

文章编号: 1001-3806(2008)01-0004-04

合成孔径激光雷达

王省伟¹, 侯天晋², 周鼎富², 周 昕^{*}

(1. 四川大学 光电科学技术系, 成都 610065; 2. 西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 介绍了一种新体制的激光成像雷达——合成孔径激光雷达, 对它的成像基本原理、国内外研究进展和回波信号基本处理方法作了描述, 介绍了它的关键技术和国内外技术差距, 指出其在军事、科学研究、工业生产中都有广泛的应用前景。

关键词: 成像系统; 合成孔径激光雷达; 相干探测; 多普勒频移; 光学聚焦

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Synthetic aperture lidar

WANG Sheng-wei¹, HOU Tian-jin², ZHOU Ding-fu², ZHOU Xin^{*}

(1. Department of Optoelectronic Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract A new-style lidar, synthetic aperture lidar, was introduced. The principle and progress of synthetic aperture lidar were described in detail and the signal processing methods were introduced. The key techniques and the difference at home and abroad in developing synthetic aperture lidar system were briefly introduced. Finally, the developmental perspective in military, scientific research and industrial production was put forward.

Key words imaging systems; synthetic aperture lidar; coherent detector; Doppler frequency shift; optical focus

引 言

合成孔径技术在上个世纪 50 年代被提出后, 在微波波段得到了广泛的应用。近年来由于激光器技术、光电探测技术和信息处理技术的快速发展促进了合成孔径技术在光波段的发展。合成孔径激光雷达就是合成孔径技术在光波段应用的产物, 它在同样条件下具有比微波雷达高得多的分辨率, 能够提高远距离成像的分辨率, 有空间时间分辨率高、探测动态范围大、能穿越较薄云层和稀疏树叶遮挡等技术优势, 可直接获取地表的高精度三维信息^[1]。

1 合成孔径激光雷达的基本原理

1.1 合成孔径激光雷达的基本概念

合成孔径激光雷达是利用激光雷达相对于目标的运动, 把尺寸较小的真实天线孔径通过数据处理的方法来合成为一较大的等效天线孔径的雷达。如果阵元(或小孔径雷达)不动, 而目标运动也可以获得很高的

横向分辨率, 严格来说, 按这种方式工作的称为“逆合成孔径激光雷达”。天线孔径之所以能够合成, 实质上是利用目标和雷达之间的相对运动所产生的多普勒频移, 然后再经过信息处理(多普勒匹配滤波技术或相关积分技术)提取出多普勒频移, 从而达到提高横向分辨率的目的。

合成孔径雷达最关键的技术点在于信号合成以提高横向分辨率, 采用小天线排成线阵的方法, 可以达到这一目的。用一个由 n 个阵元组成的大孔径线性阵列天线, 如图 1a 所示, 在发射时, 每个阵元同时发射相参

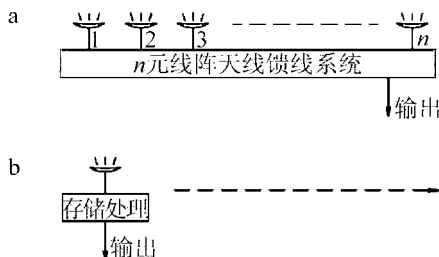


Fig 1 n 个阵元的线阵天线和单阵元天线

信号, 可形成很窄的天线方位波束; 在接收时, 每个阵元又同时接收到回波信号, 然后在馈线中进行同相加, 就可以形成很窄的方位接收波束。在实际的应用中, 可以只用一个阵元(或一个小孔径天线)先在长天线第 1 个阵元处发射和接收, 再沿直线步进移动到

作者简介: 王省伟(1979-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光与光通信的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhoxin@cn.com

收稿日期: 2006-12-30 收到修改稿日期: 2007-03-22

第 2 个阵元处发射和接收, 依次进行, 一直到第 n 个阵元处发射和接收完为止, 如图 1b 所示。把每次接收到的回波信号依次全部存储起来, 然后同相相加, 其效果与 n 元长线阵同时发射和接收类似。由简单的几何关系合成孔径阵列的横向距离分辨率为 $\delta_x = D/2$ 即方位分辨率等于单个天线孔径的一半, 其中, D 为单个天线的孔径。实际得到的方位分辨率要小于这一理论值。雷达的距离分辨率取决于信号带宽, 其分辨率为 $\delta_r = c/(2B)$, 其中 c 为光速, B 为雷达发射信号带宽^[2-4]。

