

# 应用于舰载近程光电反导系统的激光测距机发展及关键技术分析

彭绪金, 赵刚, 陶刚, 高恒, 侯天晋

(中国兵器工业第 209 研究所, 四川成都, 610041)

**摘要:** 现代反舰导弹正向系列化、远射程、高速度、隐形化方向发展, 已成为海战的重要武器, 用于反导武器系统的光电系统要适应反导武器系统快速反应(反应时间短)、高精度测量目标空间位置等要求。因此, 作为光电系统距离传感器的激光测距机必须具备高频率和对  $0.1\text{m}^2$  的小目标远距离测距的特点。本文对海军近程反导任务需求激光测距机的主要技术发展进行了详细的分析。

**关键词:** 激光测距; 近程反导; 舰载; 光电系统

## 0 引言

现代反舰导弹正向系列化、远射程、高速度、隐形化方向发展, 已成为海战的重要武器。现代反舰导弹具有高速度、大机动、掠海飞行和大俯角攻击的能力, 因此为了提高舰船的战场生存能力, 必须研究远距离发现、捕获、识别、跟踪高速反舰导弹, 通过武器系统, 实现拦截高速反舰导弹。

高速反舰导弹相对亚音速反舰导弹弹径较大, 尤其是飞行时蒙皮温度高、红外目标特性强等有利于光电探测器的探测。现役反导武器系统应用证明采用光电技术是完成对反舰导弹探测、识别、跟踪、拦截的一种有效的技术手段。因此, 国内外的大多数近程反导系统均配置光电跟踪系统, 使整个系统具备比较完善的目标探测跟踪能力。由于高速反舰导弹的飞行速度高, 用于反导武器系统的光电系统要适应反导武器系统快速反应(反应时间短)、高精度测量目标空间位置等要求。因此, 作为光电系统距离传感器的激光测距机必须具备高精度、高频率和对等效截面积  $0.1\text{m}^2$  的小目标远距离测距的特点。

## 1 概述

目前国内用于舰载近程光电反导系统的激光测距机的主要差距为:

- 1) 测距频率不够: 针对 4 马赫及以上导弹, 激光测距频率需要提高到 50Hz 以上。
- 2) 测距距离不够: 针对 4 马赫以上反舰导弹(导弹等效截面积  $0.1\text{m}^2$ ) 的要求, 激光测距能力需要提高到 12km 以上。

应用于舰载反导光电系统的激光测距机将重点发展以下技术, 从而提高测距机的性能, 以满足海军近程反导任务的需求。

- 1) 掠海飞行小目标微弱激光回波信号的探测和处理技术。
- 2) 高重复频率、高峰值功率、高光束质量的小型二极管泵浦固体激光器, 以及该激光器的热管理技术;
- 3) 激光发射光束的智能控制技术。

本文重点对激光测距机的以上三项技术分别进行论述。

## 2 微弱激光回波信号的探测和处理技术

由于高速反舰导弹速度快, 机动性强, 掠海飞行, 海杂波干扰强烈, 同时海面阳光的反射强烈, 背景噪声及其强烈。因此建立相应的数学模型, 并采取相应的激光微弱信号的提取与处理技术非常关键。

随着计算机技术在激光测距技术中应用的日益发展, 信号处理逐渐从模拟量转向数字信号, 数字信号处理在激光测距中显得越来越重要。得到的数字信号大多带有噪声, 待测距离越远, 噪声越强, 这样就限

制了对距离的正确估计，甚至导致错误的分析结果，所以滤波去噪，从中提取有用信号，是激光测距信号处理的关键步骤。

传统的滤波的一种方法是认为噪声表现高频，通过傅立叶变换（FFT）将信号从时域变成频域，从而去掉噪声。还有一种方法就是认为信号和噪声不相关，通过相关来去掉噪声。由于平稳信号通常表现为低频，这两种方法对于平稳信号处理比较有效。但对于高速掠海小目标需检测的信号表现为非平稳信号且信号和噪声存在一定的相关，采用以上两种传统方法滤波效果不好，得不到满意的结果。

