

文章编号: 1001-5078 (2006) 增刊 -0732-05

新体制成像激光雷达发展评述

倪树新

(中国电子科技集团公司第 27 研究所, 河南 郑州 450005)

摘 要: 概述成像激光雷达的军事应用前景及其对成像激光雷达的性能要求, 重点论述几种新体制成像激光雷达 (包括基于光学相控阵的电扫描成像激光雷达、非扫描 3D 成像激光雷达和合成孔径成像激光雷达) 研究工作的新进展。

关键词: 激光雷达; 激光成像; 光学相控阵; 非扫描 3D 成像; 合成孔径成像

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

Review on Development of the New Imaging Laser Radar Systems

NI Shu-xin

(China Electronics Technology Group Corporation No. 27 Research Institute, Zhengzhou 450005, China)

Abstract: After briefly introducing the military application foreground and the performance requirement on the imaging laser radar, the paper mainly discusses research progress on several new imaging laser radar systems, including imaging laser radar based on optical phased array technology, nonscanner 3D imaging laser radar and synthetic-aperture imaging laser radar.

Key words: laser radar; laser imaging; optical phased array; nonscanner 3D imaging; synthetic-aperture imaging

1 目标识别是军用激光雷达的重要战术功能, 高空空间分辨率、高帧频、多维成像和适装性是激光成像雷达的发展方向

激光技术的发展为雷达提供了一种较为理想的辐射源, 激光雷达将极高的工作频率 (较微波雷达的工作频率约高 4 个数量级) 和成熟的雷达技术相结合, 将光、机、电融合于一体, 形成具有独特性能的崭新雷达体制。正是激光的良好相干性和其工作频率的量变, 使得雷达的分辨率 (空间分辨率、时间分辨率和频率分辨率) 和“四抗”能力 (抗电子战能力、抗反辐射导弹攻击能力、抗低空/超低空突防能力和抗隐身目标能力) 产生质的飞跃, 在低可观测性目标探测、高分辨率目标识别、高精度跟踪/测量等方面表现出明显的技术优势^[1]。

激光成像雷达是激光雷达的重要属类, 也是目前和未来研究和发展的重点, 其主要战术功能是装

备于陆、海、空、天各种机动平台, 执行非合作目标识别/分类、精确制导武器成像制导、战场侦察和打击效果评估等。这就要求激光成像雷达必须具有极高的空间分辨率, 足够的帧速率, 多维目标信息和良好的适装性, 这些性能要求既对激光成像雷达技术构成挑战, 也为激光成像雷达成像体制创新提供了动力, 并为激光雷达成像技术的发展指明了方向。

2 基于光学相控阵的成像激光雷达、非扫描 3D 成像激光雷达和合成孔径成像激光雷达的研究工作已取得重要进展, 激光成像雷达正酝酿着技术体制的新突破

从原理上讲, 只要发射激光波形具有足够高的重复频率和波束质量, 接收信号达到一定的信噪比

作者简介: 倪树新 (1939 -), 男, 研究员, 长期从事军用光电系统工程研究工作。

收稿日期: 2006-06-22

要求,均能通过波束扫描在探测器的光敏面上得到目标的图像。然而,借助常规光学天线、机械扫描装置和单元(或线列)探测器成像的传统体制激光成像雷达,因受光学天线尺寸限制,激光波束发散角不可能太小(通常为 $1\sim 2\text{mrad}$),用机械扫描装置对目标场景进行光栅式逐点扫描时,帧速率较低(通常限制在 3Hz 以下),因此很难满足高空间分辨率、高帧速率的性能要求,采用机械扫描还将增大激光成像雷达的尺寸和成本(通常常平架占总成本的 $20\sim 30\%$)。获得高空间分辨率的有效技术途径是,提高光电探测器空间分辨率(即增大探测器光敏单元数);提高帧速率的有效方法是,采用无惯性电子扫描和非扫描一次成像。基于光学相控阵的电扫描成像、基于雪崩光电二极管(APD)焦平面阵列组件与激光泛光照明的非扫描3D激光成像、基于合成孔径雷达技术的合成孔径激光成像正是出于这种认识而提出的激光成像体制创新思考。新体制激光成像雷达研究工作的新进展,使人们看到全面提升激光成像雷达作战效能前景。

