

调频连续波 激光探测技术

杜小平 赵继广 曾朝阳 宋一铄 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

调频连续波激光 探测技术

杜小平 赵继广 曾朝阳 宋一铄 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

调频连续波激光探测融合了调频连续波雷达与激光的优点,具有广泛的应用前景。本书系统阐述了调频连续波激光探测的原理、系统构成与实现、调制发射、混频接收、信息处理以及性能分析等理论与技术。全书注重理论联系实际,是作者在该领域十余年研究成果的结晶。

本书可作为测控技术及仪器、目标探测与识别、空间态势感知、光学工程等专业领域本科生及研究生的教材或参考书,对从事相关领域工作的科技人员也有较大的参考价值。



I. ①调… II. ①杜… III. ①激光探测—探测技术
IV. ①TN247

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 022191 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 17 1/2 字数 400 千字

2015 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 65.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

20 世纪 90 年代末,美国陆军研究实验室(ARL)将调频连续波测距原理应用于激光探测,结合两者的优势,提出了线性调频连续波激光雷达技术。调频连续波激光雷达融合了无线电线性调频探测精度高与激光探测抗电磁干扰能力强、方向性好的特点,同其他体制激光雷达技术相比,在抗干扰能力、探测虚警率、探测精度等方面具有明显的优势,而且支持多目标、多信息探测,支持无扫描成像探测。

作者紧跟该新技术发展进程,在总结 ARL 研究成果的基础上开展调频连续波激光探测技术研究十余年,对探测机理、调制发射、混频接收、自主可控关键器件实现、信号处理等关键技术进行了深入研究,取得了多项创新性成果。本书是作者在该领域十余年研究成果的基础上,参考国内外有关文献,经总结、提炼、加工而成的一本专著。

本书以提高系统测量精度和抗干扰能力为出发点,紧紧围绕调频连续波激光探测技术,对调频连续波激光探测原理、调频连续波激光探测系统构成及实现、调频连续波激光探测调制发射理论与技术、调频连续波激光探测混频接收理论与技术、调频连续波激光探测信息处理理论与方法、调频连续波激光探测性能分析方法等进行了系统的阐述。本书共包括 6 章,第 1 章绪论,主要概述激光探测技术的基本体制及其原理,分析各种体制激光探测技术特点、发展趋势及其瓶颈问题,从而分析调频连续波激光探测技术优点。第 2 章阐述了调频连续波激光探测技术原理,针对探测系统信号发射、传输、目标散射、接收、处理等过程,建立了调频连续波激光探测方程以及距离分辨力和测距精度的数学模型,并分析了多普勒效应对调频连续波激光探测系统性能的影响。第 3 章系统阐述了调频连续波激光探测调制发射理论和方法,主要包括调制发射原理、线性调频信号生成方法、激光高频宽带调制与放大理论、激光发射光学系统设计理论依据等内容。第 4 章系统阐述了调频连续波激光探测混频接收理论和方法,主要包括混频接收原理,电混频与光电混频实现方法及性能分析,光电探测器(ICCD、

EBAPS、MSM、APD 等)的混频方法、混频模型及混频性能分析。第5章从调频连续波激光探测回波信号特性分析入手,系统阐述了回波信号检测方法、回波信号距离—速度解耦方法、中频信号频谱细化方法、目标信息提取方法等。第6章从调频连续波激光探测性能影响因素分析入手,系统阐述激光器调制发射对探测性能的影响、接收机探测接收对探测性能的影响、激光传输介质对探测性能的影响。

本书由杜小平、赵继广负责整体结构和内容设计。第1章、第2章、第6章由杜小平撰写,第5章由赵继广撰写,第4章由杜小平、宋一铄撰写,第3章由杜小平、曾朝阳撰写。

本书侧重于调频连续波激光探测技术的理论基础、系统实现方法及实际应用,介绍了最新的科研成果,实用性很强,可作为高等院校测控技术及仪器、光学工程、目标探测与识别、空间态势感知等专业本科生及研究生教材,也可作为从事目标光电探测与识别、测控技术及仪器、光学工程等专业技术人员的参考书。

