电荷， P_b 为背景光功率， γ 为电流响应度， B 为电子的带宽。同时，随机进入探测器的随机信号光子也会对探测器的输出产生影响，这也将引发部分的散粒噪声，散粒噪声的电流均方值为：

$$i_{SN}^2 = 2eP_s \gamma B G^2 \quad (10)$$

式中， P_s 为信号功率， G 为探测器增益。

探测器噪声主要包括了产生-复合噪声，暗电流噪声。由载流子的随机产生和复合会造成产生-复合噪声，它的电流均方值可以表示为：

$$i_{GR}^2 = 4eP_s f B \quad (11)$$

暗电流噪声是探测器本身的暗电流引起的闪烁噪声，探测器暗电流均方值为

$$i_{SN}^2 = 2eI_D B_j \quad (12)$$

式中， I_D 为探测器的暗电流， B_j 为接收机的带宽。

放大器噪声是由放大器各电子元件带来的噪声：

$$i_s = \frac{\eta_D e P_s G}{H \nu} \quad (13)$$

式中， η_D 为探测器的量子效率， h 为普朗克常数， ν 为激光信号的频率。由于 $\eta_D e/h\nu$ 与光功率和探测器输出电流之间的转换有关，因此可以作为探测器的响应率。

热噪声是由探测器的负载电阻中电子的热运动引起的，其电流的均方值可以表示为：

$$i_T^2 = \frac{4kTB_j}{R_k} \quad (14)$$

式中， k 为波尔兹曼常数， T 为绝对温度， R_k 为探测器负载电阻， B_j 为接收机的工作带宽。

2.4 目标散射特性

目标的激光散射截面积可以定义为^[15]：

$$\Gamma = \rho GA \quad (15)$$

式中， ρ 为目标表面的反射率， G 为目标的增益， A 为目标的实际投影面积。增益 G 可以表示为：

$$G = 4\pi/\omega_r \quad (16)$$

ω_r 表示目标后向散射的立体角。

2.5 雷达发射信号模型

ISAIL 的发射信号的表达式可以写为：

$$s_i(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \cdot \cos\left(2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\mu t^2\right)\right) \quad (17)$$

其中 $\text{rect}(\square)$ 为矩形窗函数, 即有当 $|t| \leq T_p/2$ 时, $\text{rect}(t/T_p) = 1$, $|t| > T_p/2$ 时 $\text{rect}(t/T_p) = 0$, f_c 表示信号的载频, μ 表示信号的调频斜率。假设 i 为目标上任一散射点, 在 t 时刻点 i 的雷达距离 R , 则接收到的雷达目标回波信号可写为

$$s_c(t) = \text{rect}\left(\frac{t-2R/c}{T_p}\right) \cdot \cos\left(2\pi\left(f_c(t-2R/c) + \frac{1}{2}\mu(t-2R/c)^2\right)\right) \quad (18)$$

其中 c 表示电磁波的传播速度。

2.6 信号接收处理

ISAIL 主要针对运动目标进行成像, 运动目标的尺寸较小, 因此通常可以采用距离多普勒算法进行成像。首先估计目标回波信号的运动参数, 假设在 t 时刻参考点到雷达的距离为 R_0 , 参考信号的持续时间 T_{ref} (T_{ref} 要稍长于发射信号的持续时间 T_p), $\Delta R = R - R_0$ 。则参考信号可以表示为

$$s_0(t) = \text{rect}\left(\frac{t-2R_0/c}{T_{ref}}\right) \cdot \cos\left(2\pi\left(f_c(t-2R_0/c) + \frac{1}{2}\mu(t-2R_0/c)^2\right)\right) \quad (19)$$

利用参考信号对回波信号进行外差处理, 可以得到

$$s_c(t) = \text{rect}\left(\frac{t-2R/c}{T_p}\right) \cdot \cos\left(-\frac{4\pi\mu}{c}\Delta R t - \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R + \frac{4\pi\mu}{c^2}(R^2 - R_0^2)\right) \quad (20)$$