2.1 基于光学相控阵的电扫描成像激光雷达^[2-4]

基于微波相控阵(MW phased array)技术的有源相控阵天线实现了微波频段波束的无惯性电扫描和捷变多波束,从而实现了天线的多功能一体化,为天线综合提供了有效的技术途径。美国第四代战机F-22虽然借助有源相控阵天线实现了雷达天线综合,但各种天线总数仍有64部之多,而借助有源相控阵天线实现雷达、电子战、通信/导航/识别天线综合化后的F-35,天线总数将只有21部。

分布来控制光束的方向和形状,能够为激光成像雷达提供可编程随机无惯性电子波束扫描,因而不但解决了波束指向的快速、灵活控制和空间扫描问题,而且使光电系统体积更小,造价更低。

光学相控阵(OPA)天线是相控阵激光雷达的关键单元,也是相控阵激光雷达研究的重点。自从20世纪60年代微波相控阵技术问世以后,人们就试图将相控阵的概念延伸到光波频段,但由于光波长较微波波长短得多,因而相应器件的制造工艺难度非常大,直到1971年才由Meyer用钽酸锂移相器制成了第一个由64个光频移相器组成的一维光学相控阵,首次验证了光学相控阵的概念。自1982年,雷声公司开始发展光学相控阵技术,并列入美国国防技术发展计划,先后用AlGaAs和液晶材料制成由更多单元构成的一维(如图1所示)和二维光学相控阵原理装置,并用 CO_2 激光束和Nd:YAG激光束进行了波束指向控制瞄准实验。二维光学相控阵器件的口径尺寸为 $4.3\text{cm}\times 4.1\text{cm}$,相控单元数为43000,光束偏转角度范围为 5° ,指向控制精度达 μrad 量级,如图2所示。目前正在发展口径尺寸在 $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ 以上,相控单元更多,偏转范围更大的光学相控阵器件。2004年雷声公司赢得了美国国防高级研究计划局的“自适应光相控阵锁定单元”技术开发项目合同,开发用于激光通信和激光成像的电扫描激光束控制技术。雷声公司已完成了相控阵激光雷达概念设计,其作用距离为 4km ,距离分辨率为 20cm ,体积仅约 1600cm^3 ($\approx 12\text{cm}\times 12\text{cm}\times 12\text{cm}$),重量约 2kg ,总功耗小于 10W 。美国为其新一代战机F-35设计的多功能光电系统中的目标识别激光成像雷达拟采用共用光学相控阵天线实现波束扫描。

