

相干激光雷达的进展

摘要: 1960 年激光器的发明使相干光作为激光雷达发射源成为可能。相干激光雷达与很多常规微波雷达具有诸多共同基本特征。然而, 激光的短波长可用于许多新的军事领域, 尤其是在目标识别和导弹制导方面。本文追踪了林肯实验室 1967–1994 年激光雷达的发展历程。该历程包括两个激光雷达系统的构造、测试和演示验证, 一个是高功率、长距离“火池”激光雷达系统, 另一个是紧凑型短距离红外天基雷达 (IRAR) 系统。“火池”主要用于诸如空间目标监视以及弹道导弹防御等战略军事应用, 而 IRAR 主要作为战术目标天基探测和识别的试验平台。

关键词: 相干; 激光雷达; CO₂ 激光器; 多普勒

1 引言

雷达的发展史揭示了雷达的进步和革新是受高功率信号源的实用性和质量的推动。英国人发明的高功率微波磁电管使 MIT 辐射实验室的科学家和工程师能够在二战期间发展天基微波雷达。由于信号源时间相干性的改善, 使新的信号处理技术可以为之使用。最终, 由于计算机和高速数字信号处理的发展, 探测目标和提取目标信息的新方法开始不断涌现, 激光雷达的发展就是一个成功范例。

激光的高工作频率、高相干性 (时间、空间) 为林肯实验室在 1967–1994 年间发展独特激光雷达提供了基础。本文讨论了林肯实验室光学分室的两套激光雷达系统。第一个是工作在 10.59 μm 和 11.17 μm 的长距离 CO₂ 激光雷达和 1.064 μm 的 Nd:YAG 激光雷达, 主要用于开发激光雷达的战略军事应用; 第二个是紧凑的红外天基雷达系统 (IRAR), 工作波长为 10.59 μm (CO₂ 激光)、0.85 μm (GaAs 激光)、1.064 μm (Nd:YAG 激光), 主要用于发展激光雷达的战术军事

应用。

2 战略防御激光雷达

CO₂ 激光器发明于 1964 年, 由于该激光处在大气吸收较小的光谱段, 以及其高增益性能, 颇受林肯实验室研究人员青睐。1966 年, Charles Freed 利用 He-Ne 激光器先驱者 Ali Javan 发明的构架技术, 建立了一套 CO₂ 激光装置, 该激光器稳频特性是当时已报道的 CO₂ 激光器的数百倍。1967 年, 在上述 CO₂ 激光器的发展基础上, 第一个相干 CO₂ 激光雷达演示成功。1968 年, 频率稳定性提升数百倍的 CO₂ 激光器进入演示验证阶段。同年, 林肯实验室固体分室研制开发了宽带 (1.5 GHz) 掺铜锗探测器, 用来作为激光雷达接收器的光混频器, 由此可观察卫星回波多普勒频移。与此同时, 在 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) 和海军研究室的资助下, Raytheon 公司建立了 1 000 W 连续 CO₂ 激光振荡器, 用于激光雷达实验。1968 年末, Firepond 光学研究装置在 Millstone 山雷达站正式建立, 用于