对信号 $s_c(t)$ 进行希尔伯特变换后, 可得其解析表达式

$$s'_c(t) = \text{rect}\left(\frac{t-2R/c}{T_p}\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi\mu}{c}(t - \frac{2R_0}{c})\Delta R\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R\right) \cdot \exp\left(j\frac{4\pi\mu}{c^2}\Delta R^2\right) \quad (21)$$

(21)中共包含三个相位项, 其中第 1 项为距离项, 表征了目标和参考点的相对距离; 第 2 项为线性相位项, 当 ΔR 变化时, 该项会产生线性相位变化; 第 3 项为解线性调频方法所特有的残余视频相位(RVP), 对成像没有帮助, 可以通过补偿去除。去除 RVP 项, 对(21)式进行一维傅立叶变换, 即能完成距离向聚焦, 可以得到

$$S_c(\omega) = T_p \text{sinc}\left(T_p\left(f + \frac{4\pi\mu}{c}\Delta R\right)\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R\right) \quad (22)$$

可以发现, 完成距离向聚焦后, 得到的是一个 sinc 函数, 其峰值处于 $\omega = -4\pi\mu\Delta R/c$, 这就是成像时刻目标散射点的真实位置。在此基础上要进一步进行方位向聚焦才能完成成像。运动目标相对于雷达的运动可分为平动分量和转动分量, 其中平动分量对成像没有帮助, 可以采用包络对齐和相位校正的方法完成对其的运动补偿。因为短时间内各次目标距离像实包络或模值之间有高相似性, 所以可采用互相关法以不同回波峰值相对应的时延作补偿完成包络对齐。由于各次距离像中还包含平动分量表现出来的初相, 因此需做进一步的相位校正。这里采用目前应用较为广泛的基于特显点的相位校正方法完成初相校正, 即通过寻找存在孤立散射点的

距离单元, 令该孤立散射点的位置为转台的轴心, 将该距离单元内各次回波的相位校正为 0, 以完成运动补偿^[10]。

通过情况下, 在运动补偿的基础上, 对方位向进行傅立叶变换, 即可以完成方位向聚焦, 实现目标二维成像。但如果目标的尺寸较大, 则对于目标两侧的散射点, 会在径向穿过多个距离单元, 难以实现同一距离单元的相干积累, 从而出现越距离单元徙动。越距离单元徙动是由不同散射点与质心的距离不同所导致的, 这个问题可以通过 Keystone 变换加以解决^[16]。完成 Keystone 变换后, 再对回波信号进行距离向和方位向的二维傅立叶变换, 就能够完成聚焦, 实现对目标的二维图像。具体的成像流程如图 2 所示。

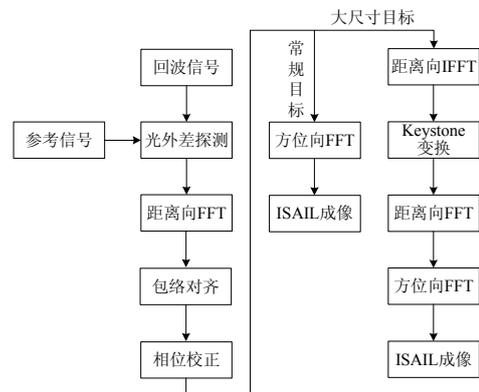


图 2 逆合成孔径成像激光雷达信号处理及仿真成像流程

3 成像结果仿真

在仿真过程中, 我们模拟实际情况进行仿真参数设置。

1. 发射模块

假设采用的是固体激光器作为发射源, 则可以设定发射信号的功率为 10MW, 发射孔径为 2m, 孔径的透光常数为 0.85, 束散角为 60mrad, 发射系统的发射效率为 98%。