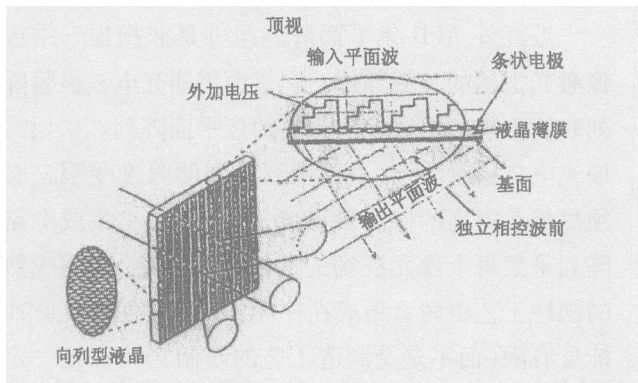


图1 光学相控阵(一维)移相器原理图

与微波频段一样,光频段也存在波束指向控制和孔径综合问题。光学相控阵直接源于微波相控阵,它采用电子可编程方式控制光学孔径上的相位

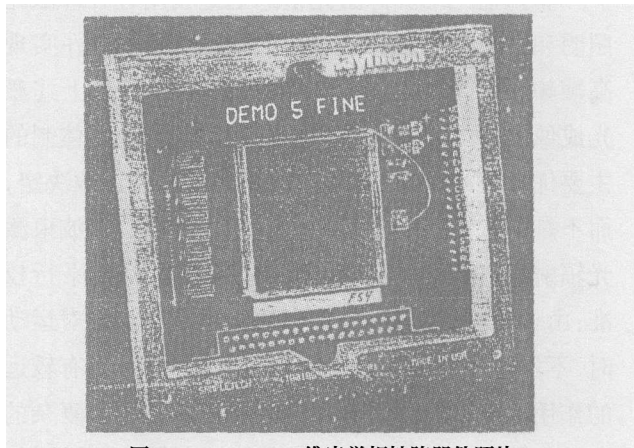


图2 $4\text{cm}\times 4\text{cm}$ 二维光学相控阵器件照片

目前,激光相控阵技术正处于发展阶段,由于受加工工艺的限制,光学相控阵尚不能满足相控阵激光成像雷达工程发展的需要。尽管如此,以光学相控阵技术为基础的低成本相控阵激光雷达和相控阵多功能激光雷达系统不仅成为可能,而且将在目标捕获、高分辨率成像、高精度跟踪、瞄准和自适应光学系统等方面展现出广阔的应用前景。无论是在提高现有光电传感器系统的性能方面,还是研制全新的光电传感器系统,特别是一体化多功能光电传感器系统方面,光学相控阵技术对光电系统都将产生革命性的影响,其发展前景十分诱人。

2.2 基于 APD 焦平面阵列组件和激光泛光照明的非扫描 3D 成像激光雷达^[5-9]

三维激光成像通常是指利用发射激光信号的目标回波强度二维分布信息和目标距离信息合成目标图像的一种成像方法。由于三维图像较二维图像包含更丰富的目标信息,有助于借助目标图像识别目标特征,甚至可发现并识别经过伪装或隐藏于树林中的目标,因而,三维成像激光雷达具有重要的军事应用价值。

基于单元或线阵近红外探测器的机械扫描三维成像激光雷达技术已经成熟,并在直升机防撞、地形测绘、战场侦察和目标识别等方面得到应用,但由于成像速率低、结构复杂、体积较大、成本较高而在一定程度上限制了它的应用。基于 CCD 阵列、像增强器和激光泛光照明的非扫描视频成像激光雷达,虽具有相当高的分辨率和帧速率,但难以提供每一像元对应的距离信息,且对照明激光源的功率要求高,因而只局限于近距离二维成像应用。

非扫描三维成像激光雷达则是利用近红外激光照明和近红外高灵敏度 APD 焦平面阵列组件实现高帧频单次距离-强度三维成像,这是解决上述激光成像雷达体制性局限的一种新体制。这种体制的主要优点是:图像分辨率由探测器阵列的元数决定,而不是由激光束的质量决定;无需高重频、窄波束激光辐射源,且发射和接受光路不需要严格的平行校准;由于瞬间即可成像,当雷达与目标存在相对运动时,不用瞄准线稳定也不会导致图像失真;具有较远的作用距离,且不存在距离模糊问题;不需要复杂的高速扫描装置,体积小,重量轻,成本低,适装性好。

因此更适合装备于飞机、无人机、侦察车桅杆和自寻的导弹等机动平台,用于监视和侦察、瞄准和提示、伪装和丛林中的目标探测与识别。

如图 3 所示,非扫描三维成像激光雷达由脉冲激光照明器、接受光学系统、近红外焦平面阵列组件、信号处理器和显示器组成。其工作原理是:大功率、大发散角脉冲激光束经整形后照射整个目标,回波经接受光学系统聚焦后投射到接收机焦平面阵列光敏面上,经读出集成电路处理,得到每个阵元相应的目标距离和光强数据,再经综合处理即可得到目标的三维图像。

