

# 精密激光测距技术

黄隆铃 12218052

## 摘要

激光测距技术是近代光学测试技术中不断发展并在各领域起到重要作用的一项技术。本文设计了利用线性频率调制、时频分析的激光测距系统，实现了 5 km 范围、10 cm 精度的精密激光测距，速度可达 10 kHz。本文详细介绍了系统的测距原理、光电系统结构与参数，并进行了仿真计算，验证了系统的可行性。

## Abstract

Laser ranging has been a significant modern optical measurement technique since the laser was invented, and it has played a major role in many fields. This article demonstrates a self-designed optoelectrical system based on linear frequency modulation for 5 km length, 10 cm resolution laser ranging at 10 kHz speed. The principle and optical system parameters of the system are illustrated in detail. A MATLAB simulation is also provided for practice verification.

## 1 前言

激光测距技术是激光发明以来的一项非常重要的应用，长距离、精密的激光测距被广泛应用于工业测量、自动驾驶、天文观测等领域<sup>[2]</sup>。目前常用的激光测距方法有脉冲飞行时间测量 (Time of Flight, TOF)<sup>[3]</sup>、干涉相移测量、频率调制测量 (Frequency Modulation Continuous Wave, FMCW) 等<sup>[1,4,6]</sup>。根据 Olyae 在 2006 年对这几种方式激光测距方法的对比<sup>[5]</sup>，高功率 TOF 方法有百千米测量范围、米级分辨率，适合远距离、低分辨率的测量；传统 FMCW 方法有十米级的测量范围和毫米级分辨率，适合近距离、较高分辨率的测量；干涉相移方法有百米级的测量范围和毫米级分辨率，适合进行中距离、较高分辨率的测量。

本文需要完成的测量目标为 5km、精度 10cm。经过调研，基于反馈的 FMCW 方法经过改进，可以显著提高测量范围和分辨率，能够满足测量需要。例如，2000 年，

Nakamura 等人使用基于声光调制器的频移反馈激光器, 实现了 18.5 km、分辨率 20mm 的精密测距<sup>[1]</sup>; 2022 年, Yifan Wang 等人将激光反馈补偿集成进扫频干涉系统, 实现了 152 米测量距离下仅 0.07mm 的分辨率; 本文通过设计基于频率调制的激光测距系统, 完成测量目标。

在接下来的小节, 将详细介绍基于反馈的频率调制激光测距方法, 包括测量原理、系统方案设计和误差分析, 最后进行优缺点分析和总结。

## 2 测量原理

相比 TOF 方法测量距离所对应的激光飞行时间、相移方法测量距离所对应的相位移动, FMCW 方法通过扫频, 将距离转化为频率域的频率变化, 可以显著提高测量的动态范围。

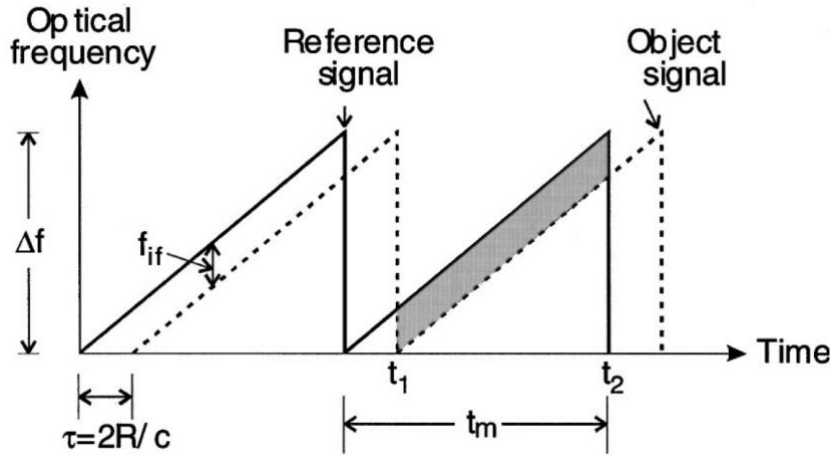


图 1 FMCW 扫频方法激光测距原理<sup>[2]</sup>

设待测距离为  $R$ 、光速为  $c$ , 则在迈克尔逊干涉光路下, 待测距离引起的时间变化为  $\tau = 2R/c$ 。记系统的扫频时间为  $t_m$ , 扫频范围为  $\Delta f$ , 则频率变化的斜率为  $\gamma = \Delta f/t_m$ 。根据两个干涉臂返回的干涉信号, 拍频为  $f_B = f_{if} = \gamma \cdot \tau$ 。由此, 我们将距离信息  $R$  转化为了频率信息  $f_B$ :  $R = cf_B/2\gamma = ct_m f_B/2\Delta f$ , 这种方法也被称为光学频率域测距 (Optical frequency domain ranging, OFDR)。

