

文章编号: 1001-3806(2010)04-0538-04

基于合成孔径激光雷达的目标探测

王恩宏^{1,2}, 胡以华^{1,2*}, 李磊^{1,2}

(1. 电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037; 2. 电子工程学院 电子制约技术安徽省重点实验室, 合肥 230037)

摘要: 为了研究合成孔径激光雷达在目标探测中的应用, 从建立合成孔径激光雷达的信号传输及回波模型出发, 理论分析了合成孔径激光雷达回波信噪比、探测距离、合成孔径时间和解线性调频处理 4 个方面的特点与优点, 并与一般相干体制的激光雷达以及合成孔径雷达进行了对比。结果表明, 合成孔径激光雷达比一般相干体制雷达具有更高的回波信噪比和更远的探测距离, 且相对于合成孔径雷达具有更快的成像速度。这一结果有助于合成孔径激光雷达应用于远距离目标探测、跟踪与快速预警。

关键词: 激光技术; 合成孔径激光雷达; 相干探测; 目标探测

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.04.029

Target detection based on synthetic aperture ladar

WANG En-hong^{1,2}, HU Yi-hua^{1,2}, LI Lei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China; 2. Key Laboratory of Electronic Restriction of Anhui Province, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: To order to achieve the application of synthetic aperture ladar (SAL) in target detection, the characteristics and strong points of SAL in returning wave signal-to-noise ratio (SNR), detecting range, synthetic aperture time and linear frequency modulation orad demodulation were theoretically analyzed based on the signal transmission model and returning wave model. The performances were compared with traditional heterodyne ladar and synthetic aperture radar (SAR). The results show that SAL has higher returning wave SNR and farther detecting range than traditional heterodyne ladar, and the imaging speed is faster than SAR, which benefit the application of SAL on long range target detecting, tracking and fast early warning.

Key words: laser technique; synthetic aperture ladar; heterodyne detection; target detection

引言

合成孔径激光雷达 (synthetic aperture ladar, SAL) 采用光学外差的方式接收来自目标的回波信号, 并解调获得包含目标信息的差频信号。由于激光的波长很短, 因此相对于合成孔径雷达而言, 具有更高的方位分辨率和距离分辨率, 以及更短的合成孔径长度和相位累积时间, 在高精度成像侦察上具有很大的优点, 得到了国内外广泛的研究^[1-3], 并取得了很大的突破^[1]。但是, 正是由于激光波长很短, 导致其成像受到诸如光源非线性、大气扰动和平台震动等多种因素的影响^[4-7], 使得合成孔径激光雷达难以获得清晰的像。由于基于合成孔径技术的激光雷达具有比一般体制雷达

更高的输出回波信噪比, 因此, 在不需要高成像清晰度的目标探测上具有较高的应用前景。

1 目标探测原理

合成孔径激光雷达目标探测的基本原理如图 1 所示^[8]。合成孔径激光雷达沿直线运动, 在不同移动位

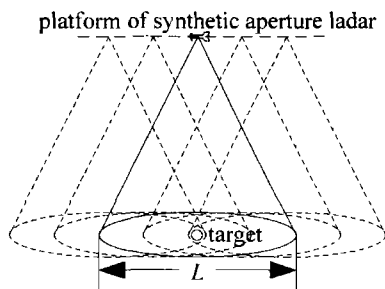


Fig. 1 Sketch of target detecting of SAL

置发射并接收来自目标的回波信号, 从图中可以知道能够获得目标回波信号的雷达平台, 全部的移动距离为一个合成孔径长度 $L = \lambda R/r$, 即与探测距离 R 、探测波长 λ 以及发射/接收光学孔径 r 有关。信

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60672154)

作者简介: 王恩宏 (1981-), 男, 博士研究生, 主要从事光电信息处理技术研究。

* 通讯联系人。E-mail: yh_hu@263.net

收稿日期: 2009-07-22; 收到修改稿日期: 2009-10-16

息处理单元将各处的回波进行合成孔径处理就可以得到目标信息。一般而言,最终获得的应该是目标的清晰图像,这就涉及最终的数据处理技术,好的数据处理算法才能获得清晰的图像,对于目标探测场合,仅需要知道某处“有什么”,并不需要知道某处“是什么”。那么采用一般的合成孔径处理就可以快速地发现目标,为预警做好准备。图2是激光雷达信号传播示意图。