1.2 合成孔径激光雷达信号处理的基本方法

合成孔径激光成像雷达的信号处理有非聚焦型和聚焦型两种^[4-6]。在图 2 中画出了飞行航线和场景里

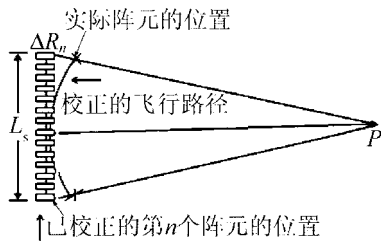


Fig 2 聚焦原理的示意图

的点目标 P , 合成孔径沿航线排列, 如果合成孔径长度不大, 可用与球面波相切的一小段直线近似为球面波的弧线, 这时可用平面波时各阵元的信号直接相加来近似重建目标, 这就是非聚焦方法。如果合成孔径较长, 就应考虑目标 P 回波的波前为球面波, 这时不同阵元上的信号有不同的相位差, 只有补偿相位差后相加才能正确重建, 这就是光学系统的聚焦方法。

与非聚焦型相比聚焦型可以实现更长的合成孔径, 所以这里主要阐述聚焦型合成孔径激光雷达的信号处理方法; 在聚焦处理时, 需要提取回波的相位信息, 合成孔径激光雷达 (synthetic aperture lidar, SAL) 通常采用相干探测体制。聚焦型合成孔径技术中的信号处理包含两个步骤: (1) 对回波信号进行相位加权或相位调整, 使每个信号的相位成为同相 (这个过程就是“聚焦”过程); (2) 同相信号相加。

相位校正采用图 2 所示的原理^[7]。对于第 n 个阵元位置的相位校正, 根据所示的图形可列出方程如下:

$$(\Delta R_n + R_0)^2 = R_0^2 + (ns)^2 \quad (1)$$

式中, R_0 为从垂直的 SAL 阵元到被校正的散射体的距离, ΔR_n 为垂直的 SAL 阵元和第 n 个阵元之间的距离, n 为被校正阵元的序号, s 为阵元之间的飞行路径间距。

在 $\Delta R_n / (2R) \ll 1$ 的情况下, 由上述方程解出:

$$\Delta R_n = \frac{n^2 s^2}{2R_0} \quad (2)$$

与聚焦距离误差有关的相位误差为:

$$\Delta \varphi_n = \frac{2\pi(2\Delta R_n)}{\lambda} = \frac{2\pi n^2 s^2}{\lambda R_0} \quad (3)$$

式中, $2\Delta R_n$ 是考虑了来回双程。

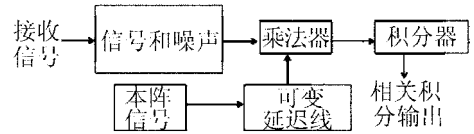


Fig 3 信号相关处理的基本方法

信号处理相关积累的基本方法见图 3^[8]:

$$\rho(\tau) = \int_{-T}^T [S(t) + N(t)] S(t - \tau) dt \quad (4)$$

式中, 积分的第 1 项为接收信号加噪声, 第 2 项为经过延迟的基准信号, $\rho(\tau)$ 是相关积分输出信号, $-T \sim T$ 为目标的积累时间, τ 表示基准信号和接收信号之间的相对延迟。当经过可变延迟线后的基准信号与要显示的地面回波信号在时间上重合, 即 $\tau = 0$ 时, 得到该地面回波最大地积累输出:

$$\rho(\tau = 0) = \int_{-T}^T |S(t)|^2 dt + \int_{-T}^T N(t) S(t) dt \quad (5)$$

式中, 第 1 项是需要的目标输出, 第 2 项是重叠在目标信号上的噪声输出; 在聚焦处理过程中自相关过程是等效于匹配滤波处理的。合成孔径雷达的图像是对回波信号先进行距离向压缩, 再进行方位向聚焦后获得的。

2 合成孔径激光雷达的研究进展及现状

人们对光合成孔径的研究从 20 世纪 60 年代就开始了。60 年代末期, HERBERT 和他的同伴们利用氦氖激光作光源, 用安装在钟摆上很窄且靠得很近的两个竖直镜作为目标, 并用一个安装在目标附近和目标到光源的距离相等的反射镜提供参考光, 回波信息记录在感光板上, 再利用激光光束将记录在感光板上的信息恢复出来。该实验成功地得到了光合成孔径的一维图像, 试验设备简单, 相位误差小, 在实验室中很容易实现, 但不适合实际的外场成像。

