

红外光电系统手册〈第6卷〉

主动光电系统

航天工业总公司第三研究院
八三五八所翻译出版

主動光電系統

第 6 卷

紅外光電系統手冊

出版序言

本书以1978年出版的“红外手册”为基础，但对它作了大量的修订、更新和补充，而且进行了重新整理和编排。因此，无论在内容上和形式上都以崭新的面貌出现。

全书共分八卷四十五章。几乎涉及到目前活跃于军事、航空航天和民用光电技术的大部分学科。尤其是有些内容由先进的军事技术派生而来，在公开发表的文献中很少有如此大量的报道。同时，在编排上也较好地考虑了可使用性因素。每章自成一体，避免了互相间繁琐地查阅；陈述格式由简明导言、实用公式汇编、有关数据、公式和数据使用方法实例四部分组成，非常明了实用。

本书内容广泛充实，有较丰富的数据和参考资料，反映了美国九十年代初以前在此学科领域内的工程研究水平，具有先进性和很好的借鉴性，是目前红外与光电系统学科领域中最新的一本参考书和非常有用的工具书。

为及时地把这本手册推荐给我国从事红外和光电系统设计的工程技术人员，我所决定翻译出版本手册。但由于篇幅较长，翻译出版工作量巨大，故拟分两次进行。本次翻译出版的内容为第三、五、六卷。以后，将在适当时候译全出齐。

红外和光电系统技术属于跨学科应用工程技术，所涉及的专业知识面极广。由于参加译、校和审订者的专业水平和外语水平有限，在译文中难免有错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

本手册由中国科学院成都分院林祥棣院长推荐并引进，值此翻译出版之际对他表示忱谢。

孙再龙
1996年9月

引 言

本卷讲述“主动”光电系统。这些系统采用一个人造光学辐射源（一般为激光器）和接收机，其接收机用于收集和探测目标景物直接或反射后的部分光辐射。这不同于“被动”系统，“被动”系统敏感的是自然辐射光或反射的日光或月光。在大多数情况下，只要能够满足要求，最好使用被动传感器。为满足另外一些要求，常需要采用具有特殊性能的主动传感器。使用合适的主动传感器有可能精确确定目标的距离，目标的距离变化率，三维几何形状，振动特性，光谱反射以及许多其他特性。主动传感器还常常和被动传感器一起使用以发挥二者的优点。其中的一个例子是将热成像系统与激光测距仪结合使用。

虽然毫米波（MMW）辐射不属于电磁波频谱中的光学波段，但毫米波雷达这也放在本卷讨论，因为当今对这项技术和光电传感器联合应用有很大的兴趣，另外也为了强调激光雷达和毫米波雷达的相似点和不同点。

在某些情况下（如光纤通讯系统），信号在发射波束上被编码，并直接输送到远距离的接收机。另外一些情况下（例如，激光和 MMW 雷达以及测距仪），波束发射到目标，其一小部分的反射波被接收机收集和探测，接收机常和发射机并列配置。在这种情况下，接收机敏感的信息是目标的一个或多个特性，该信息加在被目标自身所反射的波束中。在大部分情况下，为了最有效地提取目标的信息，常常使用特殊波形（如脉冲，连续波，调幅或调频）作输出波束。

第一章讲述的是激光雷达。因为许多现代激光雷达都采用相干（外差）探测接收器，因此重点放在相干探测上。当今激光雷达得到了发展，并有许多应用，从利用低功率固体或半导体二极管类型的发射机和直接探测接收机的短距离传感器（如机载防撞探测器，距离一般为几百米或更短），到采用较高功率的气体激光器和相干探测接收机的长距离传感器（如战本目标分辨激光雷达，距离为几百公里）。在许多情况下，当发射功