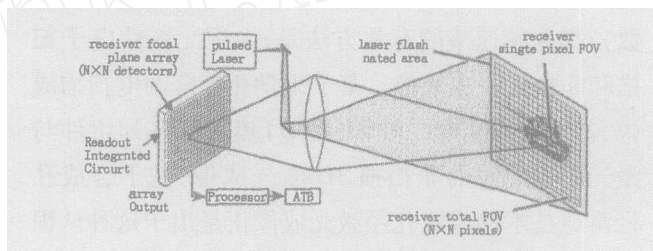


图 3 非扫描三维成像激光雷达的工作原理和组成示意图

与传统激光成像雷达的发射激光器不同,对非扫描三维成像激光雷达的泛光照明激光器的主要性能要求是:大发散角(可调),高照射功率,窄脉冲宽度,小的体积,以保证激光束对目标场景的同时覆盖,并具有足够的照度和照射均匀度。较理想的照明激光器是二极管泵浦被动 Q 开关微片激光器,它是由 Nd:YAG 和 Cr^{4+} :YAG 晶体扩散键合构成,其中 Nd:YAG 为增益介质, Cr^{4+} :YAG 为饱和吸收体。这种激光器作为照明光源的优点是体积小(谐振腔长约 1mm),可产生高质量(单纵模)、高重复频率(数 kHz)、短脉冲(亚 ns)激光波束。

近红外 APD 焦平面阵列组件是非扫描三维成像激光雷达的关键部件。它是由雪崩光电二极管阵列和读出集成电路阵列构成的焦平面阵列。采用雪崩光电二极管阵列,是因为泛光照明强度受限又必须尽量获得高的探测灵敏度,故利用读出集成电路阵列采集每个像元视场的回波距离信息,并用成熟的钢柱工艺将两者集成在一起。由于照明激光脉冲能量有限(而不是受制造工艺的限制),为保证一定的作用距离,APD 焦平面阵列组件的尺寸尚不能做得太大,因而牺牲了一定的空间分辨率。目前像元数已作到 32×32 ,等效噪声功率约 5nW,预期目标为像元数 128×128 ,等效噪声功率 < 1nW。

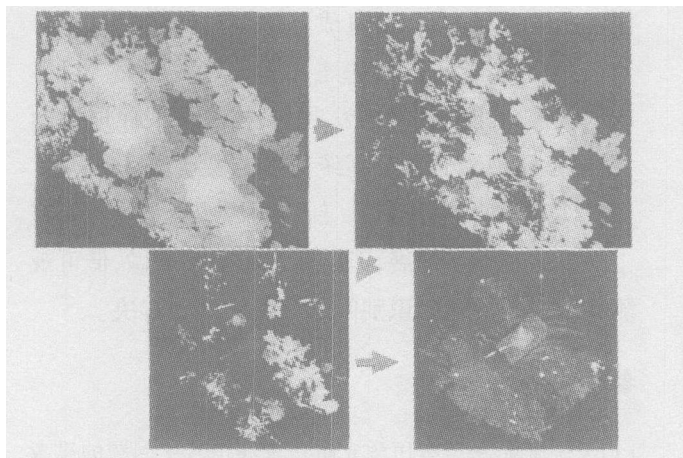


图 4 对隐藏在树林中的坦克的非扫描 3D 激光雷达成像结果

自 1996 年美国提出称作“激光雷达焦平面阵列”(LR - FPA)的 3D 成像激光雷达概念以来,非扫描 3D 成像激光雷达成为激光雷达研究的热点,在国防部高级研究计划局的支持下,麻省理工学院林肯实验室、雷声公司和洛克希德·马丁公司等先后开展了 APD 焦平面阵列组件、泛光照明激光器和非扫描 3D 成像激光雷达原理试验系统的研制,突破了中等尺寸的 APD 焦平面阵列组件和泛光照明激光器等关键器件技术,研制出多个原理试验系统,并进行了飞行试验,如图 4 所示,证明非扫描 3D 成像激光雷达对地面伪装目标和树林中隐蔽目标具有良好的探测、识别能力和各种空中机动平台的适装性,标志着非扫描 3D 成像激光雷达已取得体制性突破。

2.3 合成孔径成像激光雷达^[10-13]

通常的空对地成像雷达是通过辐射短脉冲来获得高的距离分辨率,通过辐射窄波束来获得高的方位分辨率。而获得窄波束则需要增大天线口径。合成孔径雷达技术实现了用适当大小的天线得到高分辨率微波图像。微波合成孔径雷达技术已经成熟并得到广泛应用。将合成孔径雷达技术用于激光频段,发展合成孔径激光雷达,从而用更小的光学天线获得更高的图像分辨率,成为激光雷达工程技术人员的研究课题。