1995 年, 美国林肯实验室^[9-10] 用一个二维激光合成孔径成像试验成功获得了二维合成孔径的图像。实验中用一个单模连续波 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, $P = 5\text{mW}$ 的 NY:YAG 激光器, 一个高速低噪声的锗光电二极管探测器, 一个直径为 60cm 的转盘, 目标是尺寸约为 5cm 的坦克模具, 雷达与目标之间地距离为 2.5km, 目标的运动可近似看成是线性的, 这是一个逆合成孔径激光雷达成像。由于方位向的分辨率高于距离向的, 实验还采用距离向比方位向尺寸大的接收孔径, 以收到更好的成像效果, 如图 4 所示。

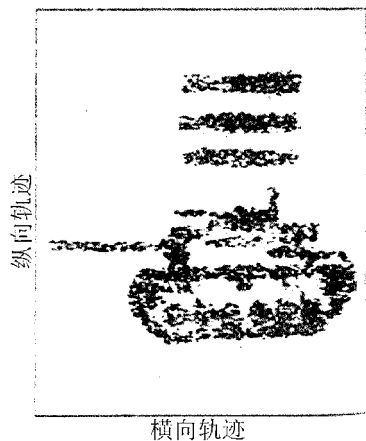


Fig 4 林肯实验室得到的合成孔径图像

2000年,日本通讯研究实验室^[11-12]在实验室短距离范围内做了一维合成孔径红外激光雷达的成像试验,成功地分辨出了相距很近的两个点目标,实验装置如图5所示,图中M为反射镜。实验中采用波长为

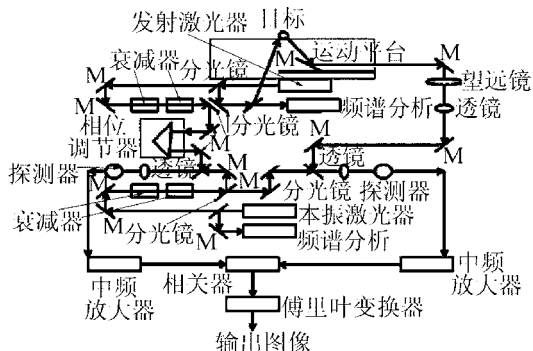


Fig 5 日本通讯实验室的实验方框图

$\lambda = 10\ 591\ \mu\text{m}$ 的两个 CO_2 激光器,两个 HgCdTe 探测器。相位调节装置最小步幅为 $400\ \text{m}$,平台的位置精度为 $1\ \mu\text{m}$,接收孔径是直径为 $20\ \text{cm}$ 的平面镜。实验中的接收孔径是运动的,可以说是一次真正意义上的合成孔径激光雷达成像。

2005年,美国航天局^[13]BECK和他的同事们在实验室条件下用脉冲光纤激光器作为发射光源,用光纤作为传输介质成功获得了合成孔径激光雷达的二维图像。激光器发出的激光被分成5个部分:目标光束、目标本振光束、参考光束、参考本振光束和脉冲同步光束。目标与光路成 45° 角放置,信号的采样频率为 $2\ 5\ \text{MHz}$,发射孔径的移动步幅为 $50\ \mu\text{m}$,实验用啁啾时间为 $0\ 36\ \text{s}$ 的脉冲成功得到了漫反射目标的图像,如图6所示。