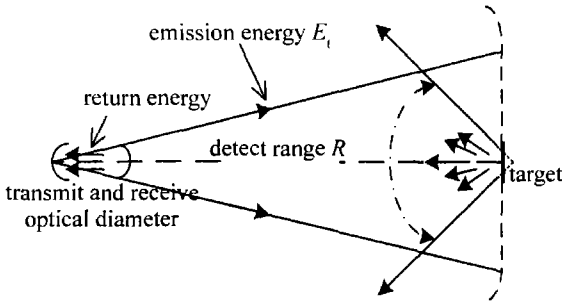


Fig. 2 Signal transmission of lidar

1.1 SAL 发射信号

合成孔径激光雷达对光源质量要求很高,假设使用的是 1550nm 基模激光,则距离束腰为 R (不考虑此处的透镜变换作用,则该距离即为探测距离) 的激光脉冲空间分布为:

$$E_{00}(x, y, R) = \frac{A}{w(R)} \exp\left(\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(R)}\right) \times \exp\left\{-i\left[k\left(R + \frac{x^2 + y^2}{2D(R)}\right) - \arctan\frac{R}{f}\right]\right\} \quad (1)$$

式中, A 为常数, $w(R) = w_0\sqrt{1 + (R/f)^2}$, w_0 为基模高斯光束的腰斑半径, $f = \pi w_0^2/\lambda$, $k = 2\pi/\lambda$, f 为高斯光束的共焦参量, $D(R) = R + f^2/R$ 为曲率半径。

合成孔径激光雷达发射的信号为线性调频 (linear frequency modulation, LFM) 信号,因此发射信号的时域分布^[9]为:

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp\left[i2\pi\left(f_c t + \frac{K}{2}t^2\right)\right] \quad (2)$$

式中, t 为时间,用以表示光传播的时间, T 为信号的脉冲宽度, f_c 为激光信号的载频频率, K 为线性调频率, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数。

因此, t 时刻发射的激光信号为:

$$E_i(x, y, 0, t) = E(x, y, 0) s(t) = (A/w_0) \times \exp\left(\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}\right) \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp\left[i2\pi\left(f_c t + \frac{K}{2}t^2\right)\right] \quad (3)$$

当探测远处物体时, $R \gg f$, (1) 式可以简化为:

$$E_{00}(x, y, R) = \frac{A\pi w_0}{\lambda R} \times \exp\left\{-i\left[k\left(R + \frac{x^2 + y^2}{2R}\right) - \arctan\frac{\lambda R}{\pi w_0^2}\right] - \frac{(x^2 + y^2)\pi^2 w_0^2}{\lambda^2 R^2}\right\} \quad (4)$$

当目标面积为 A_t 的漫反射点目标, $x^2 + y^2 \ll R^2$, 则发射至目标处某点的信号为 (c 为光速):

$$E_i(x, y, R, t) = \frac{Af}{Rw_0} \text{rect}\left(\frac{t - R/c}{T}\right) \times \exp\{-i[kR - \arctan(R/f)]\} \times \exp\left\{i2\pi\left[f_c(t - R/c) + \frac{K}{2}(t - R/c)^2\right]\right\} \quad (5)$$

1.2 回波信号

以 θ 角入射至目标的信号经目标散射沿 φ 方向返回光学接收孔径,并被有效截面为 A_r 的光学透镜接收,假设目标的雷达散射截面为 $\sigma(\theta, \varphi)$,则目标的散射信号为:

$$E_r(x, y, R, t) = E_i(x, y, R, t) \sigma(\theta, \varphi) \quad (6)$$

则以散射点为中心的目标散射光波返回至接收雷达的回波信号为:

$$E_r(x, y, R, t) = \frac{Af}{Rw_0} \sigma(\theta, \varphi) \text{rect}\left(\frac{t - 2R/c}{T}\right) \times \exp\{-i[k \cdot 2R - \arctan(2R/f)]\} \times \exp\left\{i2\pi\left[f_c(t - 2R/c) + \frac{K}{2}(t - 2R/c)^2\right]\right\} \quad (7)$$

利用一个与之具有相干性的参考光信号对该线性调频回波信号进行解调,即可以获得包含目标信息的差频信号,对此差频信号再进行相应的合成孔径成像处理,就可以获得目标的图像信息。