众所周知,任何成像系统的分辨率都与所用的电磁辐射波长有关,通常波长越短分辨率越高,在合成孔径长度对应的时间内,按时序接收到的回波信号的相位一致性越好则成像质量越高。对具有典型波长的微波辐射而言,保持预期大小的相位误差是容易的,但对于光波而言,则不是容易的事情,

因此,如何减小回波的相位误差成为合成孔径激光雷达信息处理技术的重要研究内容。

合成孔径激光雷达的基本概念与微波合成孔径雷达基本相同,它们都是借助雷达发射机、接受机和目标之间相对运动,克服了单个光学孔径衍射极限的限制,从而得到比实际孔径大得多的等效条带式合成孔径,通过信号处理获得目标的高分辨率图像。合成孔径成像激光雷达(SAL)的基本概念示于图 5。

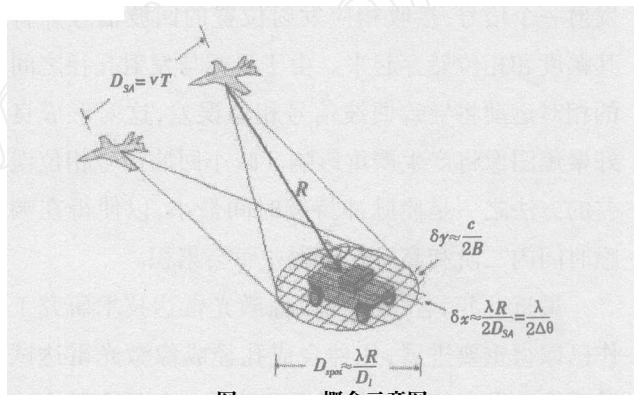


图 5 SAL 概念示意图

载有激光发射、接受机的平台以速度 v 运动,用波长为 λ 的光照射目标并接受其散射光。平台运动方向的图像分辨率由 $\delta_x = \lambda / 2\Delta\theta$ 给定,其中方位角变化 $\Delta\theta = D_{SA} / R$,在飞行时间 T 内,合成孔径长度 $D_{SA} = vT$ 。垂直方向的分辨率由 $\delta_y = c / 2B$ 确定,其中 c 为光速, B 为发射波形的带宽。将该技术用于实际环境下成像的主要技术障碍是,如何减小目标与发射孔径间存在未补偿相对运动时引起的相位误差。实验室演示表明,通过控制环境的办法可减少其影响。在其它情况下,可通过缩短光学线性调频脉冲压缩时间来实现。将同时远距离激光测距测量与 SAL 系统相结合是减小某些位移误差的另一种有前途的方法。这一方法能够提高噪声环境下成像的聚焦性能。

典型 SAL 成像系统的组成结构示于图 6。

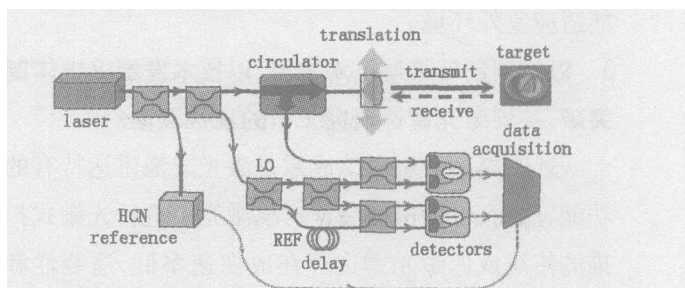


图 6 基于光纤的 SAL 系统的组成图

连续波激光啁啾信号被分成目标照射光、目标 - 本振光、参考光和基准 - 本振信号光。其中一路信号经过光学环流器和准直透镜射向目标。回波脉冲被光学环流器接受,并在平衡外差探测器中与目标本振光混频。基准信道也以同样的方式与参考本振光混频,然后这两个信号以一定的采样率被采样。当发射/接受光学系统作平移运动时,以步进方式建立合成孔径,对目标进行扫描。在每一个步进位置发射一个信号,接收相应发射位置的回波信号并将其幅度和相位储存起来。由于目标与发射孔径之间的相对运动将导致回波信号相位误差,这对形成良好聚焦图像将产生严重影响。减小回波信号相位误差的方法之一是使脉冲持续时间最小,以使得在啁啾时间内二阶和高阶相位误差不会累积。