北京理工大学崔占忠教授为本书提出了许多宝贵意见;王盛军、曾德贤、赵阳、杨文进、王俏、邓陈、张晓永、甘霖、姜智强、王建争等同志为本书的成稿做了许多工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,经验不足,书中缺点和错误在所难免,敬请读者和专家批评指正。

第1章 绪论	1
1.1 典型激光探测技术体制基本原理及特点	1
1.1.1 典型激光探测技术体制分类	1
1.1.2 脉冲飞行时间激光探测技术基本原理与特点	2
1.1.3 脉冲增益调制激光探测技术基本原理与特点	4
1.1.4 光子计数激光探测技术基本原理与特点	6
1.1.5 鉴相式连续波激光探测技术基本原理与特点	8
1.1.6 调频连续波激光探测技术基本原理与特点	10
1.1.7 激光三角探测技术基本原理与特点	12
1.2 调频连续波激光探测技术优势与应用前景	13
1.2.1 调频连续波激光探测技术优势	13
1.2.2 调频连续波激光探测技术应用前景	15
1.3 调频连续波激光探测技术现状及发展趋势	16
1.3.1 调频连续波激光探测技术总体现状及趋势	16
1.3.2 调制与发射关键技术现状及趋势	19
1.3.3 光电混频接收关键技术现状及趋势	23
1.3.4 信号处理关键技术现状及趋势	25
参考文献	26
第2章 调频连续波激光探测机理	30
2.1 调频连续波激光探测基本原理	30
2.2 调频连续波激光探测系统基本组成	34
2.3 调频连续波激光测距方程	35
2.4 距离分辨力和测距精度	37

2.5 激光测距的多普勒效应	41
参考文献	43
第3章 调频连续波激光探测调制发射	45
3.1 调频连续波激光调制发射原理及系统组成	45
3.1.1 调频连续波激光调制原理	45
3.1.2 调制发射系统组成及关键技术	46
3.2 线性调频信号生成	48
3.2.1 线性调频信号的生成方法概述	48
3.2.2 基于 DDS 的 Chirp 信号生成	51
3.2.3 Chirp 信号参数对 FMCW 激光探测 系统性能的影响分析	61
3.3 激光高频宽带调制与放大	62
3.3.1 常用激光调制方法及原理	62
3.3.2 FMCW 激光探测系统大功率宽带调制	68
3.3.3 已调激光的放大	79
3.4 激光发射光学系统	81
3.4.1 激光传输特性与准直扩束	81
3.4.2 常用激光发射光学系统	85
3.4.3 FMCW 激光探测发射光学系统构建	86
参考文献	87
第4章 调频连续波激光探测混频接收技术	92
4.1 调频连续波激光混频接收原理及系统组成	92
4.1.1 调频连续波激光探测光电混频原理	92
4.1.2 混频接收系统组成	94
4.2 FMCW 激光探测接收系统的实现结构	96
4.2.1 电混频光接收机前端实现结构	96
4.2.2 光电混频光接收机前端实现结构	100
4.2.3 电混频与光电混频接收机性能比较	101
4.3 基于量子阱电光反射调制器和电压 调制光电探测器的光电混频	112
4.3.1 基于量子阱电光反射调制器的光电混频方法	112
4.3.2 基于电压调制光电探测器的光电混频方法	113

4.4	基于 ICCD 的光电混频	114
4.4.1	基于 ICCD 的光电混频方法概述	114
4.4.2	ICCD 电子轰击倍增过程过剩噪声因子	115
4.4.3	ICCD 光电混频模型	116
4.5	基于 EBAPS 的光电混频	117
4.5.1	EBAPS 概述	117
4.5.2	EBAPS 电子轰击倍增过程过剩噪声因子	118
4.5.3	EBAPS 光电混频模型	119
4.6	基于 MSM 的光电混频	121
4.6.1	MSM 概述	121
4.6.2	MSM 电压—电流模型	124
4.6.3	MSM 光电混频模型	127
4.6.4	MSM 光电混频性能	128
4.7	基于 APD 的光电混频	131
4.7.1	APD 概述	131
4.7.2	APD 电压—电流模型	135
4.7.3	APD 光电混频模型	138
4.7.4	APD 光电混频性能	140
	参考文献	142
第5章	调频连续波激光探测信号处理方法	144
5.1	调频连续波激光探测回波信号特性	144
5.1.1	中频信号时域分析	144
5.1.2	中频信号频域分析	145
5.1.3	FMCW 激光探测信号的多普勒效应分析	146
5.1.4	近距高速目标回波信号频谱及 TBP 影响分析	149
5.1.5	中频信号的噪声频域统计特性	155
5.2	调频连续波激光探测信号检测方法	158
5.2.1	频域过门限检测方法	159
5.2.2	基于频域自适应阈值的恒虚警检测方法	166
5.3	回波信号的距离—速度解耦	169
5.3.1	距离—速度解耦分析	169
5.3.2	调频连续波激光探测信号模糊函数	171