由于高速反舰导弹掠海飞行，海杂波以及海面对阳光反射形成大量噪声，传统的信号处理方法难以满足需要，因此必须对激光微弱信号的提取与处理采用新的算法。

激光测距机接收系统的激光微弱信号的提取与处理应采用高速 DSP 结合相应算法处理技术。

将接收到的激光脉冲回波的放大电信号，送入一个高速 A/D 采样电路中，得到回波激光脉冲信号的离散值，然后采用 DSP 高速处理电路来对这些离散值进行计算处理，去除掉背景噪声，提取出激光脉冲的真实信息。通过该方法，能有效提高系统的信噪比。

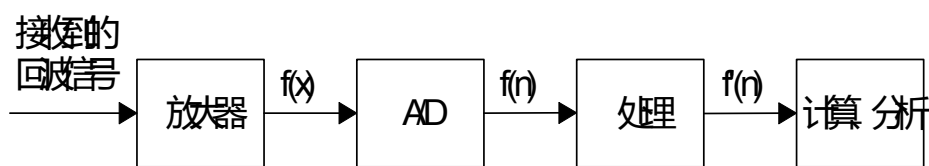


图1 激光测距信号处理流程图

## 2.1 小波阈值滤波算法

对含噪信号连续作几次小波分解后，噪声的影响表现在小波系数的各个尺度上，而目标信号的主要特征却分布在较大的有限的几个系数上，且大尺度上的这几个小波系数可以很好地重构原始信号，即小波变换可以使一个信号的能量在小波变换下集中于少数系数上。相对来说，这些系数的取值必然大于其它系数上的信号或噪声的值。因而，通过对小波变换后的系数作切割、缩小幅度、置零或者阉化等处理可以分离有用信号和噪声，然后用处理后的系数进行小波反变换以重构信号，从而达到消噪目的。根据每一尺度下噪声的水平施加不同的阈值，这样可以保留更多的信号成分。通过小波阈值滤波，能有效的处理传统方法不能处理好的微弱信号。

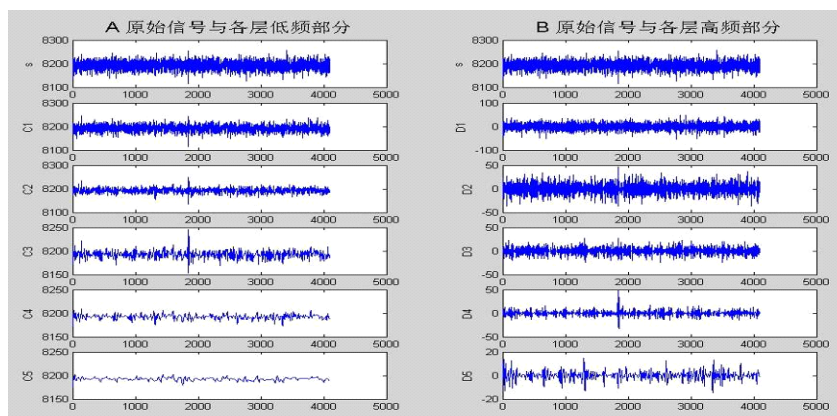


图2 原始信号及其小波分解

## 2.2 匹配滤波

匹配滤波是激光信号处理中最常用的方法。它的基本工作原理是采用考虑设计一种滤波器，当所需检测的已知波形到达时，输出幅度为最大，而信号未到达时，输出幅度很小。这种滤波器的输出对特定信号有最大信噪比。

已知  $f(t)$  为输入信号，伴随的噪声为高斯白噪声。根据最佳接收理论可知：对应信号波形  $f(t)$  的匹配滤波器应当是

$$h(t) = Kf^*(\tau_d - t)$$

离散情况:

$$h(n) = Kf^*(N_d - n), \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

其中,  $\tau_d = N_d T$ , 是信号自相关函数  $r_{ff}(n - N_d)$  的延迟时间,  $K$  为常数。在  $n = N_d$  时, 自相关函数  $r_{ff}(n - N_d)$  为最大。若输入信号  $f(n)$  为实序列, 则匹配滤波器的冲激响应为

$$h(n) = \begin{cases} Ks(N_d - n) & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases}$$