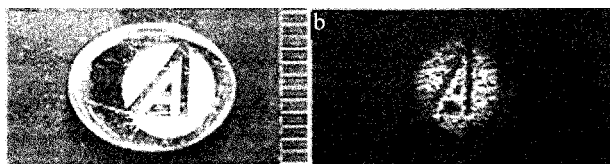


Fig 6 美国航天局得到的合成孔径图
a—原始图像 b—合成孔径图像

2006年,WITOMSKI和LACOT^[14-15]利用一个电压控制扫描镜扫描目标,通过扫描使发射光束和目标产生相对运动,回波信号经过变频后再次注入激光器放大输出,激光器既作为发射装置又作为接收装置,光束的束腰就是发射孔径,利用合成孔径技术成功分辨出两个点目标。实验中用的激光器是连续波 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器,光束的束腰半径为 $330\ \mu\text{m}$,两个频率偏移器,一个射频电压为 $81\ 5\ \text{MHz}$,另一个射频电压为 $81\ 5\ \text{MHz} + f/2$,激光器到扫描镜的距离为 $L = 180\ \text{cm}$,扫描镜到目标的距离为 $l = 20\ \text{cm}$,两目标点之间的距离为 $\Delta r = 185\ \mu\text{m}$,目标点的尺寸 $D \approx 4\ \text{mm}$ 。该实验和以往实验相比,简化了光束的发射和接收装置,减小了以往机械振动带来的相位误差,在不增加实验装置的情况下放大了回波信号。

2006年2月,美国国防预先研究计划局的研究人员首次从一部机载激光雷达得到了合成孔径图像,这是该计划局的战术机载激光合成孔径雷达计划在第1阶段所取得的巨大成就。第1幅激光雷达合成孔径图像的数据是于2006-02-17在美国加州爱德华兹空军基地由雷声公司空间和机载系统部采集和处理的;激光器的部件,如激光发生器、放大器和检波器等都是采用的商用产品。另外一家研制厂商诺斯罗普·格鲁门公司电子系统部于2006-04-02在加州爱德华兹空军基地也独立地得到了激光雷达合成孔径图像,他们采用了最新开发的 CO_2 气体激光器,还使用了各种不同的军用和民用目标,并对数据采集期间的气象条件进行了周密的测定。

从对合成孔径概念的实验验证,到实验室条件下的模拟实验,再到21世纪机载合成孔径激光雷达的外场成像,合成孔径激光雷达技术在国外经过近半个世纪的研究正逐步走向工程化。

3 合成孔径激光雷达的关键技术和国内外技术差距

就目前的条件来看,SAL实现的难点主要集中在相干探测技术和数据处理技术方面。SAL的实现通过光频相干技术检测出多普勒频移,由于一般SAL探测距离较远且激光的波长较短,对接收平台的位置精度要求较高,实现起来有一定的难度。此外,激光器要求输出单模、高重频、振荡频率和相位稳定的激光,激光的相干时间要和合成孔径时间相匹配;光混频器上信号光与本振光偏振方向一致,两者要求空间波前匹配;由于SAL与目标相对运动,目标的动态范围较大,所以必须保证接收系统有足够高的灵敏度,均匀的光敏表面,足够的高频响应,稳定的量子效率。由于激光波

长较短,受大气等因素的影响较大,相位畸变较为严重,降低了相干探测的效率,聚焦效果较差,从而降低了系统的分辨率;数据的处理量大,对硬件的要求高,所以,成熟 SAR 算法的移植或发展新的校正相位的算法显得十分重要^[16,17]。

美国在 2006 年的 2 月份首次得到了激光雷达的合成孔径图像,而国内还没有相关的实验室试验报道,在这方面和国外有相当大的差距。但国内在微波频段相对比较成熟的合成孔径雷达技术和国外成功的实验报道可以给我们提供更多的借鉴。

4 小 结

合成孔径激光雷达可以大大提高现代化作战的性能,既可装备战斗机和轰炸机,也可以装备监视飞机和无人机;还可用于灾害和环境监测、海洋观测、资源勘察、农作物调查估产、森林调查等民用方面;在军事、科学研究、工业生产中都有广阔的应用前景^[18,19]。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Zh Zh. Introduce to airborne and spaceborne synthetic aperture radar [M]. Beijing Publishing House of Electronics Industry 2004 1-8(in Chinese).
- [2] BUELL W F, MARECHAL N J, BUCK J R. Synthetic aperture imaging radar [J]. The Aerospace Corporation Magazine of Advances Technology 2004, 5(2): 45-49
- [3] ALEKSOFF C C, ACCETTA J S, TAIM A, *et al*. Synthetic aperture imaging with a pulsed CO₂ TEA laser [J]. SPIE, 1987, 783: 29-40.
- [4] THOMAS G K. High resolution laser imaging system [J]. Appl Opt 1989, 28(13): 2651-2656
- [5] BASHKANSKY M, LUCKE R L. Two dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain [J]. Opt Lett 2002, 27(22): 1983-1985.

