

Discussion of Development Ideas of New System Laser Radar

Fangpei Zhang^{1*}, Changce Wang², Yuhua Xing³, Yubing Zhang⁴

¹Information Science Academy of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing

²Basic Experimental Center for Nature Science, University of Science and Technology, Beijing

³27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou Henan

⁴Electronic Science Academy of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing

Email: *zhangfangpei@163.com

Received: May 29th, 2016; accepted: Jun. 18th, 2016; published: Jun. 21st, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Laser radar has become a hot topic in the laser active detection field recently for its advantage of high angle resolution, high precision and strong anti-interference. Starting with the development and application of laser radar, and centering on the eternal pursue like “see more clearly”, “see more robust” and “see more subtle” of laser detection equipment, this article describes three develop directions such as laser imaging and feature extraction technology, polarization and MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) laser technology, and low probability of intercept laser radar technology. In this way, it can reflect the current situation and future development direction of this technology field, and provide a reference for China in this field.

Keywords

Laser Radar, Micro Doppler, Feature Extraction, MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), Low Probability of Intercept

新体制激光雷达发展思路探讨

张芳沛^{1*}, 王常策², 邢宇华³, 章宇兵⁴

¹中国电子科技集团公司信息科学研究院, 北京

²北京科技大学自然科学基础实验中心, 北京

*通讯作者。

文章引用: 张芳沛, 王常策, 邢宇华, 章宇兵. 新体制激光雷达发展思路探讨[J]. 光电子, 2016, 6(2): 59-65.

<http://dx.doi.org/10.12677/oe.2016.62010>

³中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州

⁴中国电子科技集团公司电子科学研究院, 北京

Email: *zhangfangpei@163.com

收稿日期: 2016年5月29日; 录用日期: 2016年6月18日; 发布日期: 2016年6月21日

摘 要

激光雷达具有角分辨率高、精度高、抗干扰能力强等突出优势, 目前已成为激光主动探测领域发展的一大热点。以激光雷达的发展方向和应用为切入点, 围绕激光探测装备“看得更清楚”、“看得更鲁棒”、“看得更隐蔽”的永恒追求, 分别阐述了激光成像与特征提取技术、偏振与MIMO(多入多出)激光技术、低截获概率激光雷达技术三个发展方向, 以期在一定程度上反映该技术领域的发展现状和未来发展方向, 对我国在该领域的发展提供一定的借鉴和参考。

关键词

激光雷达, 微多普勒, 特征提取, MIMO(多入多出), 低截获概率

1. 引言

激光雷达是激光技术和雷达技术相结合的产物, 其角分辨率高, 抗干扰能力强, 可以用于进行测距、角跟踪、目标运动速度测量及活动目标指示等, 还可以跟踪超低空飞行目标, 且隐蔽性能好。

与微波雷达相比, 激光雷达占据了频率的高端, 激光在角度分辨率和速度分辨率方面占据优势, 而在探测距离、距离分辨率方面不占优势, 因此为充分发挥激光雷达的优势, 一方面要在充分利用和发挥在角度和速度方面的优势, 在小范围提供直观的二维或三维图像, 应该是激光未来的一个主要发展方向; 另一方面激光雷达要与微波雷达有机结合, 协同使用, 取长补短, 发挥各自的优势。

2. 看得更清楚——激光微多普勒特征提取技术

飞机在对地面或海面进行侦察及发动攻击时, 首先需要借助雷达传感器来获取目标的准确位置信息, 进而完成精确打击。通过脉冲压缩技术, 我们可以较为准确地获得目标的距离信息。但由于天线波束的方位向分辨率很低, 因而通常无法准确分辨方位向目标。

多普勒波束锐化(DBS)是一种可以提高方位分辨率的处理技术, 它是基于多普勒分辨理论, 利用雷达方位向波束宽度内不同目标回波相对雷达具有不同多普勒频率这一特性来提高方位向分辨力的。它的处理等效于非聚焦合成孔径技术。多普勒波束锐化技术具有自身的一些优点, 并且已经得到广泛的应用。

当机载雷达工作在多普勒锐化工作状态时, 观测区域将随着天线的扫描而进入并离开波束。由同一距离环带上不同方位处散射体的多普勒历程可知, 除了位于波束边缘的少数散射体之外, 大部分散射体在观测期间一直保持在天线波束照射范围之内, 于是不同方位处散射体回波的多普勒历程的起止时刻完全相同, 只是因散射体的方位不同而导致各自相应的多普勒历程有一个固定的频率差。由于在回波中存在着一一定的多普勒频率展宽, 并且由多普勒历程可以看出, 同一时刻天线波束内的不同散射点具有不同的多普勒频率, 于是我们便可利用这一点来提取回波中的多普勒频率信息, 从而达到提高方位分辨力的目的。