长距离观测陆地目标、飞机和卫星等。如图 1 所示。

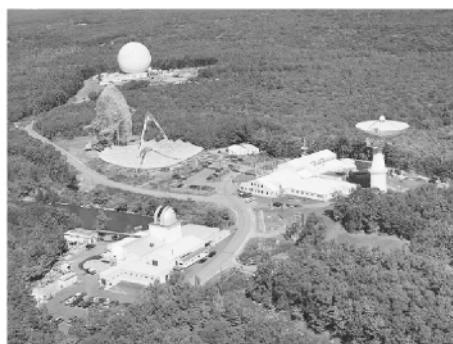


图1 林肯实验室 Millstone 山雷达站

1971 年末, 1.2 m 望远镜安装在 Firepond 装置上, 获得了不同目标的角度分辨图像, 这些早期的测量结果鼓励科学家探索激光雷达的军事应用。

1972 年, 林肯实验室 Robert S. Cooper 研制了一台用于空间监视的宽带、高功率距离-Doppler 激光雷达, 虽然完成了许多关键器件的攻关, 但该装置最终没有实现成像激光雷达的功能。1976 年, 林肯实验室开发了宽带、双边带 GaAs 电光调制器, 由此完成了地面配合目标的首次 CO₂ 激光雷达距离-Doppler 图像。1977 年, 采用窄带单脉冲激光对飞机和卫星进行了跟踪演示实验, 此次单脉冲跟踪实验获得的配有反射器的目标跟踪误差在 1 μ rad。1978 年, 进行了高海拔地区风速探测和测距等。1981 年, 高功率激光雷达放大器系统在 Firepond 光学研究装置上安装, 该放大器占据一个大房间。该装置旁边的池塘是用来冷却该放大器之用, 如图 2 所示。

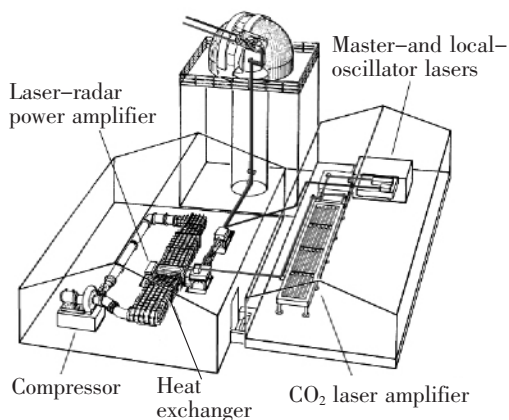


图2 1981年火池高功率窄带相干激光雷达系统

同年, 林肯实验室成功获取了慢速翻滚的空间目标详细的 Doppler 时间强度曲线 (Agena D 火箭推进器, 如图 3 所示, 斜程距离 1 350 km, 窄带激光雷达的频率分辨为 250 Hz, 对应的 Doppler 速度分辨为 1.5 mm/s)。

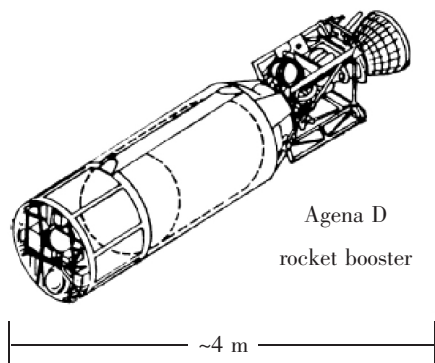


图3 Agena D 火箭推进器

1984 年, 战略主动防御组织建议运用星载激光雷达从欺骗物中鉴别进入再入段导弹弹头。在 DARPA 的资助下, 林肯实验室负责光学鉴别的研究工作, 更进一步提出了激光雷达的弹道导弹防御。1985 年, 光学鉴别真假弹头计划正式诞生。该实验室重新开始高功率激光雷达的钻研工作, 同时强调高分辨率、距离-Doppler 成像。1990 年, 宽带激光雷达成功采集到了在轨卫星的第一幅距离-Doppler 图像, 该海洋卫星的轨道高度 800~1 000 km, 并用精确的可见光跟踪器进行角跟踪。图 4 为安装在 LAGEOS 卫星上的反射器和两幅距离-Doppler 图像。

图中单次散射的距离-Doppler 图像由两种不同的波形获得, 其中高分辨率波形依赖于 1 GHz 的线性调频啁啾, 低分辨率图像采用 150 MHz 波形。

首次获得 Doppler 图像的第 25 天, Firefly 探空火箭实验成功完成。该实验包括 1990 年 3 月发射的 Firefly I 和 1990 年 10 月发射的 Firefly II 系统。通过 NASA 的两雷达提供的初始角跟踪数据, Firepond 激光雷达以亚微弧度精度对展开的目标进行角跟踪。在上述实验成功完成后, 第二阶段名为 Firebird 的飞行实验开始演示复杂的激光雷达鉴别和对抗技术。