2. 大气传输模块

不同的能见度会导致雷达探测距离的不同, 本文在仿真中考虑了不同能见度的情况, 利用 Beer 定律计算出了大气的消光系数并进一步确定了雷达的探测距离, 实验结果如表 1 所示。

3. 噪声模块

假设噪声的带宽为 60MHz, 探测器暗电流为 30nA, 探测器的负载电阻为 1 MΩ, 放大器的等效输入电阻为 12 MΩ, 探测器的响应率为 0.6 A/W。

4. 目标模块

目标为金属制飞机目标, 估计散射面积为 10 m², 目标反射率为 90%。

5. 接收模块

接收望远镜孔径为 3m, 接收效率为 90%, 假设采用的是碲镉汞探测器作为光电探测器。

表 1 回波功率结果

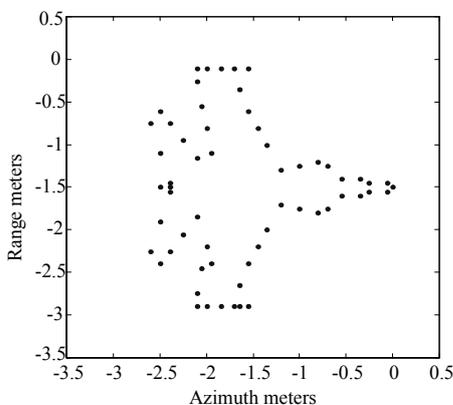
探测距离	较好	中等	较差
50km	$4.47 \times 10^{-7} \text{ W}$	$1.74 \times 10^{-7} \text{ W}$	$0.83 \times 10^{-10} \text{ W}$
100km	$2.79 \times 10^{-8} \text{ W}$	$1.08 \times 10^{-8} \text{ W}$	$1.97 \times 10^{-11} \text{ W}$
150km	$0.52 \times 10^{-8} \text{ W}$	$2.14 \times 10^{-9} \text{ W}$	$0.59 \times 10^{-12} \text{ W}$
200km	$1.74 \times 10^{-9} \text{ W}$	$0.68 \times 10^{-9} \text{ W}$	$0.92 \times 10^{-13} \text{ W}$
300km	$0.34 \times 10^{-9} \text{ W}$	$0.14 \times 10^{-9} \text{ W}$	$0.14 \times 10^{-13} \text{ W}$

用碲镉汞探测器对激光回波信号进行光外差探测, 探测灵敏度可达到 $1 \times 10^{-10} \text{ W}$ 。结合表 1 中回波功率仿真结果可以看出, 当能见度较好或中等的时候, ISAIL 基本能够探测到 300km 以外的目标。但是, 当能见度较差时, 对 50km 以外的目标探测都比较困难。因此, 雷达的作用距离时制约 ISAIL 使用的一个重要方面。在实际系统设计的工程中, 可以考虑通过增大发射信号功率或采用具有更高探测灵敏度的单光子探测器来进行对回波信号的探测, 来进一步提高雷达的探测距离, 也可以通过发射大气穿透性更好的激光信号来实现对目标的成像。

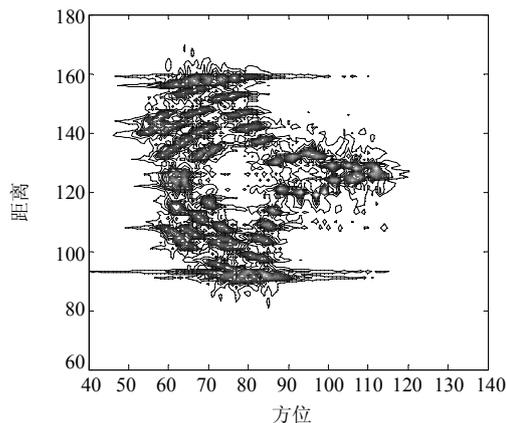
下面对微波波段的逆合成孔径成像雷达和逆合成孔径成像激光雷达的成像效果进行比较, 假设此时的能见度为中等, 雷达与目标的距离初始距离为 50km, 其余参数不变, 则此时目标的回波信号功率为 $1.74 \times 10^{-7} \text{ W}$, 雷达能够实现半径为 15km 内的运动目标实现探测, 根据接收机的灵敏度可以计算得到雷达能够有效探测到目标回波并实现成像。其他仿真参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真实验参数