率相同时，相干探测比直接探测能提供高得多的灵敏度和多用性。相干探测具有极好的探测径向运动的能力，包括能探测总体运动（多普勒频移）和振动（微多普勒）。

第二章讲述激光测距仪，重点在直接探测上，因为大部分的激光测距仪采用直接探测接收机。当今激光测距仪得到了很大的发展，在军用和民用方面有广泛的应用。军用主要是用于战车，航空平台，空防系统以及各种便携式武器系统的火控系统中。在战场中使用的激光测距仪中虽然也用某些半导体二极管型和气体型的激光器，但脉冲固体激光器是最常用的发射源。目前大部分战场上用的以 $1.06\mu\text{m}$ 或更短波长工作的激光器对眼睛是不安全的。然而，波长大于 $1.4\mu\text{m}$ 的激光器对眼睛是安全的，随着这类激光器品种的不断增多，它们将在不远的将来大量投入战场使用。

第三章讨论毫米波雷达。最近由于系统和元器件水平的提高，特别是以 35GHz 和 95GHz 工作的系统和元器件水平的提高，使人们对毫米波在军事目标探测和火控的应用有着极大的兴趣，并产生了开发毫米波系统的极大积极性。毫米波和光学波段相比，在恶劣天气下一般有很好的穿透性；毫米波雷达和同样孔径尺寸的微波雷达相比，又有更好的角度分辨率，因此毫米波雷达在各种应用场合有很强的竞争力。

第四章讨论光纤系统。光纤通讯系统与传统的导线通讯系统相比，大大地增加了带宽，因而提高了信息容量。由于光缆的光学和机械质量的大幅度提高，二极管激光发射机和接收机性能的改善，以及元器件成本的降低，使得光纤通讯系统成为闭式通道通讯应用中的优选者。

Califton S. Fox

Fort Belvoir, Virginia

1993.1

目 录

第一章 激光雷达	(1)
1.1 引言	(1)
1.1.1 激光雷达类型	(1)
1.1.2 工作原理	(1)
1.1.3 应用及其优点	(3)
1.2 激光雷达测距方程	(5)
1.2.1 测距方程的一般形式	(6)
1.2.2 测距方程的特殊形式	(7)
1.2.3 例题	(7)
1.3 发射机特性	(8)
1.3.1 光束形状和光束截面函数	(9)
1.3.2 光束的宽度	(10)
1.3.3 发射机瞄准误差	(14)
1.3.4 例题	(14)
1.4 大气传输	(14)
1.4.1 分子吸收和散射	(15)
1.4.2 天气	(15)
1.4.3 计算模型	(18)
1.4.4 例题	(19)
1.5 目标激光雷达横截面	(19)
1.5.1 镜面反射目标	(20)
1.5.2 漫反射目标	(20)
1.5.3 高分辨率目标横截面	(22)
1.5.4 计算模型	(22)
1.5.5 散斑	(22)
1.5.6 激光雷达横截面标准	(23)
1.5.7 例题	(23)
1.6 接收机特性	(24)
1.6.1 接收机类型	(24)
1.6.2 接收机孔径	(28)

1.6.3	性能极限	(28)
1.6.4	瞄准误差和角度滞后效应	(29)
1.6.5	视场	(29)
1.6.6	例题	(30)
1.7	噪声中的信号检测	(30)
1.7.1	信噪比	(30)
1.7.2	信号检测	(30)
1.7.3	探测规则	(32)
1.7.4	接收机带宽	(33)
1.7.5	例题	(33)
1.8	外差效率	(34)
1.9	激光雷达测量	(37)
1.9.1	距离	(37)
1.9.2	速度	(38)
1.9.3	强度	(39)
1.9.4	方位	(39)
1.9.5	目标特征	(39)
1.9.6	例题	(40)
1.10	测量特性	(41)
1.10.1	测量参数	(41)
1.10.2	系统误差源	(43)
1.10.3	例题	(43)
1.11	发射机调制技术	(44)
1.11.1	脉冲调制	(45)
1.11.2	振幅调制	(46)
1.11.3	频率调制	(47)
1.11.4	混合调制	(47)
1.11.5	激光放大器	(47)
1.11.6	发射机有效带宽和脉冲宽度	(47)
1.11.7	激光效率和功率	(48)
1.12	接收机解调技术	(48)
1.12.1	脉冲解调	(48)
1.12.2	振幅解调	(49)
1.12.3	频率解调	(50)