5.3.3	距离—速度解耦原理	174
5.4	中频信号频谱细化方法	176
5.4.1	频谱细化方法概述	176
5.4.2	时域补零法	177
5.4.3	基于实输出结构的 ZFFT 变换法	178
5.4.4	Chirp-Z 变换法	181
5.4.5	FFT-Chirp-Z 频谱细化方法	182
5.4.6	频谱细化方法性能分析	183
5.5	调频连续波激光探测目标信息提取方法	184
5.5.1	基于二维傅里叶变换的目标信息提取方法	184
5.5.2	基于距离补偿的目标信息提取方法	186
5.5.3	基于速度补偿的目标信息提取方法	191
5.5.4	基于参数估计的目标距离与速度信息快速提取方法	193
5.5.5	基于二次混频和变周期调频解耦的 多目标信息提取方法	200
5.5.6	基于余弦变换的多目标分辨方法	203
	参考文献	208
第 6 章	调频连续波激光探测性能分析	211
6.1	调频连续波激光探测性能影响因素	211
6.1.1	发射子系统对探测性能的影响因素分析	211
6.1.2	接收子系统对探测性能的影响因素分析	213
6.1.3	传输介质对探测性能的影响因素分析	213
6.1.4	信号处理子系统对探测性能的影响因素分析	214
6.2	激光器调制发射对探测性能的影响	214
6.2.1	探测系统光源的影响分析	215
6.2.2	发射激光信号调制特性的影响分析	221
6.3	调频连续波激光探测接收对探测性能的影响	230
6.3.1	接收光学系统对信噪比的影响	230
6.3.2	探测器对信噪比的影响	231
6.3.3	信号解调系统对信噪比的影响	235
6.3.4	中频信号调理模块对信噪比的影响	238
6.4	传输介质对调频连续波激光探测性能的影响	240

6.4.1	激光探测系统在气溶胶环境下的探测过程分析	241
6.4.2	气溶胶的散射特性	242
6.4.3	气溶胶对 FMCW 激光信号传输的影响.....	250
6.4.4	FMCW 激光探测系统气溶胶后向散射特性分析	259
参考文献		266

第1章 绪 论

激光实质就是受激辐射光放大(Light Amplification by Stimulated Emission Radiation, LASER)的简称,20世纪60年代初世界上第一台红宝石激光器一经问世,便催生了以测距为主要功能的新的光学探测手段——激光探测技术,引起了现代光学技术的巨大变革。激光探测技术因其高精度、方向性、单色性、相干性等优点,在工业、农业、医学、国防等领域得到了越来越广泛的应用,特别是在测量与测试领域发挥了前所未有的作用。

激光探测技术的发展与光电技术的发展密切相关,随着光电二极管、CCD及CMOS等成像阵列、位置敏感器(PSD)、雪崩光电二极管(APD)、微通道板(MCP)、硅光电倍增管(SIPMT)等光电器件的发展,激光探测技术在目标探测、在线检测与控制、光学传感、视觉检测等领域的应用得到了快速而广泛的发展。

本章重点介绍几种典型的激光探测技术体制基本原理及其技术与应用特点,从而分析调频连续波激光探测的技术优势与应用需求,以及目前调频连续波激光探测技术的研究现状及技术水平。