根据多普勒分辨理论, 我们可以得到天线波束展宽的多普勒频率为:

$$\Delta f_d = \frac{2v}{\lambda} \Delta \theta \sin \theta \cos \Phi \quad (1)$$

其中 v 为飞机飞行速度, λ 为天线波长, $\Delta \theta$ 为波束宽度, θ 为方位角, Φ 为天线俯仰角。如果我们所设计的多普勒滤波器组(包含滤波器的数目为 N)有足够高的分辨率, 那么就可将原来一个回波中的信号在频率域等分成 N 分, 这样得到的频域分辨率为:

$$\delta f_d = \frac{\Delta f_d}{N} = \frac{2v}{\lambda N} \Delta \theta \sin \theta \cos \Phi \quad (2)$$

通过波束锐化处理, 我们就可以将原先的分辨率提高 N 倍, 从而达到提高方位向分辨力的目的。相比于微波雷达, 激光雷达波长更短, 对应的激光多普勒分辨率更高, 因此多普勒锐化效果更好, 成像分辨率更高。

此外, 基于激光雷达多普勒分辨率高的优势, 还有一项很具有潜力的技术值得深入研究——激光微多普勒特征提取技术, 用于目标识别。

目标识别是军事雷达应用的一个重要部分。对空中、陆地以及海域中敌意目标识别的局限已经一度被北约(NATO)认为是整个防御体系中最薄弱的环节, 在最大警戒范围和武器系统的射程以内快速而准确地进行目标识别, 仍然是目前很具挑战性的问题。近年来, 将微多普勒技术与雷达目标识别结合, 发展了基于微多普勒分析的目标识别技术。

当雷达波与运动表面相互作用激励出电磁场时, 一部分散射信号被雷达接收机接收到, 运动对电磁波的作用转化为信号调制。当目标以恒定速度运动时, 回波信号的载频会发生偏移, 即多普勒效应。当目标或目标上的某些部分存在相对于目标主运动方向的机械振动或旋转时, 则回波信号的频率将被调制, 体现在频谱图上则是频移旁瓣的出现, 这种现象即称为微多普勒效应。微多普勒是从频率上描述了目标微动的雷达特征, 反映的是多普勒频移的瞬时特性, 表征了目标微动的瞬时径向速度。

雷达目标微动特征提取与识别是目前一个新兴的研究领域, 它是运动学与雷达信号处理的交叉结合, 所涉及到的关键技术主要有: 运动建模、时频分析、变采样滤波、雷达成像理论和技术等。在军事领域, 目标微动特性在弹道导弹防御体系中已经发挥了很大的作用。运动特征是导弹目标识别所依据的主要特征之一, 弹道导弹的振动、自旋、进动和章动都属于微动范畴, 可望为导弹目标识别难题提供新的解决手段。对于空中和地面目标, 如飞机或地面车辆, 基于目标微动特征的目标识别也具有明显的优势, 对于不同的引擎和转动部件, 微多普勒频移是独一无二的, 经处理后与目标特征库进行对比, 由自动目标识别算法就可以确定目标的身份。

基于振动微多普勒频移的目标识别算法具有不受方位角限制、超视距、适用于非合作目标的识别等优势。地面目标的运动, 如行人手臂和腿部的摆动、车辆表面的振动、车轮和履带的转动以及天线罩的转动都属于微动源。这些微动特性为监测和识别地面目标提供了一种有效的途径, 而且对于已经识别出的地面目标来说, 还可以利用精细的微多普勒幅度和频率差异进行精确身份辨别。在现代高度自动化的战争中, 微多普勒目标识别还具有非常大的发展前景和空间。

相比于微波雷达系统, 由于激光的相干性, 激光雷达中目标回波信号的相位对目标表面的振动更加敏感, 在雷达径向距离上半个波长的变化就会引起回波信号 360° 的相位改变。此外, 由于多普勒频移可以反映相位函数随时间的变化情况, 因此可通过回波信号的多普勒频移来探测和识别目标表面的振动状态。我们有理由相信, 在现代高度自动化的战争中, 激光微多普勒目标识别将具有非常广阔的发展空间和前景。