第二章 激光测距仪	(51)
2.1 引言	(51)
2.2 工作原理	(51)
2.3 激光测距仪的应用	(53)
2.4 激光测距方程	(56)
2.4.1 功率积分	(56)
2.4.2 等效噪声辐照度	(58)
2.4.3 附加噪声因子	(59)
2.4.4 背景噪声	(60)
2.4.5 探测器噪声	(60)
2.4.6 前置放大器噪声	(61)
2.4.7 接收器带宽	(61)
2.4.8 信号处理效率	(61)
2.4.9 后向反射率	(62)
2.4.10 脉冲加宽效率因子	(62)
2.4.11 大气吸收和散射	(63)
2.4.12 模糊物的衰减	(63)
2.5 测距概率和虚警率	(66)
2.5.1 高斯噪声中的脉冲探测	(66)
2.5.2 误差函数	(66)
2.5.3 激光脉冲幅度起伏	(66)
2.5.4 阈值噪声比	(66)
2.5.5 时间可编程阈值和主动阈值	(67)
2.5.6 量子噪声中的脉冲探测	(67)
2.5.7 大气扰动	(68)
2.5.8 累积探测概率	(69)
2.5.9 消光比	(70)
2.6 测距精度	(71)
2.6.1 距离误差	(71)
2.6.2 距离变化率误差	(72)
2.7 普通激光测距仪的特性	(73)
第三章 毫米波雷达	(76)
3.1 引言	(76)
3.2 雷达基本原理	(76)

3.2.1	基础知识和关键参数	(76)
3.2.2	雷达距离预测	(80)
3.2.3	采样距离计算	(83)
3.2.4	信号-杂波比计算	(85)
3.2.5	目标探测	(87)
3.2.6	雷达测量精度	(94)
3.2.7	合成孔径和逆合成孔径雷达	(98)
3.3	毫米波现象学	(101)
3.3.1	雷达目标	(101)
3.3.2	毫米波传播	(106)
3.3.3	毫米波杂波	(114)
3.4	毫米波元件	(121)
3.4.1	天线	(121)
3.4.2	毫米波源	(127)
3.4.3	传输线	(133)
3.4.4	混频器和探测器	(137)
3.4.5	波导、铁氧体和开关元器件	(140)
3.4.6	准光学元器件	(142)
3.4.7	毫米波集成电路	(142)
3.5	应用	(143)
3.5.1	讨论	(143)
3.5.2	折衷设计举例	(144)
3.5.3	寻的头和弹药制导	(151)
3.5.4	机载毫米波雷达	(154)
3.5.5	地基毫米波雷达	(156)
3.5.6	地基测试雷达	(158)
3.5.7	自动雷达	(162)
第四章	光纤系统	(171)
4.1	引言	(171)
4.2	光纤和光缆	(172)
4.2.1	光纤基础知识	(172)
4.2.2	光纤衰减	(176)
4.3	光源和光发射器	(177)
4.3.1	光源	(177)

4.3.2	发光二极管	(178)
4.3.3	半导体激光器	(178)
4.3.4	光源-光纤耦合	(179)
4.3.5	光源比较	(179)
4.4	光探测器和接收器	(182)
4.4.1	接收器	(182)
4.4.2	接收器特性	(183)
4.4.3	编码技术	(188)
4.5	复用技术	(192)
4.5.1	空间复用技术	(193)
4.5.2	波分复用技术	(193)
4.5.3	电子复用技术	(198)
4.6	系统元件	(200)
4.6.1	连接器和接头	(200)
4.6.2	耦合器	(203)
4.7	系统分析	(205)
4.7.1	光功率预算分析	(205)
4.7.2	带宽预算分析	(206)
4.7.3	简单数据通讯线路	(207)
4.7.4	带有二向色耦合器的全双工通讯线路	(208)
4.7.5	四通道波分复用通讯线路	(209)
4.7.6	光纤网络	(210)
	出版后记	(213)