可见, 匹配滤波器的冲激响应是输入信号的镜像函数。由此可求得匹配滤波器的转移函数的频率特性:

$$H(e^{j\omega T}) = DFT[h(n)] = Ke^{-jN_d\omega T} S^*(e^{j\omega T})$$

因此, 匹配滤波转移函数决定于信号频谱函数的复共轭, 这就意味着滤波器与信号之间存在最大功率转移的最佳匹配, 从而可获得最大的输出信噪比。

### 2.3 基于小波分析和匹配滤波的弱信号处理算法

由于激光信号具有脉宽窄、相对雷达信号重复频率较低等特点, 激光回波信号处理可采用小波和匹配滤波相结合的算法。

小波阈值滤波能有效的提高信号的信噪比, 匹配滤波能检测到有效信号。故将两方法进行耦合, 结合了各自的优点, 在对小波做阈值的过程中加入匹配滤波的方法。对信号进行小波分解后, 对小波系数进行匹配滤波, 将修改后的小波系数进行重构, 得到去噪后的信号, 从而大大提高了系统的信噪比。

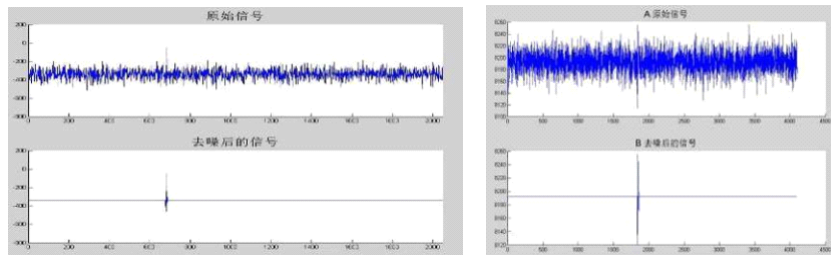


图3 小波和匹配滤波分析方法相结合, 可以有效提高系统的信噪比

## 3 小型高重频二极管激光器

二极管泵浦高重复频率 Nd: YAG 激光器是激光器的核心部件, 如何在小型紧凑化的基础上, 获得高光学质量、高峰值功率的激光输出, 同时实现高重复频率输出的激光脉冲, 并保持激光输出性能的稳定性, 是该激光器的技术关键。为研制出满足技术要求的激光器, 必须在以下技术进行发展:

### 3.1 高效串联侧面泵浦技术

二极管侧面泵浦固体激光器可获得更高峰值功率的输出, 为了获得较好的光束质量, 首先应确定泵浦耦合的主要参数。

晶体中单个 LD array 输出泵浦光的空间分布表示为:

$$I(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_0}{\varpi(x)} \exp\left[-\frac{2y^2}{\varpi^2(x)}\right]$$

考虑到 Nd:YAG 对泵浦光的吸收，晶体内泵浦光空间分布如下：

$$I(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_0}{\varpi(x)} \exp\left[-\frac{2y^2}{\varpi^2(x)} - ad(x, y)\right]$$

$a$  是晶体对泵浦光的吸收系数，通过下面的分析，他与晶体的参杂浓度有关， $d$  为泵浦光在晶体中的传播距离，即

$$d(x, y) = \sqrt{r_0^2 - y^2} + x$$

其中  $r_0$  为晶体的半径。令入射到晶体侧边界的泵浦光半径为  $\varpi_0$ ，考虑泵浦光发散角的影响，晶体内不同位置泵浦光光束半径为：

$$\varpi(x) = \varpi_0 + \theta(x + r_0)$$

其中  $\theta$  为泵浦光的发散角。

在散热条件不变的情况下，晶体的热致畸变主要受参杂浓度和泵浦光分布均一性的影响，因此首先讨论均匀性的问题，它与 LD 与晶体间距、晶体半径、参杂浓度的影响。

对于 LD 侧面泵浦激光器而言，考虑到 LD 快轴方向半峰值全宽度 (FWHM) 的发散角大约为 40 度，入射到晶体侧面边界的光束半径和 LD 与晶体中心距离有关，如果两者距离增大，晶体侧边界的光束半径增大。我们对直径为 5mm 的晶体棒 (吸收系数  $400\text{m}^{-1}$ )，进行模拟分析，其分析见图 4~6。