1.1 典型激光探测技术体制基本原理及特点

1.1.1 典型激光探测技术体制分类

早在20世纪70年代,基于雷达原理的激光测距技术开始应用于合作目标探测,并成功用于舰船入港时避障和防撞。进入80年代以后,非合作目标的激光测距技术发展起来并用于航天飞机回收卫星时的精确定位等领域。在海湾战争中,激光测距技术曾用于直升机在甲板上的起降控制和防止直升机夜间飞行中与沙丘碰撞。此外,美国的休斯公司、Schwatz公司、Sparate公司、洛雷尔系统公司以及法国的汤姆逊公司等,在20世纪80年代末90年代初还分别研制出激光测距成像系统,用于战场侦察、低空飞行器下视和防撞以及主动激光制导等。

激光探测技术的核心是激光测距技术,目前激光测距技术根据测量方法的

不同可分为两大类,即直接测量和间接测量。直接测量分为相干测量法和非相干测量法;间接测量主要指三角测量法。激光测距技术分类如图 1-1 所示。

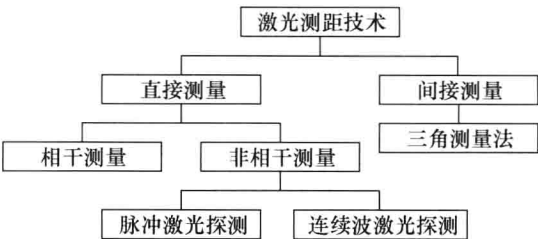


图 1-1 激光测距技术分类

其中,相干测量法是指利用激光的相干性进行测量,典型应用为激光合成孔径雷达,即激光 SAR,它具有抗干扰能力强、测距精度高等优点,但由于对激光的相干性要求较高且需要进行相干解调,因此对硬件的要求很高。

非相干测量法按照发射激光信号的不同,分为脉冲激光探测与连续波激光探测。

本书主要介绍目前研究应用较为广泛的非相干测量体制及间接测量体制的基本原理和特点。目前脉冲体制的非相干激光探测技术发展快、研究及应用广泛的主要是脉冲飞行时间激光探测技术、脉冲增益调制激光探测技术,随着探测接收器件的发展,2008 年后新发展起来的一种光子计数激光探测技术具有灵敏度高、发射功率低等优点,但对接收器件要求非常高,目前主要处于理论研究和实验阶段,尚未得到广泛应用。连续波体制的非相干激光探测技术发展快、研究及应用广泛的主要是鉴相式连续波激光探测技术和调频连续波激光探测技术。激光三角测量技术是发展快、研究及应用广泛的间接测量体制。

1.1.2 脉冲飞行时间激光探测技术基本原理与特点

1. 基于脉冲飞行时间激光探测基本原理

基于脉冲飞行时间的激光测距是通过测量激光脉冲的飞行时间 (Time of Flight, TOF) 来测量系统与目标之间的距离。激光探测系统向目标发射一个激光脉冲,经目标反射后由探测系统的回波接收通道接收,并测量激光脉冲从发射到返回探测系统所经历的时间 τ 。显然,探测系统和目标之间的距离如式(1-1)所示。

$$R = \frac{c\tau}{2}$$

(1-1)

式中: c 为真空中光速。

典型脉冲飞行时间激光探测系统结构如图 1-2 所示^[1]。光源发射的脉冲激光信号,经过分光镜后,绝大部分经发射光学天线波束形成后,射向目标,极小部分经反射镜被 PIN 管检测后进入主波接收通道,经过信号调理后触发时间间隔测量单元开始计时。目标反射回的脉冲激光信号经接收光学天线滤光、聚焦到 APD 光敏面上进入回波接收通道,经过信号调理后触发时间间隔测量单元停止计时。时间间隔测量单元将测量结果送入距离解算单元得到距离值。