第一章 激光雷达

1.1 引言

“雷达”一词起源于二次世界大战时期，是“无线电探测和定位”的字首组字。当时，是指通过检测反射的无线电电磁波来对遥远物体定位的技术。后来，基本的雷达技术逐渐应用于更短的波段(某些情况下用于更长的波段)，雷达一词不再是只局限于以射频工作的系统。激光雷达是以光频工作的雷达，它利用激光作为电磁辐射源*。

1.1.1 激光雷达类型

激光雷达可以根据各种标准分类，如：按激光雷达的测试类型，探测技术，相干激光雷达中用的干涉仪类型(如果适用)，调制技术，解调技术，激光器类型或工作波长，实现的功能，数据采集方式和数据格式等来分类。另外，还可以根据使用一个孔径或两个分离孔径进行发射和接收分为收发合置式或收发分置式两种。表 1.1 中列出了一些分类情况，但只凭借对系统的命名不足以判定其工作的情况，更不足以判别其工作性能的好坏。

从表 1.1 可以看出，激光雷达种类很多。激光雷达系统的多样性是其具有多种用途的一个重要原因，然而，这也可以引起混淆。例如：与波长有关的技术局限性常常妨碍将系统的特性参数从一种类型推广到另一种类型。这种局限性可能使得在一个波段上的常规性能超过在另一个波段上的最高性能(而且有可能超过基本的物理极限)，故将一种类型激光雷达的特性推广到另一种时必须谨慎小心。

由于不同波长的激光雷达采用各自特殊工艺和元器件，表明它与被动光学系统或传统雷达系统有着重大的差别。激光光源的有限使得激光雷达只有一定(少量)数目的工作波长可供选择。被动光学或传统的(从射频到毫米波)雷达可以选择工作波段来优化系统性能，而技术上无需有大的改变，但激光雷达却常常必须改变全部工艺(如电泵浦气体激光器与光泵浦固体激光器相比)才使工作波长有微小的变化。

1.1.2 工作原理

激光雷达和传统雷达工作原理相同。激光雷达发射信号，然后由雷达接收器收集被目标反射的信号，通过测量发射信号的往返时间来确定目标的距离。目标的径向速度可以由反射光的多普勒频移确定，也可以通过两次(或多次)距离测量，计算距离变化速率得到。

图 1.1 是一个有代表性的外差或相干探测激光雷达框图。光信号由发射器发出的激光形成，通过光束整形光路使光束的发散度及束径与系统其他部分相匹配。这种匹配不是必

* 在本手册中只使用激光雷达一词，在一些文献中有时也使用光学雷达，激光探测和测距(LADAR)，光探测和测距(LIDAR)来描述激光雷达。严格地讲光学雷达和 LIDAR 并不要求电磁辐射源是激光，但不管所用光源的类型如何，装备的实际工作过程都是相同的，故本手册的处理方法适用于在光学波段上工作的所有雷达。就本手册所述的工艺状况而言，所有已知的光学雷达都采用一个或几个激光器作为光源，因此，使用激光雷达一词不失其一般性。

表 1.1 激光雷达类型

激光器类型(典型)		载波波长
CO ₂		9.2~11.2μm
Er:YAG		2μm
喇曼频移 Nd:YAG		1.54μm
Nd:YAG		1.06μm
GaAlAs		0.8~0.904μm
HeNe		0.63μm
倍频 Nd:YAG		0.53μm
探测技术	干涉仪类型	调制技术
直接探测	不使用	脉冲 调幅(AM)
相干检测	外差 零差 补偿零差	脉冲 调幅(AM) 调频(FM) 混合(AM / FM, 脉冲) 不调制(CW)
功能		测量值
跟踪 移动目标指示 机器视觉 速度计 风剪探测 目标识别 成像 振动探测		大小范围 (反射) 距离 (时间延迟) 速度 (多普勒频移或微分测距) 角度位置 振动光谱

需的，因为一些系统可以在不经过整形的激光光束下工作。在收发合置光路系统中，发射的光信号进入一个收-发(T/R)开关。T/R 开关允许在同一光学孔径中发射和接收信号。接着激光雷达信号经过光束扩束器或输出望远镜，然后从扫描光学系统直接到达目标。