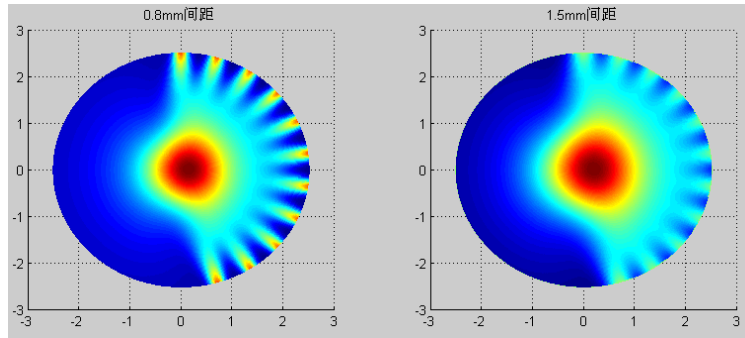


图 4 LD Array 与晶体的距离为 0.8mm 和 1.5mm 的泵浦截面

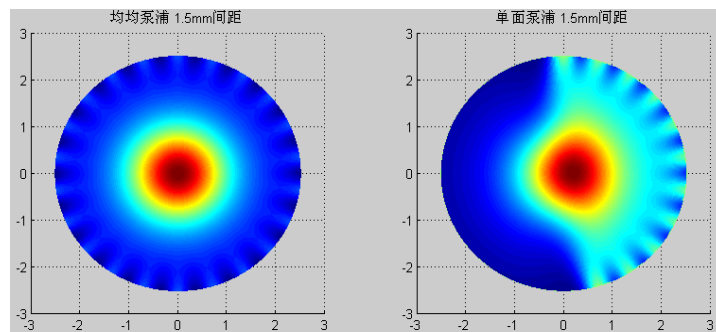


图 5 LD Array 与晶体的距离为 2mm 的单面泵浦和四周均匀泵浦

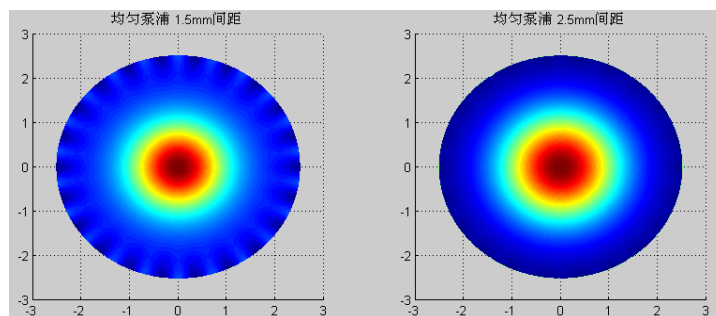


图 6 LD Array 与晶体的距离为 1.5mm 和 2.5mm 的四周均匀泵浦

通过对比我们可以得到，采用多面泵浦能获得更均匀的泵浦增益，同时在采用多面泵浦条件下，适当的距离，可以增加整个晶体的泵浦吸收均匀性。距离过远，无法获得足够的泵浦功率密度。

### 3.2 谐振腔设计技术

针对技术指标，激光器对束散、重复频率要求都比较高，同时高温工作温度较常规军用激光器高，因此激光器热效应现象是不可避免的。为此，必须对激光器谐振腔进行专门设计，才能满足使用要求。