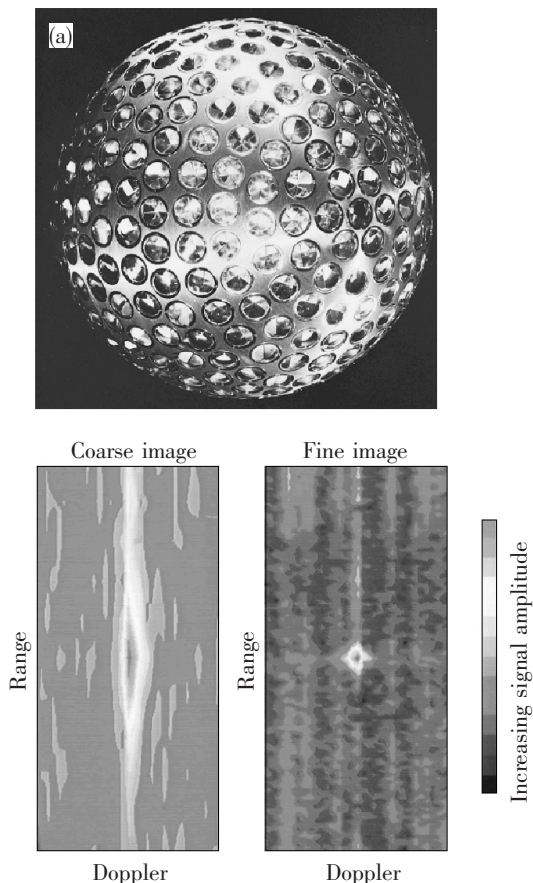


图4 LAGEOS卫星铝反射器和两幅距离 Doppler 图像

1991年, Firebird 1 火箭成功发射, 在此次实验中, Firepond、Haystack、Millstone Hill 雷达加上 Corbra Eye 飞行传感器以及 NASA Goddard 的红外传感器同时进行数据采集。1992年, Firebird 1B 火箭成功发射, 来自各地方的传感器对该发射过程进行数据采集。1993年, 林肯实验室的高功率激光雷达研究以光学鉴别技术的完成而宣布结束。

3 战术激光雷达

1975年, 林肯实验室 Robert J. Keys 领导的研究小组对相干 CO_2 激光雷达在地基目标监视、数据采集和火力控制中的潜在应用进行了研究。设想可用来安装在地面轰炸机上, 实施全天候低空 (100 m 或更低) 攻击。这种低高度环境下的作战平台也使一些防空系统受到了挫败。该系统采用 Stephen Marcus 开发的 15 cm 口径的 10 W 激光发射器。后期的研究由

Richard J. Becherer 完成, 使系统参数更加精细化。战术激光研究的内部计划在 1976 年开始。

许多单元技术在战术激光计划实施的过程中得以发展, 其中包括相干探测器阵列、二元光学 (提供本振光在相干探测器阵列上所需要的合适相位和幅度)、表面声波器件 (用于 Doppler 处理)。另外, 图像处理机构可以自动处理激光雷达的多个返回数据, 尤其与测量目标背景温度的被动红外探测系统同步工作时。

增加图像帧频这一发展目标, 推动了能自主寻找和识别目标的 12 元 HgCdTe 探测器阵列的发展。后来, 被动红外阵列也和主动阵列一样安装在相同的杜瓦瓶中, 由于二者共用相同的光学收发结构, 因此, 几乎可做到目标背景温度和目标探测识别的实时测量。

在 Robert J. Hull 和 Theodore M. Quist 的技术指引下, 红外天基雷达 (IRAR) 发展经历了几个阶段: 技术发展和实验室演示, 装载在卡车上的实验室系统用于所关注的军事目标观测, 最后, 进行飞行测试。包括激光雷达和被动红外传感器的可运输的卡车系统, 如图 5 所示。