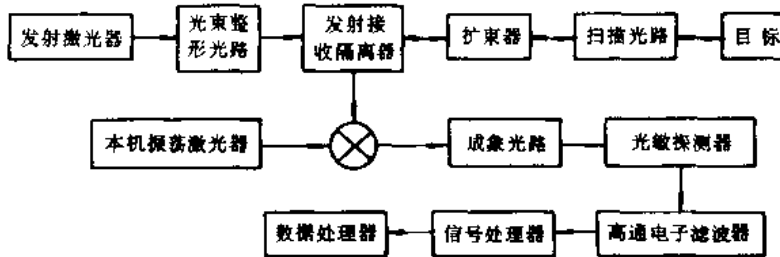


图 1.1 一种典型激光雷达的方块图

在收发合置光路系统中，被目标反射的光波由扫描光路和扩束器收集，此时，扫描光路和扩束器作光接收机用。T/R 开关将接收的光送到光学混频器，和本机振荡器的参考光信号混合。成像光路将混合信号聚焦在光敏探测器上。光敏探测器产生与接收的光信号相应的电信号，电信号通过高通滤波器滤掉低频成分，如来自背景信号和本机振荡器感应直流信号的低频分量。其中的高频成分含有激光雷达获得的目标信息，然后通过信号或数据处理器将信息从电信号中提取出来。在收发分置光路系统中，没有 T/R 开关。接收机有一套分离的扩束器和扫描光路，其他部分和上述收-发合置光路系统相同。

1.1.3 应用及其优点

激光雷达是传统雷达技术和光学技术相结合的产物。它较其“双亲”有一些技术上的优势，与微波雷达相比，激光雷达具有更高的分辨率，这使得激光雷达有很广的应用范围^[1]。因为激光雷达具有较高的载波频率，其波束比传统雷达窄(例如:10.6 μm 激光频率为 27,000GHz，典型的毫米波雷达频率为 95GHz)*。较窄的波束可提供较高的角分辨率，较低的旁瓣强度，较高的抗干扰(干扰和诱骗)性能和隐蔽性。而较高载频又能提高距离、速度、角度位置的分辨率及测量精度。

激光雷达的窄波束特性适合于目标跟踪等应用。图 1.2 示出一种典型的 CO₂ 外差激光雷达的探测距离与目标横向位置的函数关系。图 1.2 中，CO₂ 激光雷达为收-发合置光路系统，接收和发射有相同的孔径。图中给出了 25~100mm 的四个不同孔径的情况，它们的有效波束都很窄，可以进行非常精确地跟踪。

除了具有窄的波束之外，激光雷达相干接收机的灵敏度也随离轴位置增加而急剧下降。图 1.2 所示的这种接收机采用了一个匹配爱里模式(Airy)的本机振荡器来照明探测器，并实现了外差探测。由这两种作用结合产生了一个非常窄的“天线”方向图，如图 1.2

* 本章和所附各公式及等式中所使用的单位均为公制单位，除非有特别注明，但厂家经常使用公制以外的单位制，这对特殊的应用和工艺可能更为方便。在使用本章所给的公式和等式之前，必须将这些数据转换为公制单位。

所示。这些非常窄的天线方向图并非是图 1.2 所示的系统所独有的。图 1.3 是将发射器和接收机混合并对探测器作均匀的本机振荡照明后得到的天线方向图。在这些情况下，虽然仍保留了基本的“锥形光束”图形，但最大工作距离被大大降低了。注意图 1.2 和图 1.3 中横向距离坐标，单位是 m，而探测距离单位是 km。激光雷达天线的方向图形状要比随机观测这些图时所显示的要窄得多。