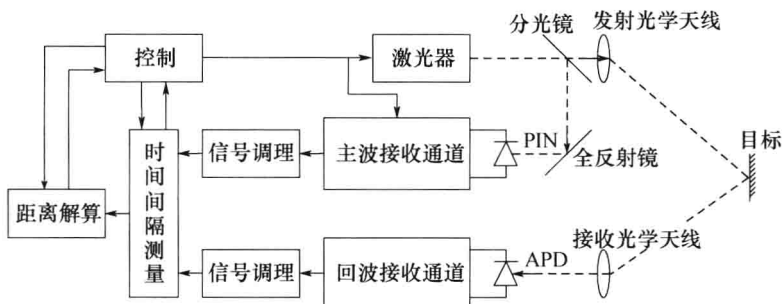


图 1-2 典型脉冲飞行时间激光探测系统结构图

脉冲飞行时间激光探测技术利用脉冲激光器作为光源,发射高斯型激光脉冲信号,如图 1-3 所示。应用中重点关注的脉冲激光器参数包括脉冲峰值功率($P_{\max}$)、脉冲重复时间($T_1 \sim T_0$)、脉冲上升时间($T_0' \sim T_0$)、脉冲半功率宽度(FWHM)。因为脉冲峰值功率决定测距的最大距离,脉冲重复时间(另称脉冲重复频率,PRF)决定测距的最大速率,脉冲上升时间决定测距的精度范围,脉冲半功率宽度决定测距的最小距离。

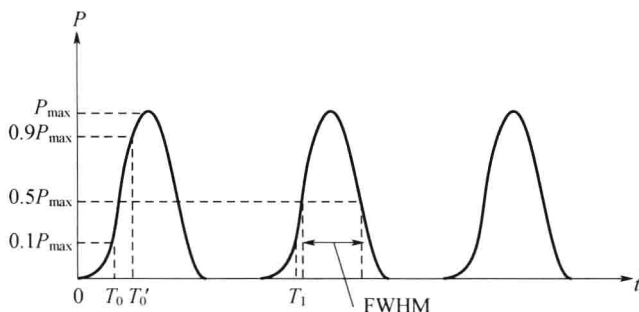


图 1-3 激光脉冲信号参数示意图

2. 脉冲飞行时间激光探测技术特点

通过分析脉冲飞行时间激光探测基本原理可知,脉冲飞行时间激光探测技术的主要优缺点体现在表 1-1、表 1-2 所列的几个方面。

表 1-1 基于脉冲飞行时间激光探测技术的主要优点

序号	优点	注释
1	测程很远	脉冲激光器发射的激光峰值功率很高,可达到 MW 量级
2	精度较高	单次测量精度在厘米至分米量级,多次测量后可达毫米量级
3	测距速度快	脉冲重复频率一般在几十 kHz,因此测距速度很快
4	抗背景干扰强	激光峰值功率大,对背景光具有较强的抗干扰能力
5	穿透烟雾能力强	激光峰值功率大,在对地面目标探测中具有较强的穿烟透雾的能力

表 1-2 基于脉冲飞行时间激光探测技术的主要缺点

序号	缺点	注释
1	存在测距盲区	脉冲宽度限制其最小量程
2	易损毁探测器	近距离测量时,回波过强容易使探测器饱和或损毁
3	抗人为干扰弱	易受人为制造的回波脉冲干扰
4	信号处理较复杂	为实现高精度测距,需要宽带接收机和脉冲信号高速采样

通过分析脉冲飞行时间激光探测技术的优缺点,可知其主要适用于远距离目标定向测距、高速运动目标快速测距。此外,若采用激光脉冲功率动态控制,也可用于近距离目标高精度测距。

1.1.3 脉冲增益调制激光探测技术基本原理与特点

1. 脉冲增益调制激光探测基本原理

脉冲增益调制激光探测技术是将对飞行时间的测量转换为对与飞行时间成比例的探测器积分电压值的测量,因此可以使用 CCD 等成熟的光电传感器实现探测接收机。基于像增强器和 CCD 实现脉冲增益调制激光探测的典型结构如图 1-4 所示^[2]。