该激光雷达和被动红外系统经过共轴瞄准, 而且利用数据流的数字化记录进行了像素定标。图 6 为该可运输系统的实际测量图, 图中显示了距离 2.7 km 坦克和卡车的激光雷达距离图像。

图 7 显示了旋转机动运动中的直升机 Doppler-速



图5 包含 CO_2 相干激光雷达的可运输多传感器系统

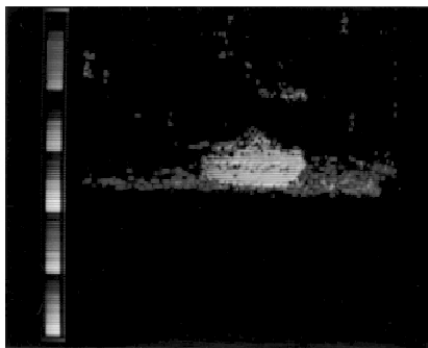


图6 相干激光雷达测量2.7 km坦克和卡车距离像

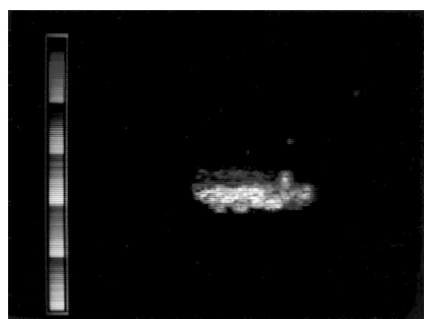


图7 盘旋中的直升机多普勒速度图像

度图像。该图为卡车装载可运输 CO_2 激光雷达角度-角度-多普勒-强度图像，图中每个像素（总像素 16 000）的多普勒频移由表面声波器件以 1 Hz 频率进行提取。速度采用不同的颜色进行区分，由于激光雷达的短波长，可以允许实时角度和高精度多普勒分辨（接近 1 m/s），感知交通工具的运动部件，为杂乱中鉴别目标提供强大的手段。

携带 IRAR 系统的天基多传感器飞机 Gulfstream G-1 如图 8 所示。所有系统采用附着在机身下端的光学塔台用于光束扫描，扫描受控于飞机机身内的主



图8 安装在飞机腹部的红外天基雷达

要电子学和记录系统。

图 9 显示了某军用机场激光雷达和被动红外传感器成像。图中有停泊的飞机、其它建筑以及周围栅栏，分别以被动红外、激光测距、激光强度的方式进行成像。这些图像来自于天基雷达系统早期的地面测试。在被动红外成像图中，白色表示热，黑色表示冷；在激光测距图像中，图像的距离精度为 1 m，距离的远近可用彩色图像表示；在激光强度图像中，黑色和白色分别表示强信号的无和有。

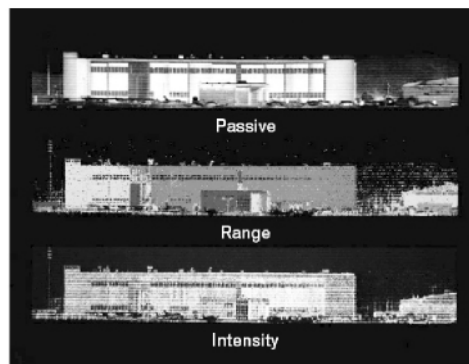


图9 实时被动红外、 CO_2 激光测距及激光强度图

图 10 为利用前视激光雷达 IRAR 测量 Bourne 桥所得图像，桥的不同部位所对应的距离可由不同颜色表示出来。由于所关注的图像绝对距离信息已经获得，该激光雷达距离成像可以转变视角，而不需要从所拍摄图像角度进行观察。激光雷达距离数据也可以在被动红外图像通道进行相似的视角变化。该实验是后期进行多维度图像处理的奠基性研究。