系统的测量范围和分辨率由扫频参数控制: 拍频达到扫频最大值时, 可以得到最大测量距离  $R_{max} = c\Delta f/2\gamma = ct_m/2$ ; 设扫频的频率范围对应的时间分辨率为  $\delta t = 1/\Delta f$ ,

则距离分辨率可由公式  $\delta t = 2\delta R/c$  计算，得到  $\delta R = c/2\Delta f$ 。

### 3 系统设计

根据原理分析，若采用普通的线扫描扫频，则需要：

$$(1) R_{max} = c\Delta f/2\gamma \geq 5km,$$

$$(2) \delta R = c/2\Delta f \leq 10cm。$$

求解可得  $\Delta f \geq 1.5\text{ GHz}$ ,  $\gamma \leq 45\text{ PHz}$ ，具体系统设计如下图：

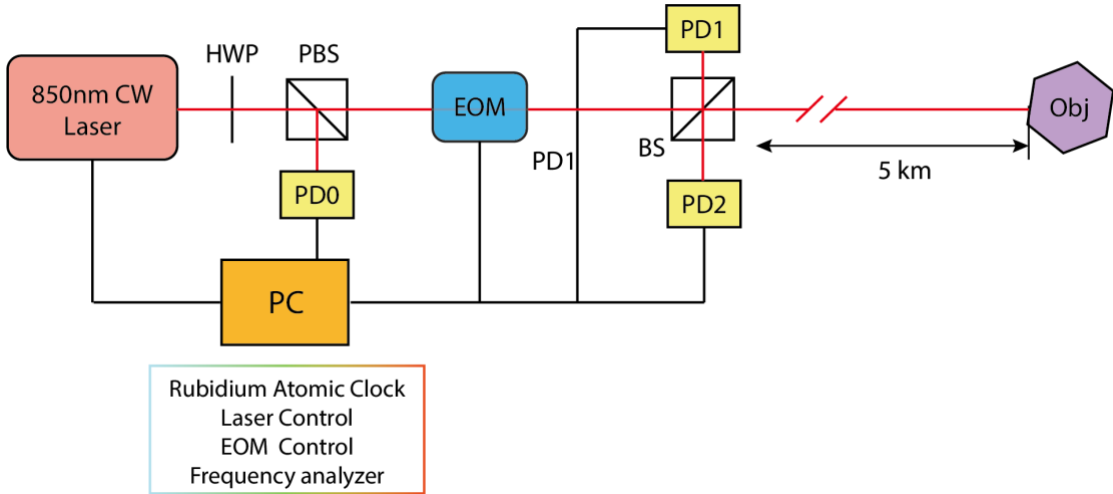


图 2 FMCW 激光测距系统设计图

其中：EOM 表示电光强度调制器，需达到 GHz 带宽，可选取 iXBlue 公司的 NIR-MX950 10GHz 光强度调制器<sup>[7]</sup>；PD 为 GHz 级光电探测器，可选取 Thorlabs 公司的 DXM12CF 12GHz 光电探测器<sup>[8]</sup>，PD1 用于激光反馈稳频、PD2 用于物体信息的扫频频率；PC 控制连接基准时钟（如铷钟）、信号发生器（控制 EOM）、频率计（接收 PD 信号进行频率计算）并进行数据处理，这里进行了简化处理。

850nm 连续激光器出光后经过半波片（HWP）和偏振分束器（PBS）的功率调制和监测（PD0），然后进入 EOM 进行扫频调制。最后进入分束器（BS），一路打到 PD1、另一路在 PD2 接收物体（Obj）回波信号，最终信号数据在 PC 进行处理。

### 4 仿真研究

接下来通过仿真完成激光测距流程，并计算有关误差，仿真代码见附录。首先设置仿真参数，由于待测距离对应的频率为 1.5GHz，这里设置最大调制频率  $\Delta f = 3\text{GHz}$ ，采样频率为 10GHz，啁啾斜率为 45PHz。

以仿真得到的信号作为数据,进行短时傅立叶变换分析,其时间—频率分布如下图所示,可见成功仿真了扫频调制:

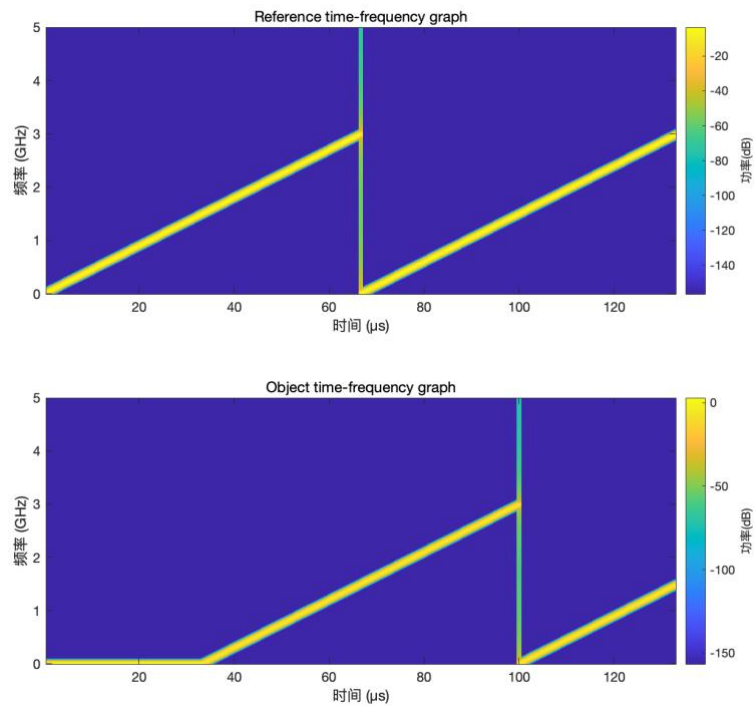


图 3 扫频调制结果

接下来仅对第一个周期内的物体回波信号,加汉明窗进行短时傅立叶变换,与参考信号进行对比计算,得到瞬时频率差  $f_B$ :

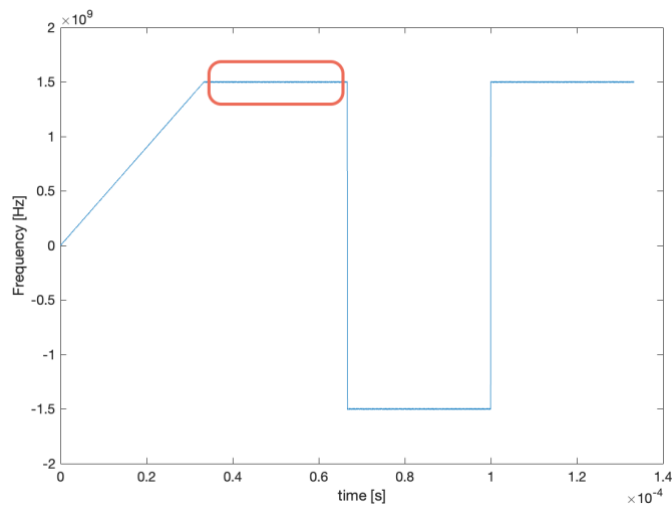


图 4 时频分析结果

使用计算的瞬时频率差,利用原理推导过程中的公式,计算可得距离为 5000.0501 米,误差 0.5008 cm、相对误差约为 0.001%,符合 10cm 的精度要求。

## 5 误差分析

仿真计算中的误差来源在于短时傅立叶变换加窗采样的有限性（仿真中的窗长度为 1024 个点），通过取平均进行了抑制。在实际系统中，可能的误差来源还有激光器的强度/频率漂移、EOM 调制频率抖动、PD 的探测误差、电路数模转换误差、远距离传输等环境干扰等。

由公式  $R = cf_B/2\gamma$ ， $f_B$  和  $\gamma$  的改变均影响计算结果。其中  $f_B = f_o - f_r$  受到参考频率和测量频率的影响， $\gamma$  为啁啾率，其偏移反映 EOM 调制抖动的影响。考虑 10cm 的精度范围，根据仿真可以假定有 1cm 的量化误差（数模转换等），若使剩余误差不超过 9cm，分别考虑两个因素，需要：

- (1)  $\partial R/\partial f_B = c\delta f_B/2\gamma \leq 0.09$ ，得  $\delta f_B \leq 27 \text{ kHz}$ ，即频率差探测误差不大于 27 kHz。其中， $\delta f_B = |\delta f_o + \delta f_r|$  为 PD1 和 PD2 的频率探测误差和。
- (2)  $\partial R/\partial \gamma = cf_B/\gamma^2 \cdot \delta \gamma \leq 0.09$ ，得  $\delta \gamma \leq 0.405 \text{ GHz}$ ，约为  $\gamma$  的十万分之一。