2 探测性能分析

2.1 信噪比与探测距离

考虑光学系统的增益、激光传播过程中的大气衰减以及光学系统衰减的影响,合成孔径激光雷达光学系统的接收功率为^[8]:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} T_o T_a \quad (8)$$

式中, T_o 为雷达光学系统的透过率, T_a 为双程大气透过率, G_t 和 G_r 分别为发射和接收光学系统的增益, P_t 为发射功率。

对接收信号进行线性调频脉冲压缩和合成孔径处理后的雷达系统信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 为^[8-9]:

$$R_{\text{SAL}} = \frac{(T\Delta f)(T\Delta f_D) P_t G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 [hc/(\lambda\eta)BF]} T_o T_a \quad (9)$$

式中, $T\Delta f$ 为线性调频脉冲压缩获得的处理增益, $T\Delta f_D$ 为合成孔径处理获得的增益, Δf 为信号带宽, Δf_D 为最大多普勒频率, $hc/(\lambda\eta)$ 为光电探测器的单位带宽噪声功率, h 为普朗克常数, η 为量子效率, F 为接收器的噪声系数, B 为接收机带宽。

考虑相干积累时间, $T_{acc} = \lambda R / (rv)$, r 为发射孔径, v 为平台运动速率, 脉冲重复频率 $f_r \geq 2\Delta f_D$, $B \approx \Delta f$, 以及平均发射功率 $P_{av} = P_i T f_r$, 天线增益与接收有效孔径之间的关系 $G_t = G_r = (2\pi r / \lambda)^2$ 。当 $f_r = 2\Delta f_D$ 时, 此时 SAL 的信噪比最大, 其表达式为:

$$R_{SAL} = \frac{\pi \sigma \eta T_o T_a}{8hcFv} \left(\frac{r}{R}\right)^3 P_{av} \quad (10)$$

目前, 激光雷达的峰值功率 P_i 可以达到 10^6 W, 而合成孔径激光雷达要求的激光脉冲重复频率 f_r 为 10^4 Hz ~ 10^5 Hz, 若脉冲宽度 $T = 10^{-9}$ s, 平台运动速度 $v = 100$ m/s。则合成孔径激光雷达的探测信噪比随探测距离、接收孔径大小变化如图 3 所示。图 4 说明了平台运动速度对 SAL 探测信噪比的影响。

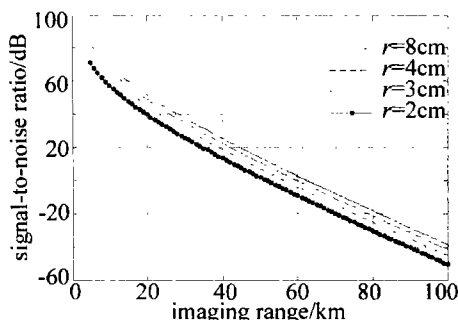


Fig. 3 SNR of SAL varies with range

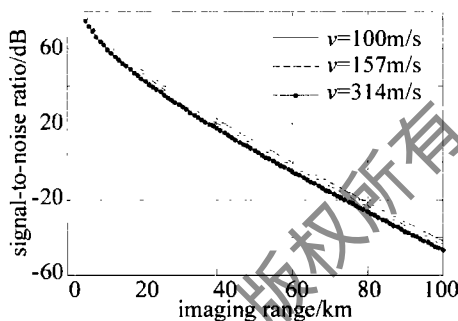


Fig. 4 SNR of SAL varies with the velocity of moving platform

从图 3 中可以看出, 接收孔径对探测信噪比的影响不大, 当接收孔径为 2cm 时, 其探测距离大约为 50km, 而接收孔径为 5cm 时的探测距离约为 60km, 但前者具有较高的成像精度, 且成像精度仅与所使用的雷达接收孔径有关。可见, 合成孔径激光雷达的成像精度与探测距离是相互矛盾的, 在实际使用中须权衡两者的关系。利用这种特性, 在实际应用中可以使用大的接收孔径对目标进行远距离的探测、跟踪与预警, 做好相应的应对措施, 一旦目标进入一定威胁距离后, 再利用小孔径对目标进行成像识别, 以获得更多的目标细节信息。

由图 4 可知, 平台运动速度的大小对回波探测信噪比的影响不大, 当平台速度从 100m/s 提高到 314m/s 时, 其 3dB 探测距离仅从 57km 降低至 52km。