天基前视激光雷达多普勒成像能力演示如图 11 所示。该图显示了波士顿附近洲际公路 495 上行驶车

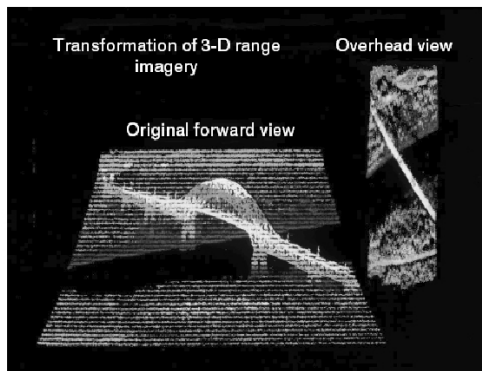


图10 IRAR 激光雷达对 Bourne 大桥所成三维距离像

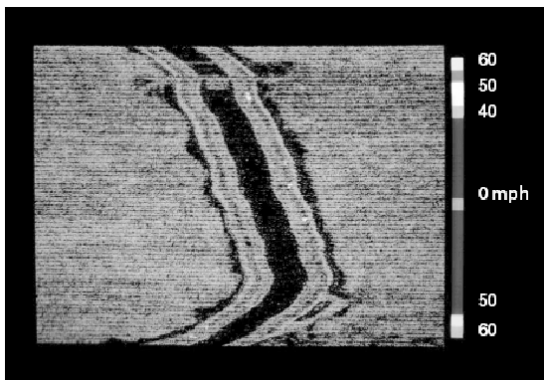


图11 波士顿附近公路角度-角度-Doppler成像

辆的速度信息,采用 IRAR 雷达飞行实验所获得的角
度-角度-多普勒成像。速度由颜色表示,在高速公
路上的小汽车清晰可见,背景信息可以通过简单的
速度阈值方法进行抑制。

经过几十年的研究发展,由 DARPA 和其它组织
发起,基于 CO_2 激光主动和被动 HgCdTe 阵列的前视
多维度激光雷达开始专注于垂直或接近垂直于地面
的激光雷达操作。两个潜在应用就是利用高角度和
距离分辨穿透植被和伪装,并将激光雷达作为垂直
攻击的精确制导武器获取目标信息和制导的传感器。
前视传感器组件中增加了高距离分辨毫米波雷达,
并与激光雷达进行光学对准,目的是为进一步的
多维度研究。俯视 GaAs 和 Nd:YAG 激光雷达可以被
开发作为 100 m 距离俯视,而且具有 15 cm 空间分
辨率和 15 cm 距离分辨率。第一代高分辨俯视传感
器由 Perkin Elmer 开发,该器件采用 GaAs 激光二极
管技术,相应地可获得 15 cm 距离精度以及 30 m 距