(上接第 3 页)

后,输出激光的功率不再有明显的变化。因此,要获得高功率的激光,光纤长度应该短一些,这样达到斯托克斯光的阈值比较高;但是由于此时的抽运效率又比较低,所以在做光纤激光器的时候,应合理选择光纤长度,得到满意的功率和抽运效率。

参 考 文 献

- [1] CHEN JX, SUI Zh, CHEN F Sh *et al*. Stimulated Raman scattering in high power double clad fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers 2006 33(3): 298-302(in Chinese).
- [2] IDO K, AMOS H. Optimization of strongly pumped fiber lasers [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(5): 891-897.
- [3] HU G J, SHANG Ch Y, DENG X Y, *et al*. Threshold characteristics of linear cavity Yb³⁺-doped double clad fiber laser [J]. Optics & Laser Technol 2004, 37(7): 3-7
- [4] ZENG H F, XIAO F H. The development of Yb-doped double-clad fiber laser and its application [J]. Laser Technology, 2006 30(4):

- [6] BAO Zh, XING M D, WANG T. Radar imaging techniques [M]. Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2005: 9-11(in Chinese).
- [7] ZHANG M Y, WANG X G. Radar system [M]. 2nd ed Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2006 316-320(in Chinese).
- [8] TANG Z Y, ZHANG Sh R. Basic synthetic aperture radar [M]. Beijing Publishing House of Science, 2003 9-18(in Chinese).
- [9] MARCUS S, COLLELLA B D, GREEN T J. Solid-state laser synthetic aperture radar [J]. Appl Opt 1994, 33(6): 960-964.
- [10] GREEN T J Jr, MARCUS S, COLELLA B D. Synthetic-aperture radar imaging with a solid-state laser [J]. Appl Opt 1995 34(30): 6941-6949
- [11] YOSH KADO 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
- [12] YOSH KADO S, ARUGA T. Short range verification experiment of a trial one dimensional synthetic aperture infrared laser radar operated in the 10mm band [J]. Appl Opt 2000 39(9): 1421-1425
- [13] 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.
- [14] WITOMSKIA, LACOT E, HUGON O, *et al*. Synthetic aperture laser optical feedback imaging using galvanometric scanning [J]. Opt Lett 2006 31(20): 3031-3033.
- [15] LACOT E, DAY R, SPOECKEL F. Laser optical feedback tomography [J]. Opt Lett 1999 24(11): 744-746.
- [16] JAKOWATZ C V Jr, WAHL D E. Eigenvector method for maximum likelihood estimation of phase errors in synthetic aperture radar imagery [J]. JO SA, 1993 A10(12): 2539-2546
- [17] KARR T J. Resolution of synthetic aperture imaging through turbulence [J]. JO SA, 2003 A20(6): 1067-1083
- [18] CHEN Y, WANG Y L, ZHOU D F, *et al*. Faint signal processing of lidar based on wavelet multiresolution analysis [J]. Laser Technology, 2005, 29(3): 278-280(in Chinese).
- [19] WANG Zh K, BI J M, ZHOU X, *et al*. Investigation on dual beam Doppler speedometer based on CO₂ lasers [J]. Laser Technology 2006 30(2): 183-185(in Chinese).

438-441(in Chinese).

- [5] WANG Y, XU Ch Q, PO H. Analysis of Raman and thermal effects in kilowatt fiber lasers [J]. Opt Commun 2004, 242 487-502
- [6] ZHANG L P, DUAN Zh Ch, CHEN J G, *et al*. Analytical solution of the threshold pump power of a double clad fiber lasers [J]. Optoelectronic Engineering 2006 33(11): 101-104(in Chinese).
- [7] DUAN Zh Ch, CHEN J G, ZHANG L P, *et al*. On the question of analytically solving rate equations of a double clad fiber laser [J]. Laser Technology, 2007 31(3): 274-276(in Chinese).
- [8] XIAO L M, YAN P, GONG M L, *et al*. An approximate analytic solution of strongly pump Yb-doped double clad fiber lasers without neglecting the scattering loss [J]. Opt Commun 2004, 230 401-410
- [9] VAUDELLE F. Experimental study of the laser and stimulated Raman scattering wave phases by a nonlinear imaging method [J]. Opt Commun 1998, 149 84-88
- [10] ZHANG D Y, GONG J M, LI J D. A effects of loss to output characteristics of Yb³⁺-doped double clad fiber lasers [J]. Laser Journal 2005 26(3): 13-14(in Chinese).