一般相干激光雷达探测的信噪比为^[10]:

$$R_i = \frac{\pi P_i r^4 \sigma \eta g}{4hc\lambda BR^4} T_o T_a = \frac{\pi \sigma \eta g T_o T_a}{4hc\lambda B} \left(\frac{r}{R}\right)^4 P_i \quad (11)$$

式中, g 为外差效率。

由图 5 可以看出, 采用合成孔径激光雷达对目标

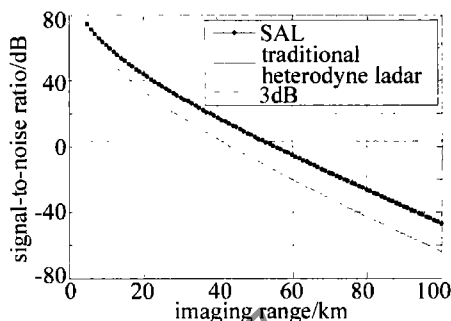


Fig. 5 The performance difference of two different lidar systems

进行探测, 经过相应的脉冲压缩和合成孔径处理后, 拥有比一般相干雷达更高的回波信噪比, 且回波信噪比的优势随着距离的增加逐渐变大。在回波信噪比为 3dB 的时候, 采用合成孔径技术的激光雷达, 探测距离约为 57km, 而一般的相干激光雷达的探测距离仅为 41km (波长 $\lambda = 1550$ nm)。因此, 采用合成孔径技术的激光雷达对目标进行探测在探测距离上具有较大的优势。

2.2 合成孔径时间

合成孔径激光雷达在飞过合成孔径长度内完成相位积累, 其合成孔径长度 L 与波束宽度 θ_w 成正比, 即 $L = \theta_w R$ 。

对于圆形孔径的光学系统, 其波束宽度为 $\theta_w = 1.22\lambda/r$, 则在接收孔径 $r = 4$ cm、探测距离为 50km 时的合成孔径时间 (相干积累时间) 为 $T_{acc} = 1.22\lambda R / (rv) = 0.0236$ s。

由于合成孔径处理需要以两个孔径的数据进行处理得到一个孔径的图像^[8], 因而, 其成像处理的时间大约是 0.05s。

在同样的平台运动速度下, 由于合成孔径雷达的波长远大于激光波长, 因此其合成孔径时间远大于 SAL 的合成孔径时间, 假设某合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 方位波束宽度为 1° , 其它条件不变, 则其合成孔径时间为 $T = \theta_w R / v = 8.73$ s, 同理, 其成像时间大约为 17.5s。

可见, SAL 比 SAR 能够更快的获得目标信息, 满足对目标快速、实时探测预警的要求。

2.3 解线性调频处理

SAL 与 SAR 都要对线性调频回波信号进行解线性调频处理, 即用一个时间固定, 频率、调频率相同的 LFM 信号作为参考信号 $s_{ref}^*(t, t_m)$, 与回波信号 $s_r(t, t_m)$ 做差频处理以获得与场景距离 R_i 成比例的差频信号 $s_{if}(t, t_m)$ ^[9]:

$$s_{if}(t, t_m) = s_r(t, t_m) \times s_{ref}^*(t, t_m) \quad (12)$$

$$s_{if}(t, t_m) \propto \exp\left[-i \frac{4\pi}{c} K \left(t - \frac{2R_{ref}}{c}\right) R_\Delta\right] \times \exp\left(-i \frac{4\pi}{c} f_c R_\Delta\right) \exp\left(i \frac{4\pi}{c^2} K R_\Delta^2\right) \quad (13)$$

式中, $R_\Delta = R_i - R_{ref}$, R_i 为某点目标到雷达的距离, R_{ref} 为参考距离, t_m 表示脉冲发射的不同时刻 ($m = 0, 1, 2, \dots$)。