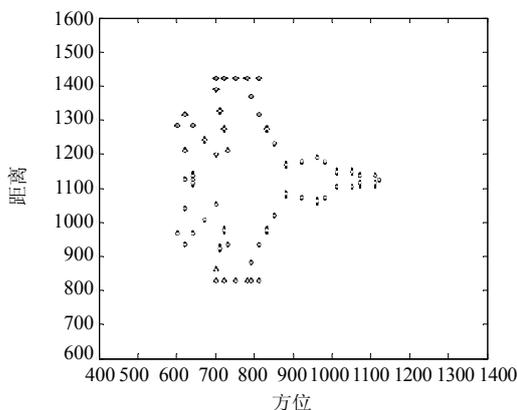
参数	ISAR	ISAIL
信号载频 f_c	$3 \times 10^{10} \text{ Hz}$	$3 \times 10^{13} \text{ Hz}$
信号带宽 B	300MHz	30GHz
脉冲重复频率 PRF	500Hz	5000Hz
脉冲持续时间 T_p	1.5 μs	1.5 μs
理论距离分辨率 Δ_r	0.5m	0.005m
理论方位分辨率 Δ_a	0.5m	0.005m



(a) 飞机模型



(b) ISAR 成像结果



(c) ISAIL 成像结果

图 3 成像结果比较

飞机目标的模型如图 3(a)所示, 由范围在 4m 内的散射点组成。图 3(b)和(c)分别为微波波段 ISAR 成像结果和 ISAIL 的成像结果。从图 3(b)中可以看出, 由于目标较小, 而 ISAR 成像的分辨率仅能达到 0.5m, 所以其成像效果较差, 难以满足识别需求; 而从图 3(c)中可以看出, 利用 ISAIL 能达到的成像分辨率为 0.005m, 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。因此, 在对小目标成像方面, ISAIL 具有显著的优势。此外, 仿真过程中可以发现, 在对相同的目标成像时, ISAR 成像所需要的时间约为 2.58 秒, 而 ISAIL 成像只用了 0.253 秒, 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 结论

逆合成孔径成像激光雷达是一种能够实现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。本文在综合考虑雷达在成像过程中可能会遇到的各种干扰影响, 设计了雷达的模拟系统, 利用计算机对成像结果进行了仿真, 取得了良好的效果, 充分证明了逆合成孔径成像激光雷达在能够有效实现对运动目标的实时成像, 并能够获得比

微波波段逆合成孔径雷达更高的成像分辨率, 这对提高目标的识别概率将起到很大的促进作用。

由于在实际成像过程中, ISAIL 将运用光外差技术实现对目标回波信号的探测, 而大气湍流的扰动会影响激光信号的相干性, 这会给后续的成像带来困难。因此, 研究能够合适的相位补偿方法是下一步需要完成的主要工作。

参考文献:

[1] Marcus Stephen, Barry D Colella, Thomas J Green. Solid-state laser synthetic aperture radar [J]. Appl. Opt (S0003-6935), 1994, 33(6): 960-964.
[2] Jin He, Ying Luo, Tong-an Feng, Chong Wang, Qun Zhang. Inverse Synthetic Imaging LIDAR: No Targets Can Hide [C]// WSANE. Shanghai, China: Fudan University, 2009, 11: 177-181.
[3] Thomas J Green, Stephen Marcus. Synthetic aperture radar imaging with a solid-state laser [J]. Appl. Opt (S0003-6935), 2003, 34(30): 6941-6949.
[4] 郭亮, 邢孟道, 张龙, 唐禹, 保铮. 室内距离向合成孔径激光成像的实验研究[J]. 中国科学 E 辑, 2009, 39(10): 1678-1684.
[5] 周煜, 孙建峰, 栾竹, 刘立人. 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): 2246-2248.
[6] 王省伟, 侯天晋, 周鼎富. 合成孔径激光雷达[J]. 激光技术, 2008,