目前国内外的相关进展，可采用二极管（LD）泵浦的一级振荡一级放大设计方案，以满足高功率，高重频，高光束质量的要求。

### 3.3 激光器热管理技术

在激光二极管泵浦固体激光器中，为实现对激光晶体的谱线耦合，必须调整激光二极管的输出波长，使其与激光晶体的吸收峰值匹配。激光二极管的输出波长随温度漂移。在电流恒定的情况下。温度每升高 1℃，激光波长将增加大约 0.2~0.3nm。目前固体激光器的吸收谱线带宽很窄(对 Nd:YAG 的 808nm 吸收峰宽度只有 4~5nm)，因此 LD 的有效温控是保证激光器高效工作的关键技术。

对于大能量输出的激光器，重频为 50Hz，并且满足恶劣环境的工作条件，激光晶体热透镜效应，晶体双折射效应都会对激光器的输出能量与光束质量造成很大的影响，所以激光器的热管理将是一个十分重要的问题。必须要考虑到晶体和 LD 散热的问题。

如果纯粹采用风冷，不但会给激光器，特别是 LD 造成极大的压力，并且散热效果也不能达到该激光器所要求的散热效果。所以可选择对激光晶体与 LD 同时进行液体冷却与 TEC 制冷。其整个剖面图如下所示：

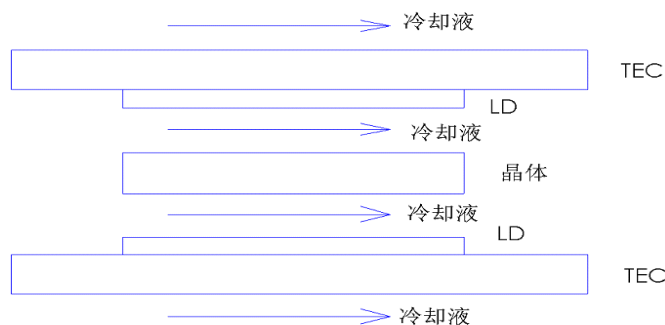


图 7 冷却方案示意图

### 3.4 激光发射光束的智能控制技术

根据测距方程<sup>1</sup>，激光测距机的束散直接影响其测距能力，但是束散大小受光电系统跟踪精度的限制。一般情况，目标较远，跟踪精度高，可采用小束散角测距；目标较近，跟踪精度低，可采用大束散角测距。因此激光发射天线采用变焦模式控制激光束散可大大提高测距能力，并且不影响近距离测距。其原理图见图 8，光学系统分别由前固定组、变焦组、补偿组和后固定组组成，实现了发射天线倍率连续变化。采用智能的变焦控制系统，根据目标的距离信息，实时调节发射天线的倍率。采用小束散激光对远程目标的测距，能够大大提高测距机的远程测距能力；当目标逼近后采用大束散激光对目标测距，减小对光电系统跟踪精度的压力。在工程应用中如何保证激光发射天线在变焦中的光轴稳定性是激光光束控制技术的关键。

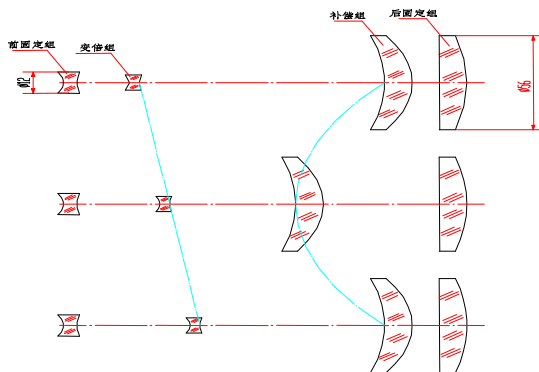


图 8 发射天线变焦原理框图

## 4 结束语

随着激光测距机微弱激光回波信号的探测和处理技术、小型二极管泵浦固体激光器和激光器的热管理技术等核心技术的发展,激光测距机将在测距频率和测距能力等方面大大提高,以满足未来光电火控系统的要求,从而满足未来海军近程反导的需求。

### 参考文献

- [1] 戴永江 《激光雷达原理》,国防工业出版社,2002年1月,8