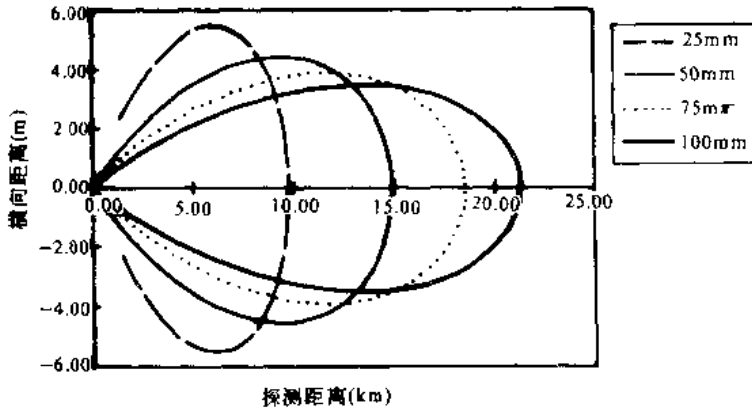


图 1.2 几种发射机和接收机孔径匹配的相干激光雷达的探测距离
(爱甲型本机振荡, $f/4$ 接收器)

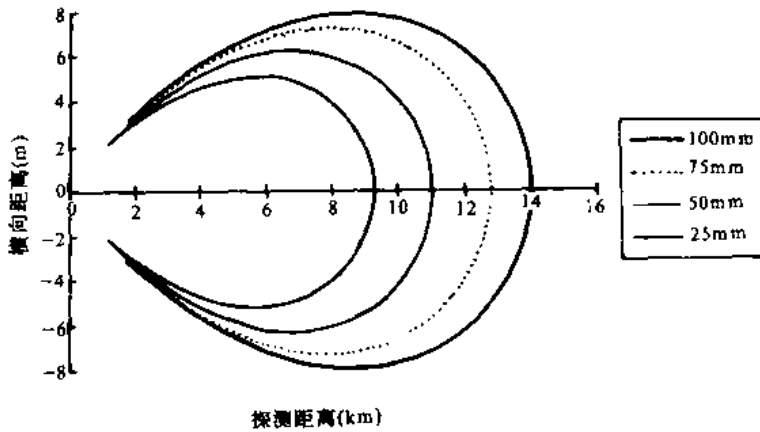


图 1.3 几种发射机孔径的相干激光雷达探测距离
(接收机孔径为 100 mm, 爱甲型本机振荡, $f/4$ 接收机)

天线方向图和激光发射功率及目标的激光横截面积无关。当激光功率和激光横截面积增加时，激光雷达的纵向和横向作用距离增加，但基本形状保持不变。对所有的结构而言，方向图的狭窄特性都能保持其“锥形光束”的轮廓。

天线方向图的狭窄特性使激光雷达很难进行侦察工作。通常与侦察有关的大范围搜索要求激光雷达有高的脉冲频率，以便在规定的时间内对整个范围进行搜索。另外，还可以

采用通过同一输出孔径平行工作的多路光束，来扩大搜索范围。使用多路平行光束的系统在光学上一般很复杂，但在总体上要比高脉冲频率发射系统简单。使用多光束后，可允许以低的扫描速率工作，可降低角度滞后效应(见 1.6.4 节)。

激光雷达的分辨率较高，有利于对目标进行识别和确认。目标表面的子区可以通过角度、距离和 / 或速度测量来分辨。这些分辨性的测量可测出特定类型目标的独特特征。这些独特的特征包括：形状、体积、速度、自旋或转动速率及振动等。

测量目标独特特征的能力使高分辨率系统可以成为理想的自动目标探测系统(ATD)，ATD 是以计算机对所收集数据进行分析作为基础的。高分辨率激光雷达常常称为“成象激光雷达”，因为收集的数据和传统视频显示常常是相容的，因此，这和人视觉理解这些收集的数据相容。数据显示技术对激光雷达来说并非关键，但对人分析收集数据却是很重要的。成象过程实际上只需要收集一组有序的三维数据(如：方位角、仰角和距离，或距离、速度和强度)。激光雷达常常同时进行多于三种的测试。如果将数据以图象的形式显示，则需要多个成象面以显示出所有的数据。通常，要求人进行译释会抑制而不是提高系统的性能，因此，成象激光雷达是高分辨率系统的一个子系统。