离间隔不确定度。该系统性能如图 12 所示。

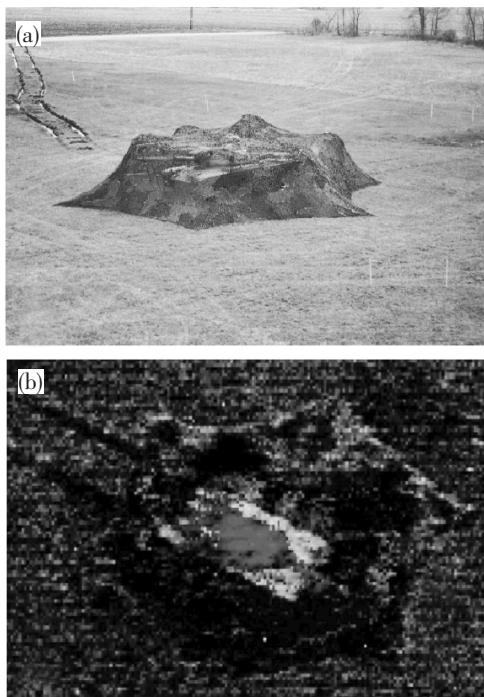


图12 可见光成像和GaAs激光雷达对坦克成像

在该图中可以清晰地看到可见光伪装网覆盖下
的坦克。林肯实验室一个主被动传感器系统 (MAPS)
在逐渐发展过程中引入了 $10.59 \mu\text{m}$ 波长距离测量激
光雷达和 $8\sim 12 \mu\text{m}$ 被动红外成像器,所有这些传感
器都经过同轴校准,因此可以提供接近实时的目标和
背景测量。图 13 显示了运用舰船作为目标的成像。

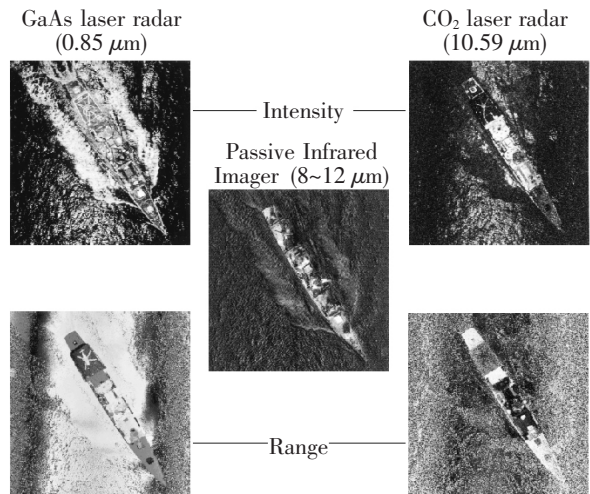


图13 MAPS 拍摄的护卫舰实时俯视图

如前所述, GaAs 系统具有很高的相对距离精度, 但在俯视地面树林时, 该系统的距离间隔不确定度造成了分辨困难。在林肯实验室内, 后来在 MAPS 系统中采用基于 Nd:YAG 微片激光器的绝对距离激光雷达取代 GaAs 雷达。相应的距离精度为 15 cm, 逐渐开发出基于步进技术的实时处理器。该系统的初步演示证明其海拔阈值可以用来搜寻隐藏在树下的目标。

4 总 结

从 1966 年到 1993 年之间, CO₂ 激光雷达研究带

动了许多新工艺、新元件以及新技术的发展, 后来这些技术完全为国防部采用。林肯实验室的另外一个计划着重关注红宝石、Nd:YAG 激光器、CO₂ 激光器的新应用, 继续探讨固体激光器在其他很多方面的应用。然而, 该实验室计划的整个目标就是鼓励国防部开发相干激光雷达的各种巨大潜力, 而且该目标已经成功实现, 许多技术都是在这段时间内首次得到攻克。

(中科院长春光机所 付有余)

《液晶与显示》(双月刊)

《液晶与显示》由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和中国光学光电子行业协会液晶专业分会主办, 科学出版社出版。

- 中国最早创办的液晶学科专业中文核心期刊
- 中国唯一的液晶学科和显示技术领域综合性学术期刊
- 中国光学光电子行业协会液晶分会会刊, 中国物理学会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(PЖ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》征集有关液晶和各类显示材料及制备方法、液晶显示、等离子体显示、阴极射线管显示、发光二极管显示、有机电致发光显示、场发射显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他显示、各类显示器件物理和制作技术、各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用、显示材料和器件的测试方法与技术等研究论文。《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。同时, 竭诚欢迎社会各界洽谈广告业务、合作组织技术交流与信息发布活动。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报、综合评述和产品信息等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新能力, 及时反映国内外本学科领域及产业信息动态, 是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果, 进行国际交流的平台。其内容丰富, 涵盖面广, 信息量大, 可读性强, 是我国专业期刊发行量最大的刊物之一。

网址: <http://www.yjyxs.com> 欢迎访问!