如图6所示,虽然两者具有相同的解线性调频原

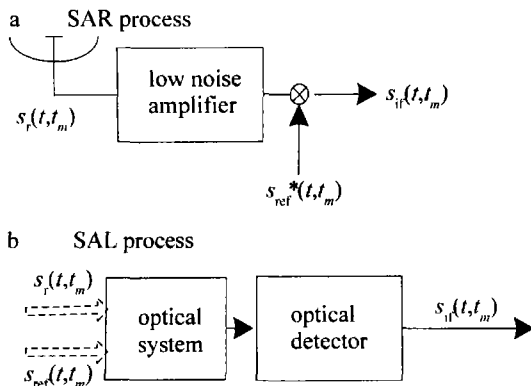


Fig. 6 Demodulating process differences between SAR and SAL

理,但是合成孔径雷达是通过信号处理方式进行解调的,雷达天线将目标回波转换成电信号,然后再将该信号与参考电信号进行解调处理,整个过程涉及到信号处理电路的设计与算法流程,结构复杂,处理时间随回波信号的复杂度变化。而合成孔径激光雷达采用的是纯光学器件,光学系统直接将回波信号光与本振光同时照射到光电探测器表面,其输出光电信号直接就是解线性调频后的信号,解调速度快,系统设计较简单。

3 结论

合成孔径激光雷达作为一种特殊信号接收和处理

体制的相干探测激光雷达,具有探测距离远、信号处理时间快等特点,适合应用于对目标成像精度要求不高的目标探测跟踪、预警等场合。根据其接收回波信噪比随孔径增大而增加,以及成像精度随孔径减小而增加的特点,在实际应用中可以根据目标探测与识别的需求调整接收孔径的大小,达到远距离发现、跟踪目标,近距离识别目标的目的。

参考文献

- [1] WANG Sh W, HOU T J, ZHOU D F, *et al.* Synthetic aperture lidar [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1): 4-7 (in Chinese).
- [2] ZHOU Y, SUN J F, LUAN Zh, *et al.* Aperture-synthesizing experiment of a down-scaled synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(12): 2446-2448 (in Chinese).
- [3] BUELL W, MARECHAL N, BUCK J, *et al.* Demonstrations of synthetic aperture imaging lidar [J]. *Proc SPIE*, 2005, 5791: 152-166.
- [4] BECK S M, BUCK J R, BUELL W F, *et al.* Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing [J]. *Appl Opt*, 2005, 44(35): 7621-7629.
- [5] LIU H T, WANG Zh Zh, LI Ch, *et al.* Numerical simulation analysis for detectability of spaceborne lidars [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6): 614-617 (in Chinese).
- [6] XU G Y, WU J, YANG Ch P, *et al.* Simulation and optical scintillation research of Gaussian beam in atmosphere turbulence [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(5): 548-550 (in Chinese).
- [7] MA J, HAN Q Q, YU S Y, *et al.* The effect of vibration on intersatellite optical communication and resolving project [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(3): 228-231 (in Chinese).
- [8] XIANG J Ch. *Radar system* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000: 188-210 (in Chinese).
- [9] BAO Zh, XING M D, WANG T. *Radar imaging technology* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 24-25 (in Chinese).
- [10] DAI Y J. *The principle of lidar* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 6-16 (in Chinese).

(上接第537页)

式中, $I(\phi, \beta)$ 为海面反射激光的辐射强度, J 为探测设备接收的反射光能量, τ_a 为测量路程上的大气透过率, S_r 为测量设备有效接收面积, R 为测量距离。

将(11)式与(10)式作对比计算,即可得到反射激光信号辐射强度与入射激光能量密度的关系式:

$$I(\phi, \beta)/E = \frac{J}{\tau_a} \times \frac{R^2}{S_r} \left/ \left(\frac{J_0}{S_{spot}} \right) \right. \quad (12)$$

(12)式表示在确定了对海面布设激光假目标方式后,海面波动程度为 k 时,在有效反射区域内不同观测方向上反射光与入射光之间的关系,其计算结果可为激光有源对抗的实施提供依据。

3 结论

海面对入射激光的反射特性,是受多种因素影响

的复杂过程。作者提出在实际环境条件下进行海面反射激光特性的测量方法,是了解和掌握不同海况条件下,海面对入射激光的反射特性和能量分布最直接和有效的技术途径,其测量结果可为舰载激光对抗装备的研究、发展和应用提供基础数据。

参考文献

- [1] LIU J J. *Electro-optical countermeasure technology and system* [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1995: 146-148 (in Chinese).
- [2] YAO L X, CHOU W L, WANG F H. *Optical characteristics of target and environment* [M]. Beijing: Astronautics Press, 1995: 200-202, 276-277 (in Chinese).
- [3] MA Y. *Transmitting characteristics of 1.064 μm laser in seawater* [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(5): 502-504 (in Chinese).