激光雷达有高的载波频率，可以对小目标进行探测和询问。在微波和毫米波频率上，电线和射弹的尺寸小于雷达波长，它们的横截面积很小，因此，传统雷达对这些物体很难探测，因为，所有这些物体的尺寸都大于激光雷达的波长，它们有很大的激光雷达横截面，因此激光雷达很适合这类小物体的探测，比如适于低空飞行器对电线和障碍物的探测以及适于对小口径射弹的跟踪。

飞机烟雾和雨滴也具有比雷达大得多的激光横截面。对飞机烟雾的距离和速度的测量是风场测绘的一个重要技术。风场测绘在气象学中有一系列的应用，包括风剪探测，风流场测绘，晴空湍流探测，污染监测和云高测量。除了那些基于对化学物质的光谱分析的应用之外，大气探测激光雷达的设计原理和探测“硬目标”的激光雷达相同。光谱化学分析一般采用差分吸收激光雷达(DIAL)技术来实现，本章对此不作讨论。

高的载波频率还可以提高对振动探测的灵敏度。振动探测是以探测反射信号随时间而变的多普勒频移为基础的。正在振动的表面会对这个频移进行调制。调制程度正比于载波频率，因此，一般激光雷达探测振动的灵敏度要比普通的毫米波雷达高 2~3 个数量级。

高的载波频率可使激光雷达封装在一个相对小的体积内。较小的体积使激光雷达可在对空间与质量有严格要求的飞机和其他场合使用。

与无线电雷达和毫米波雷达相比，激光雷达主要的缺点是穿透大气的能力不够。大气对激光的吸收和散射要比对微波或毫米波大得多。因此，激光雷达的性能对天气很敏感，但激光雷达比被动光学系统的天候能力要好，因为激光雷达可以通过距离和 / 或速度的选通来拒绝接收已经被确定为杂乱波的信号。

1.2 激光雷达测距方程

激光雷达分析中的一个基本问题是确定到达接收机孔径的光强总通量，进而确定入射到探测器光敏元件上总的光功率。激光雷达测距方程通常用来确定激光雷达在特定条件下对某个特殊目标的接收功率。

1.2.1 测距方程的一般形式

激光雷达测距方程的一般形式为:

$$P_r = \frac{4KP_s T_{A1} \eta_t}{\pi \varphi^2 r_1^2} \Gamma \frac{T_{A2}}{4\pi r_2^2} \frac{\pi D^2 \eta_r}{4} \quad (1.1)$$

式中 P_r ——接收的信号功率(W);

P_s ——光源的激光功率(W);

K ——光束截面函数;

T_{A1} ——从光源到目标的大气传输系数;

η_t ——发射机的光学效率;

φ ——束宽(rad);

r_1 ——从发射机到目标的距离(m);

Γ ——目标的激光横截面积(m²);

T_{A2} ——从目标到探测器的大气传输系数;

r_2 ——从目标到探测器的距离(m);

D ——接收孔径(m);

η_r ——接收机光学效率。

公式(1.1)用四项乘积形式计算了激光雷达的接收功率。这些项分别与物理光学过程的各个环节相联系: (1)光到目标的传输, (2)目标对光的反射, (3)散射光到探测器的传输, (4)接收机对散射光的收集。

公式(1.1)第一项表示入射到目标上的光功率密度(Wm⁻²)。光束截面函数 K 是考虑到光束的光强密度分布图和目标在光束中位置而引入的归一化函数, 将在 1.3 节中详细讨论。公式(1.1)中的第二项是目标的激光雷达横截面(LRCS), LRCS 具有面积的单位, 用来描述目标的视在尺寸, 将在 1.5 节中详细讨论。第一项和第二项的乘积表示目标在接收器方向所散射光的总功率。

第三项是球面积的倒数(被大气进一步衰减), 半径是目标到探测器的距离。前三项的乘积是接收孔径处反射光的功率。第四项是接收机的收集孔径面积与光学效率的乘积。四项的总乘积是被激光雷达接收机接收和收集的总的光功率。