3. 看得更鲁棒——偏振与 MIMO 激光技术

相比于微波, 激光由于波长更短, 更容易受到大气和外界环境的影响。大气的影响主要包括: 大气

衰减、烟雾微粒子散射和大气湍流等，环境的影响则主要指太阳光的影响，而这些不利影响又是无时无刻不存在的。

在微波雷达中，有利用水平、垂直以及圆极化等极化特性来抑制杂波的应用[1] [2]，微波的极化与光学中的偏振是同一概念，那么是否可以借鉴微波雷达中的极化技术，从而抑制激光雷达探测中烟雾等微粒子及杂光的影响？

光束在传输过程中，大气散射、目标特性和入射角度都会引起其偏振态的变化。信号光和太阳辐射光在传输过程中，偏振态变化又各不相同。通过调整出射光的偏振方向，使接收信号光的光强极大值方向与阳光背景辐射噪声的强度极小值方向平行，最大限度的保留信号光的强度，同时最大化抑制背景辐射噪声，从而提高探测的信噪比。

我们认为，利用目标与雾对激光退偏效果的差异是提高激光穿雾探测的方法之一，美国水下激光成像就利用了这种技术。根据散射理论，物体反射光的退偏度大于水中粒子散射光的退偏度。如果激光器发出水平偏振光，当探测器前面的线偏振器为水平偏振方向时，物体反射光能量和散射光能量大约相等，对比度最小，图像模糊；当线偏振器的偏振方向与光源的偏振方向垂直时，则接收到的物体反射光能量远大于光源的散射光能量，所以对比度最大，图像清晰。一些实验表明，大多数漫射目标倾向于使圆偏振光退偏振的程度优于对线偏振光的退偏振。美海军水下研究及发展中心、海军武器试验站对用圆偏振光照明提高能见度作了模拟实验，取得了肯定结果，并测量了漫射目标及水体的偏振系数。

上述结论可应用于激光穿雾探测。比较偏振激光在浓雾和弱雾中传输的仿真结果，可得出以下结论：

- 1) 偏振激光在弱雾中传输时，其散射偏振角的变化较规则。在浓雾中传输时，散射偏振角的变化不规则；
- 2) 偏振激光在浓雾中比弱雾中的散射强，退偏角度大；
- 3) 云雾对激光的散射能量主要集中在激光传输方向(前向)附近很窄的一个范围内，所以在前向小角范围内，各种云雾的散射强度会随着散射角的增大急剧下降；
- 4) 同轴探测时，对于不同的云雾，当光学厚度相同时，衰减系数越大，多次散射的影响越严重；当光学厚度增大时，高阶散射的增长速度远高于一次散射，所以多次散射在散射总能量中所占的比例很大；
- 5) 激光在衰减较严重的云雾中传输时需要考虑多次散射的影响；
- 6) 非同轴探测时，多次散射的影响有很大程度上的减小。如在激光引信设计的过程中，在结构允许时应尽量拉大基线距离，并形成一定面积的盲区，这样有利减小云雾多次散射造成的干扰，特别是可以抑制近距离浓云雾产生的后向散射信号；
- 7) 在接收视场的范围内，多次散射信号随着激光照射距离而增大。所以利用小视场探测器，采用收发光束交叉的探测方法，可有效减小云雾多次散射对激光引信系统造成的影响。

大气湍流对激光探测威力有很大影响，大气的湍流运动会引起光斑的漂移和闪烁，特别是在强湍流情况下，光信号受到严重干扰甚至光斑破碎。在大气激光通信中，有利用 MIMO(多输入多输出)技术提高通信容量和抑制大气湍流的研究报道。

MIMO (Multiple Input Multiple Output)最早是控制系统中的一个概念，上世纪 90 年代中期，将 MIMO 概念用于无线移动通信系统。在本世纪初，人们开始将 MIMO 概念拓展到雷达探测技术领域。MIMO 雷达具有波形的低截获和抗干扰能力、强杂波背景下小目标检测能力、利用分集增益探测弱小目标和隐身目标及增加作用距离的能力、多目标探测和抗饱和攻击的能力等。

对 MIMO 雷达的研究主要分为两种体制：其中一种是发射天线阵单元空间分布很广，这样远场目标回波对每个天线来说接收信号就可以认为是多个独立散射体的回波，称为统计或空间分集 MIMO 雷达。相参 MIMO 雷达是接收天线和发射天线分置的，接收天线阵一般密布，即阵元间距 $dt < \lambda/2$ 。发射天线一般稀布，且发射波束在空域是相关的，所以，多个发射宽波束可以被接收端综合实现发射窄波束，而目标仍被看作点目标。