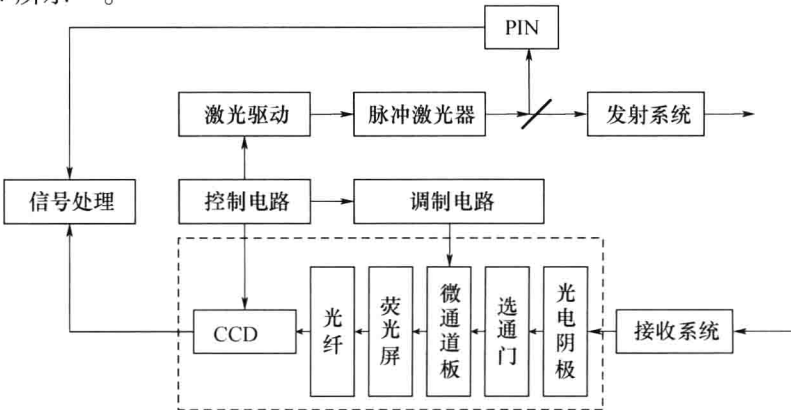


图 1-4 利用像增强器和 CCD 实现脉冲增益调制激光探测的典型结构图

假设脉冲激光器发射功率(这里指单脉冲功率)为 P , 目标反射率为 ρ , 不考虑激光的其他衰减, 则 CCD 得到的信号强度 A 与像增强器增益 $G(t)$ 的关系为

$$A = \int_t P \rho G(t) dt \quad (1-2)$$

传统情况下像增强器的增益为固定值, 在脉冲增益调制测距系统中, 像增强器的增益是随时间变化的。为了获取目标的距离信息, 首先获取目标在常增益下的强度

$$A_c = \int_t P \rho G_c(t) dt = G_c(t) \int_t P \rho dt \quad (1-3)$$

再获取增益随时间变化的变增益下的强度:

$$A_v = \int_t P \rho G_v(t) dt \quad (1-4)$$

由于目标距离 R 与脉冲飞行时间 t_d 具有如下关系:

$$R = \frac{c}{2} t_d \quad (1-5)$$

则有

$$A_v = \int_t P \rho G_v(t) dt \approx G_v(t_d) \int_t P \rho dt \quad (1-6)$$

将两次测量得到的强度值相比, 得到

$$\frac{A_v}{A_c} = \frac{G_v(t_d)}{G_c} \quad (1-7)$$

假设 $G_v(t_d)$ 、 G_c 通过测定已知, 则目标距离为

$$R = \frac{c}{2} G_v^{-1}(G) \Big|_{G = \frac{A_v}{A_c} G_c} \quad (1-8)$$

式中: $G_v^{-1}(G)$ 为 $G_v(t)$ 的逆函数。

2. 脉冲增益调制激光探测技术特点

通过分析脉冲增益调制激光探测基本原理可知, 脉冲增益调制激光探测技术的优缺点主要体现在表 1-3、表 1-4 所列的几个方面。

表 1-3 脉冲增益调制激光探测技术的主要优点

序号	优点	注 释
1	光电传感器成熟	可以使用 CCD 作为传感器, 产品成熟
2	测距距离较远	使用脉冲激光器作为光源, 具有较高的瞬时发射功率和较低的平均功耗
3	信号处理简单	不需要复杂的距离解算算法

表 1-4 脉冲增益调制激光探测技术的主要缺点

序号	缺点	注 释
1	存在测距盲区	脉冲宽度限制其最小量程,同时光电接收器件存在延迟
2	需要多次测量	需要多次测量提高信噪比,测量速度因此受限
3	抗干扰能力差	对于快速变化的光干扰,会造成较大测距误差
4	测距精度低	精度仅为米级

需要重点说明的是,该技术体制的测距精度之所以很难做到很高,主要是因为以下几个方面的原因。

(1) 在上述推导过程中的式(1-3)与式(1-4),没有考虑背景光干扰和电路噪声对测距的影响。若加以考虑,则式(1-7)应改为

$$\frac{A_v}{A_c} = \frac{G_v(t_d) + n_v}{G_c + n_c} \tag{1-9}$$

式中: n_v 和 n_c 分别为变增益和恒增益调制过程中积累的噪声。为了使式(1-9)与式(1-7)近似相等,显然应当增加积累时间,即进行多个脉冲累积,从而减小背景光和电路噪声对测距的影响。

(2) 在距离解算的推导过程中,假设 $G_v(t)$ 、 G_c 已知,但实际上很难对 $G_v(t)$ 进行准确的控制与函数描述,因而通过逆函数来解算目标距离会引入较大误差。