公式(1.1)适用于目标在发射机远场及接收机远距离目标的情况, 对收发合置和收发分置系统都适用。此时, 目标要按点源建模, 也就是目标的角度范围与发射机束宽和探测器瞬时视场相比非常小。但若用合适的激光雷达横截面积 Γ 代换, 此式也可以用于扩展目标。因为激光雷达和微波雷达遵循同样的物理规律, 因此, 微波系统的测距公式同样适用。微波雷达的测距公式为:

$$P_r = P_s \eta_t \frac{G_t T_{A1}}{4\pi r_1^2} \Gamma \frac{T_{A2}}{4\pi r_2^2} \frac{\pi D^2 \eta_r}{4} \quad (1.2)$$

式中 G_t ——发射机天线增益, $G_t = 16K / \varphi^2$ 。其他各项的定义如前所述。

公式(1.2)利用天线增益的概念描述发射波。天线增益即是光束轴向光强与各向同性发射相同功率时的光强之比。这个概念在电子工程中很普通, 但在物理学中一般不用。公式(1.2)中除了没有明确考虑瞄准误差影响以外[公式(1.1)则考虑了光束形状函数], 公式(1.1)

和(1.2)完全等同,但是,和激光雷达非常窄的光束有关。小的瞄准误差对激光雷达系统性能的影响却很大。同样的瞄准误差在微波系统没有明显的影响,因为微波系统的波束非常大。如果用公式(1.2)来计算激光雷达的接收功率,则还应该考虑瞄准误差的损耗。

1.2.2 测距方程的特殊形式

对静止(或缓慢移动)的收发合置系统, $r_1=r_2=r$ 。对小的相对速度,即多普勒频移可以忽略的情况,对在外大气层工作或以粒子为主的大气衰减情况,有 $T_{A1}=T_{A2}=T_A$ 。在这些情况下,公式(1.1)可以简化,将各项合并重新安排可得:^{*}

$$P_r = \frac{KP_s T_A^2 \Gamma D^2 \eta_t \eta_r}{4\pi\phi^2 r^4} \quad (1.3)$$

式中各项前边都已经作过定义,这个结果很重要,可以用于许多系统中。此公式说明了收发合置激光雷达测量不能分辨目标时,接收功率与目标距离的四次方成反比。当物体扩展角小于激光雷达束宽或小于接收机光敏探测元件瞬时视场角(IFOV)时,该物体被称作不可分辨目标。不可分辨目标有时是指点目标。

当目标扩展角大于发射机束宽时(方位角和仰角),目标被照明区的激光截面正比于被照明区面积,即 Γ 正比于 ϕ^2 和 r^2 (参看 1.5 节),这时光束截面系数可用均匀光强分布函数近似(即在照明区域为常数)。对朗伯目标,公式(1.1)可以进一步简化为:

$$P_r = \frac{P_s T_A^2 \rho D^2 \eta_t \eta_r}{4r^2} \quad (1.4)$$

式中 ρ ——目标总的半球反射率,其他各项如前所述。

公式(1.4)说明接收功率与到扩展目标或大目标的距离平方成反比,这种现象在传统雷达系统中很少遇到。

经常需要确定在接收特定功率(常是最小的可探测功率)时的最大作用距离,而不是要确定特定距离时的接收光功率。距离公式的非线性使得对距离作代数求逆是不可能的(除了在某些特殊的情况下)。一般,最大作用距离很容易通过牛顿法或其他合适的数值方法迭代而求得。然而,在大气损耗可以忽略的收发合置系统中,对公式(1.1)求逆可以得到:

$$r = \left(\frac{KP_s \Gamma D^2 \eta_t \eta_r}{4\pi\phi^2 P_r} \right)^{1/4} \quad (1.5)$$

式中各项定义同前。

1.2.3 例题

问题 1.1: 求一个收发合置系统对一个扩展目标的接收功率。激光雷达功率是 5W, 目标距离 1km, 目标总的半球反射率为 4%, 发射机光学效率为 80%。接收机孔径是 50mm, 效率为 65%, 1km 处的大气传输损耗为 50%。

解 1.1: 激光雷达对扩展目标的接收功率由公式(1.4)给出:

^{*} 原文公式中分母为 16