由于激光波长短，很容易实现 MIMO 空间分集所要求的尺寸，在激光相干探测和阵列探测的基础上，

引入 MIMO 技术无疑将会有效提高激光雷达探测性能。

美国佛罗里达大学的 Neha Sharma 和 Henry Zmuda 提出了一种“基于电子束控光学相控阵技术的 MIMO 激光雷达”。该雷达采用 MIMO 阵列设计理念,表明激光雷达阵列的分辨率可大大超过传统阵列的衍射极限。此外,阵列方法的使用具备电控孔径能力,从而避免了在激光雷达系统中通常遇到的机械光束扫描问题。该系统若能实现,将大大推进现代激光雷达的高速成像、目标探测、跟踪和特征分析能力。

图 1 是一个典型 MIMO 激光雷达的发射-接收阵列系统。 M 个辐射源发射独立信号 $x_0, \dots, x_{M-1}$, 这些信号由 N 个接收单元 $y_0, \dots, y_{N-1}$ 探测。MIMO 激光雷达可通过激光源光学耦合到光纤束来实现,光纤束由以等间距 dR 交替放置的发射机和接收机组成,步进多模光纤束用做接收和发射的光纤单元。发射束无衰减地从目标散射开,并由接收阵列单元接收。激光源可以是一个连续波简单紧凑的二极管,或一个能在超短持续时间内提供大振幅的固态 Q 开关激光器。载波波长非常小,仅几个微米,不需要脉冲压缩波形。

4. 看得更隐蔽——低截获概率激光雷达技术

现代战争中,光电对抗已成为近年来电子战中发展最快、投资比重日益加大的一个重要领域,对抗技术与反对抗技术相互促进,交替发展。其中,激光主动探测与激光被动告警技术是一对很有意思的“矛”和“盾”的对应关系,此消彼长,你退我进,“拉锯式”的白热化对抗最终使得整个光电对抗体系日趋完善。

在目前的战场激光对抗中,作为“矛”的典型代表—激光测距机与作为“盾”的典型代表—激光告警机中采用的信号检测手段均为峰值功率检测技术。我们知道,激光告警是对测距信号的单程被动接收,而激光测距机需要进行一发一收的双程传输,单从这一点上来讲,同等条件下激光测距机无疑始终处于劣势。非但不能有效探测敌方目标,反而暴露了己方目标的行踪,适得其反,事倍功半。因此,针对目前主动激光探测现状,必须寻求体制上的新突破,变被动为主动,化劣势为优势。

长期以来,我们一直存在一种“误区”,即目标探测的性能取决于发射信号的峰值功率。事实上,借鉴微波雷达,正确的理解应是:目标的探测性能应取决于信号的能量而不是单纯的峰值功率。因此,我们认为,目前只有也仅有在激光探测技术中引入灵活的峰值功率信号设计才能获得体制上的优势,才能实现安全、隐蔽的探测敌方目标而不被发现。

我们认为,可采用以下两种信号形式:1) 采用低峰值功率、高占空比的脉冲压缩信号(图 2);2) 采用同比峰值功率最低的线性调频连续波(LFMCW)信号。

相比于微波雷达,激光采用连续波体制显得更有优势[1]-[3]:激光雷达采用收发分置解决收发隔离问题,一是所占空间小;二是激光光束没有副瓣泄露之忧。而且,由于激光波束窄,同一波束内只有单目标出现,采用正负斜率线性调频连续波体制可简化目标配对的难题,可以同时获得目标的距离和径向速度。因此,采用连续波体制的激光雷达可以做到寂静探测、先敌发现。

上述低截获概率性能的提高主要涉及到以下几个方面:1) 宽带、低旁瓣、高增益、自适应天线技术;2) 连续波、准连续波体制;3) 大时宽脉冲压缩技术;4) 宽发窄收;5) 复杂调制波形设计;6) 频率捷变;7) 自适应波束形成等。

低截获概率激光探测新技术的研究将直接服务于新一代主动激光探测武器装备的研制,是一场技术体制上的新变革。我们相信,低截获概率新概念的引入,将会对目前的光电对抗体系带来一轮新的冲击,将会大幅提升“矛”的主动进攻威力,将有可能迫使目前的光电告警机等被动探测装备不得不也寻求新的体制突破。从而在长远看来,将会有力促进整个光电攻防对抗体系的“螺旋式上升”,意义深远。