(3) 在上述推导过程中的式(1-6)中设定脉冲宽度极窄的约束条件,因此认为脉冲增益为定值,这种近似本身不可避免地引入了距离误差。

(4) 由于将目标距离转换为探测器电压积分,因此对积分值的测量会引入测距误差。

正是由于以上几方面的原因,使得脉冲增益调制激光探测技术的测距精度一般较低,国内具有较高水平的是哈尔滨工业大学和天津津航技术物理研究所开展的相关研究,100m内测距误差约为1m量级^[2-4]。

1.1.4 光子计数激光探测技术基本原理与特点

1. 光子计数激光探测基本原理

光子计数是20世纪90年代初就提出的概念,但该技术发展一直并不顺利,到目前为止仅有美国麻省理工学院林肯实验室(MIT's Lincoln Lab, MIT-LL)提出的基于激光飞行时间统计、美国陆军研究实验室提出的基于光子密度分布的两种光子技术激光探测实现方法^[5-15]。但后者因对探测接收器件要求过高,目前无法实现,仅停留在理论研究阶段。即便前者也一直到了2003年才搭建了实验系统,2008年完成了实验平台,开展了地面及机载实验。实验平台利用微型激光器(GEN-III, 532nm, 300ps, 33μJ, 脉冲重复频率16kHz)探测距离可达

9km,在3000m距离上精度达到了分米级。因此,这里仅介绍基于激光飞行时间统计的光子计数激光探测基本原理^[8,12]。

图1-5中,光子计数激光探测系统首先发射如图1-5(a)所示的激光脉冲信号。激光的瞬时发射功率可以看做是短时间内激光器发射的光子数量,即光子在时间上的分布密度,则回波脉冲信号必然保留其光子密度随时间分布的特性,但因传输损耗会造成密度大幅降低,如图1-5(b)所示。回波中的背景光可看做是随机光子,其密度随时间的分布较为平均,探测器噪声可转换并等效为光子噪声,其密度随时间分布也较为平均。探测器响应每个接收到的光子(或噪声)并进行计数,信号处理电路将时间分为多个计数时间格子(一个时间格子对应一个距离格子),计算每个格子内的光子数。由于目标回波激光信号、背景光以及探测器的暗计数都会触发计数,因此对于一次脉冲测量(如图1-5(c)所示)没有意义,必须进行多次脉冲测量并对计数结果进行统计分析,得到基于光子计数的距离测量值,如图1-5(d)所示。

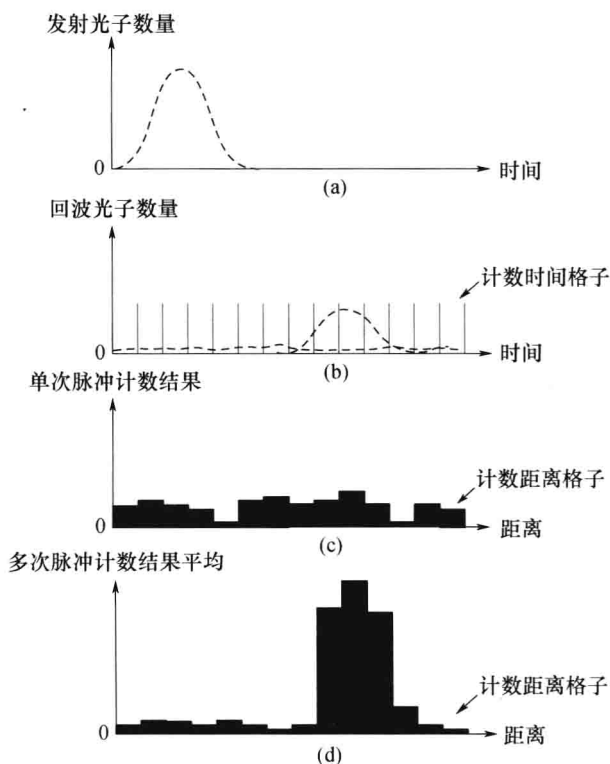


图1-5 光子计数激光测距原理示意图