32(1): 4-7.
[7] Streicherj Leikei, Werner C Aliens. Atmospheric Lidar end-to-ends simulator [C]// SPIE. USA: SPIE, 1998, 3585: 380-386.
[8] McBride W E, Weidemann A D. Meeting navy needs with the generic lidar model [C]// SPIE. USA: SPIE, 1999, 3761: 71-81.
[9] 高建军, 宿富林, 徐国栋. ISAR 成像中多径效应的消除 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(12): 3236-3240. (Jianjun Gao, Fuli Su, Guodong Xu. Multipath effects cancellation in ISAR image reconstruction [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2008, 20(12): 3236-3240.)
[10] 罗迎, 张群, 封同安, 金亚秋. 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.
[11] 保铮, 邢孟道. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
[12] 熊辉丰. 激光雷达[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
[13] 余德军, 龚俊斌, 马杰, 田金文. 激光成像雷达仿真技术研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(s4): 161-167.
[14] 尹世荣. 差分吸收激光雷达建模仿真及其信号处理算法的研究 [D]. 电子科技大学博士学位论文, 2004.
[15] Der S, Redman B, Chellappa R. Simulation of error in optics radar range measurements [J]. Appl. Opt (S0003-6935), 1997, 36(27): 6869-6874.
[16] 姜正林, 邢孟道, 保铮. ISAR 成像的越距离单元走动校正[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(5): 135-141.

(上接第 631 页)

4 结论

本文的理论分析和仿真实验均表明, 在对空间微动目标雷达回波进行仿真时, 不能简单借用传统的俯仰角、偏航角和滚动角的定义来描述目标的微动参数, 必须引入进动目标所独有的进动坐标系, 通过若干次坐标转换得到目标的姿态关系。同时, 由于雷达发射极化方向和目标特性测量时极化方向的不一致性, 在仿真目标回波时, 极化基变换是必不可少的一环。本文的研究成果可以为空间微动目标的极化检测、高分辨成像、识别算法设计等提供仿真数据支持, 同时也可以作为导弹攻防对抗仿真系统的一个关键子模块。

参考文献:

[1] K Schultz, S Davidson, A Stein, J Parker. Range Doppler Laser Radar for Midcourse Discrimination: the Firely Experiments [C]// 2nd Annual AIAA SDIO Interceptor Technology Conference. Albuquerque,

NM, USA: AIAA, 1993: 93-2653.
[2] 宁超, 周平. 弹头微运动实验室模拟测量研究 [C]// 第十届全国雷达学术年会. 中国北京: 2008, 1230-1233.
[3] 张居凤, 冯德军, 王雪松, 陈志杰. 雷达目标动态 RCS 仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(4): 834-837.
[4] 施龙飞, 李盾, 王雪松, 肖顺平. 弹道导弹动态全极化一维像仿真研究[J]. 宇航学报, 2005, 26(3): 345-348.
[5] 金光虎. 中段弹道目标 ISAR 成像及物理特性反演技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2009: 14-31.
[6] 张毅, 肖龙旭, 王顺宏. 弹道导弹弹道学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2005: 173-175, 5-23.
[7] 杨颖, 王琦. STK 在计算机仿真中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 175-190.
[8] Caputi W J. Stretch: a Time-transformation Technique [J]. IEEE Trans on AES (S0085-8985), 1971, 7(2): 269-278.
[9] 冯德军. 弹道中段目标雷达识别与评估研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2006: 68-70.
[10] 马梁, 冯德军, 王涛, 刘进, 王雪松. 高速目标距离像的结构特征及补偿方法研究[J]. 信号处理, 2009, 25(7): 1051-1056.