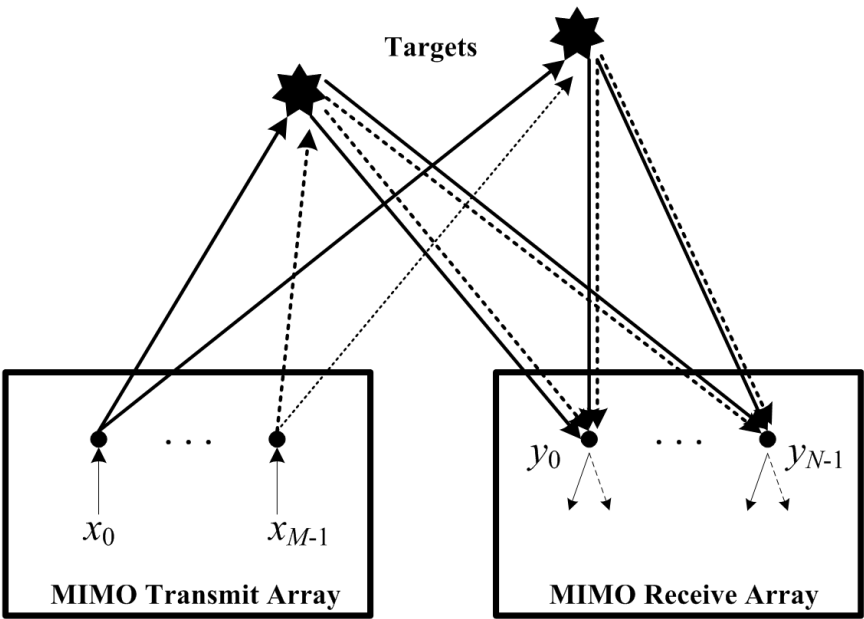


Figure 1. Transmitting/receiving array of MIMO lidar
图 1. MIMO 激光雷达发射 - 接收阵列

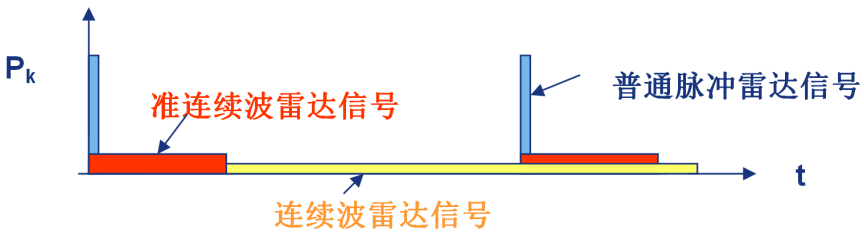


Figure 2. Comparison of pulse compression signal and single pulse signal
图 2. 脉冲压缩信号与传统单脉冲信号对比

事实上，在此方面国外已有成功的范例可以借鉴。美国雷声公司生产的“战术战斧”导弹末制导采用二氧化碳激光雷达制导+毫米波雷达制导[4]，并采用连续波调制和相干脉冲探测体制，探测方式为外差探测。由于采用了新体制，使得激光告警接收机的灵敏度至少要优于 70 dBW 才行(而目前的激光告警机的灵敏度大都在 50 dBW 水平)。该导弹目前已成功装备于美国“伯克”级导弹驱逐舰和英国“特拉法加”级核潜艇。

5. 结束语

“他山之石，可以攻玉”。本文借鉴微波雷达的发展历程，对激光雷达的发展路线进行了几点探讨和思考，谨起到“抛砖引玉”的作用。随着激光雷达在军事和民用领域的蓬勃发展，会有更多的新体制激光雷达涌现出来。

参考文献 (References)

- [1] 余明权, 李海廷, 路英宾, 等. MSM 激光距离成像雷达中线性调频信号的产生[J]. 激光与红外, 2010, 40(9): 945-949.
- [2] 赵继广, 张晓永, 张智谔. LFM CW 激光雷达测量方法[J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(3): 193-198.
- [3] 宦克为, 郑峰, 石晓光, 等. 基于调频连续波原理的三维成像激光雷达系统[J]. 长春理工大学学报, 2008, 31(4):

61-64.

- [4] Barenz, J., Baumann, R. and Tholl, H.D. (2005) High Power, Eyesafe Imaging Ladar/Infrared Seeker Technologies. *Proceedings of SPIE*, **5791**, 51-60. <http://dx.doi.org/10.1117/12.603329>

Hans 汉斯

再次投稿您将享受以下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>