经过以上分析，我们得到了误差范围内稳定测量的一些参数要求，由于该方法主要基于频率调制，其频率调制和测量的准确性要求较高。

## 5 总结与讨论

本文设计并仿真了利用激光外部扫频调制进行距离测量的光电系统，实现了距离 5km、精度 10cm 的距离测量。改系统的可以在一个扫频周期内（66.7 us）完成准确测距，速度快（10kHz 级）、准确度高。

系统的设计也有一定的缺点，比如需要 GHz 级的频率调制和探测器件，且需要的啁啾率达 45PHz，对器件要求较高，价格较高；以及对误差分析不够完善，没有进一步对噪声等进行理论和仿真分析，这些可以在实践中逐步优化和改进。

## 参考文献

- [1] Nakamura, K., Hara, T., Yoshida, M., Miyahara, T. & Ito, H. Optical frequency domain ranging by a frequency-shifted feedback laser. *IEEE J. Quantum Electron.* **36**, 305–316 (2000).
- [2] Bosch, T. Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement. *Opt. Eng* **40**, 10 (2001).
- [3] Lee, J., Lee, K., Lee, S., Kim, S.-W. & Kim, Y.-J. High precision laser ranging by time-of-flight measurement of femtosecond pulses. *Meas. Sci. Technol.* **23**, 065203 (2012).
- [4] Wang, Y. et al. Frequency-swept feedback interferometry for noncooperative-target ranging with a stand-off distance of several hundred meters. *PhotonIX* **3**, 21 (2022).
- [5] Saeed Olyaei. Comparison of TOF, FMCW and Phase-Shift Laser Range-Finding Methods by Simulation and Measurement. *Quarterly Journal of Technology & Education* **1**, No.1 Autumn 2006
- [6] Riemensberger, J. et al. Massively parallel coherent laser ranging using a soliton microcomb. *Nature* **581**, 164–170 (2020).
- [7] [NIR-MX950 光强度调制器](#)
- [8] [12 GHz Photodetectors](#)

## 附录

MATLAB 仿真代码如下:

```
%% Setup simulation parameter
clc;close all;clear;
c=3e8;
F=1.5e9*2; % max modulation frequency
gamma=45e12; % chirp rate
T=F/gamma;
fs=1e10; % sampling frequency: 10 GHz
R=5e3; % laser ranging length

dt=2*R/c;
t=0:1/fs:T;
f=gamma*t;
N=length(t);
[~,Ndt]=min(abs(t-dt)); % start receiving back signal from Ndt

%% Generate chirp signal
A=1;
Er1=A*chirp(t,0,T,F);
Er2=A*chirp(t,0,T,F);
Eo1=A*chirp(t(1:Ndt),0,dt,0);
Eo2=A*chirp(t,0,T,F);
Eo3=A*chirp(t(1:end-Ndt),0,T,F);
Er=[Er1,Er2];
Eo=[Eo1,Eo2,Eo3];

figure('Color','White');
subplot(211);
pspectrum(Er,fs,'spectrogram');
title('Reference time-frequency graph');
subplot(212);
pspectrum(Eo,fs,'spectrogram');
title('Object time-frequency graph');

%% Time-frequency analysis
nsc = 1024; % window length
```

```

window=hamming(nsc);
nov = floor(nsc/2); % 50% overlap
nff = max(256,2^nextpow2(nsc));

[s1,f1,t1]=spectrogram(Er>window,nov,nff,fs);
[s2,f2,t2]=spectrogram(Eo>window,nov,nff,fs);
s1=abs(s1);s2=abs(s2);
fBs=zeros(size(s1,2),1);
for tt=1:size(s1,2)
    [~,id1]=max(s1(:,tt));
    [~,id2]=max(s2(:,tt));
    fBs(tt)=f1(id1)-f2(id2);
end

figure('Color','White');
plot(t1,fBs);
xlabel('time [s]');
ylabel('Frequency [Hz]');

%% Compute intermediate difference frequency
[~,id1]=min(abs(t1-dt));
[~,id2]=min(abs(t1-T));
fB=mean(fBs(id1+1:id2-1));
R1=c*fB/(2*gamma);
% plot(fBs(id1+1:id2-1))

err=abs(R1-R);
disp(['computed length: ',num2str(R1),' m']);
disp(['absolute error:', num2str(err*10),' cm']);
disp(['relative error:', num2str(err/R*100),'%']);

```