最近几年,合成孔径成像激光雷达技术研究工作已取得重要进展,几种合成孔径成像激光雷达试验系统已在实验室进行了原理演示。包括 MIT Lincoln Laboratory 用 CW CO₂ 合成孔径成像激光雷达试验系统演示了对点目标的一维成像,还用 CW Nd:YAG 微片激光器合成孔径成像激光雷达试验系统进行了演示,得到二维图像^[1];日本通信研究实验室 CO₂ 激光器演示了一维近距离合成孔径成像激光雷达成像;美国 Naval Research Laboratory 用近线性光学啁啾激光演示了对平移运动目标的逆合成孔径成像激光雷达 (ISAL) 二维成像;美国宇航公司研制出合成孔径激光雷达试验系统,通过在振动条件下的实验室演示,得到多幅高分辨率、良好聚焦的二维图像,为在实际环境下有效成像问题的解决迈出重要的一步。下一步工作是继续增强硬件功能,发展信号处理算法,并为最佳化组合系统探索不同的波形,以发展能够使得合成孔径成像激光雷达能适应室外环境。

3 以体制创新带动技术发展,以技术发展促进体制突破,实现激光雷达研究工作的良性互动

远距离高分辨主动成像是激光成像雷达特有的功能,然而,借助机械装置对窄激光束进行光栅式扫描的传统成像激光雷达存在成像速率低,适装性和空间分辨率受限等体制性问题。上述新体制激光成

像雷达的发展表明,通过成像体制创新提升其综合效能,是成像激光雷达快速发展的有效途径。以体制创新带动相关技术的发展,以技术发展促进体制突破,是实现激光雷达系统总体与关键技术研究工作良性互动的有益经验。新体制成像激光雷达研究工作已取得重要进展,但还有许多工作要做,低可观测性目标的探测和识别问题不久将得到解决。

参考文献:

- [1] 倪树新. 关于军用激光雷达发展中若干问题的思考[J]. 中国雷达, 1997, (2): 5 - 14
- [2] Paul F McManamon, et al Optical phased array technology[J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84 (2): 268 - 298
- [3] T A Dorscher, et al Electronic beam control for advanced laser radar[A]. Proc SPIE, 1999, 3707: 316 - 326
- [4] Paul F McManamon, et al Laser radar development[A]. Proc SPIE, 1999, 3707: 50 - 57.
- [5] Richard Richmond, et al Laser radar focal plane array for three dimensional imaging[A]. Proc SPIE, 1998, 3380: 138 - 143
- [6] R M Heinrichs, et al Three-dimensionnal laser radar with APD array[A]. Proc SPIE, 2001, 4377: 106 - 117.
- [7] M M Marino, et al high resolution 3D laser radar flight test experiments[A]. Proc SPIE, 2005, 5791: 138 - 151.
- [8] M J Halmos, et al 3D flash ladar at Raytheon[A]. Proc SPIE, 2001, 4377: 84 - 97.
- [9] M K Browders, et al Three-dimensionnal imaging sensors program[A]. Proc SPIE, 2001, 4377: 73 - 83
- [10] T J Green, S Marcus, B D Colella Synthetic-aperture-radar imaging with a solid-state laser[J]. Appl Opt, 1995, 34: 6941 - 6949.
- [11] S Yoshikado, T Aruga Short-range verification experiment of a trial one-dimensional synthetic aperture infrared laser radar operated in the 10 μ m band[J]. Appl Opt, 2000, 39: 1421 - 1425.
- [12] M Bashkansky, R L Lucke, E Funk, et al Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. Opt Lett, 2002, 27: 1983 - 1985.
- [13] M Buell, et al Demonstration of synthetic aperture infrared ladar[A]. Proc SPIE, 5791: 152 - 166