

电磁波测距原理

刘 闯

测绘出版社

电磁波测距原理

刘 阎

测绘出版社

内 容 提 要

本书主要论述激光测距、微波测距以及光雷达等测距系统，并介绍了测距中应用的低频电路、微波技术、微波电子学、电波传播等方面的有关知识。全书共十章，分为基础和仪器两部分。

本书侧重理论分析，对方案设计、载波选择、测尺频率选择、误差分析等关键问题进行了深刻阐述。

本书可供仪器研制工作者、测绘工作者以及有关院校师生参考。

电 磁 波 测 距 原 理

刘 闯

*

测绘出版社出版

北京师范学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张 $25\frac{1}{8}$ ·字数627千字

1983年7月第一版·1985年7月第二次印刷

印数4,001—6,100册·定价5.10元

统一书号：15039·新245

前 言

电磁波测距是五十年代开始应用的。从那时以来，它已经经历了电子管、晶体管、激光技术、集成电路、多功能综合体制等五个阶段。目前，它正沿着几个方向发展：以轻便、高效率、多功能为特点的综合测量系统；能克服气象误差的多载波测距；高精度的脉冲激光测距；超高频调制的短程测距；毫米波和亚毫米波测距等。

我国的电磁波测距研制工作开始于1957年。二十多年来，虽然受到林彪、“四人帮”的严重破坏，但是，在党的正确路线指引下，通过广大科研生产工作者的努力，现在已能生产大、中、小各型仪器。电磁波测距作为一门新技术，正在实现四个现代化的进程中起着它应有的作用。作者也希望本书能为测距仪研制工作贡献一分力量。

本书内容，大部分来自文献。有少部分是作者的工作，例如：§3.5 延迟线 和 §8.1 微波测距相位关系及某些原理的说明，是作者1959年所做的工作；§7.4~7.8、§7.12 以及 §7.9 和 §9.1 的部分内容是作者在1966~1976 参加历次协作时所做过的工作；§2.13 相位跟踪环、3.8 线性检相器、附录1~3 则为近年作者的工作。由于书中已经较详细叙述，所以不再标出作者的原文。

全书可分为基础和仪器两部分。第一到六章为基础部分，其中第二章介绍反馈环、维纳滤波及相干接收，第三章介绍相位测量和频率测量，第四章介绍光速测量及大气改正公式，第五、六章介绍测距载波特性和产生、调制、检测。第七到十章为仪器部分，其中第七章叙述测距系统理论及总体，是全书重点所在，其余三章分别介绍现有测距仪方案及性能。书中某些章节的内容实际上超出单纯测距的范围，其部分原因是近年发展所造成的，例如，综合测量系统中已包括测角和倾斜改正装置，又如动态测距系统中包括了角跟踪。诸如此类的问题，已经不可分割地和测距结合在一起了。另有部分内容，目前在测距中尚未具体应用，但却有其潜力，作为参考，把它们编进来也是必要的。

为了更好地利用本书，有必要介绍一下阅读方法。对于已具备基本电子技术知识的读者，可翻阅一下二、三和六章后，转入系统和仪器的各章。对于不熟悉电子技术的读者，宜先阅第一章，在那里扼要介绍了测距所需的电子技术。如果只想了解仪器，可直接阅读最后三章和有关的附录。对于想了解系统的读者，建议先看绪论（它是系统的一部分），然后看第七章。

本书的写作也经历了一番周折。1966年以前，作者曾经打算系统整理电磁波测距资料，当时已收集了一些，并写了个别章节。十年浩劫期间，因受迫害而中止。直到1977年才又开始。

在本书完成之时，作者深切怀念李华同志，是她倾注了大量心血，帮助抄写整理，使初稿能以较快的速度搞完。老友刘友生、杨本炜、杨稚竹同志等，给作者多种帮助和鼓励，雷昌全同志协助准备了第五章大部分内容，李泽根同志协助写了数码管的内容，赖锡安、林福亨两同志仔细审阅了全书，谨在此向他们和其他协助过作者的同志表示深切的谢意！

电磁波测距发展很快，作者水平有限，书中错误在所难免，恳切希望读者不吝指教。

作 者

1981年4月于北京

目 录

绪 论	1
§1 电磁波测距的历史与现况	1
§2 电磁波测距的一般概念	2
§3 电磁波测距的分类	6
§4 方案的综合	8
§5 能量计算	9
§6 测距精度	10
第一章 无线电技术	12
§1.1 调制原理	12
§1.2 检波与变频	14
§1.3 线性低频放大电路	18
§1.4 射频放大电路	20
§1.5 线性集成电路	21
§1.6 晶体振荡电路	24
§1.7 晶体管高频功放的计算	27
§1.8 特殊电路	30
§1.9 数字电路	32
第二章 无线电理论基础	42
§2.1 频谱分析	42
§2.2 富里叶积分	43
§2.3 富氏变换实例	46
§2.4 拉氏变换	49
§2.5 由象函数求原函数	53
§2.6 传输函数与频率特性	56
§2.7 随动系统	62
§2.8 噪声问题	69
§2.9 匹配滤波理论	76
§2.10 维纳滤波理论	78
§2.11 相关接收	82
§2.12 锁相环原理及其应用	83
§2.13 相位跟踪环	87
第三章 相位、时间和频率的测量	92
§3.1 简单的相位测量方法	93
§3.2 低频段的精密测相方法	94

§3.3	高频段的精密测相方法	100
§3.4	低频移相器	102
§3.5	高频移相器	105
§3.6	微波移相器	109
§3.7	电控移相器	110
§3.8	线性相检器	114
§3.9	频率、周期、时间间隔的测量	116
§3.10	频率稳定度的测量	117
第四章	电磁波及其传播	122
§4.1	电磁波谱	122
§4.2	光在大气中的传播	123
§4.3	微波在低空大气中的传播	126
§4.4	光速测定的典型方法	127
§4.5	光速测定的一些新结果	132
§4.6	大气中电磁波的速度	137
§4.7	微波在大气中传播的一些问题	138
§4.8	超远程激光测距弯曲改正	145
第五章	微波电子学	149
§5.1	射频传输线基本理论及应用	149
§5.2	波导管中的场与波	152
§5.3	矩形和圆形波导的波型	159
§5.4	波导元件	165
§5.5	驻波与匹配技术	171
§5.6	微带传输线	173
§5.7	电真空微波源	177
§5.8	固体微波源	178
§5.9	微波接收部件及微波集成电路	181
§5.10	天线	182
第六章	光波电子学	193
§6.1	电磁波与物质的相互作用	193
§6.2	激光器谐振腔与振荡条件	195
§6.3	固体激光器	197
§6.4	气体激光器	199
§6.5	P-N结光源	201
§6.6	稳频技术	202
§6.7	光波调制技术	206
§6.8	光电接收器件和技术	222
第七章	测距系统的考虑	234
§7.1	载波选择	234

§7.2	精度、信噪比与测程	235
§7.3	调制方式与测相方案	236
§7.4	变频式测距中的调制频率	236
§7.5	直接十进制调制频率	238
§7.6	互不可约的调制频率	239
§7.7	差频十进制调制频率	242
§7.8	测相误差与粗差的关系	244
§7.9	差频测相方案的考虑	247
§7.10	本振频率产生	253
§7.11	逻辑设计	254
§7.12	窜扰与循环误差	262
§7.13	测距误差问题	266
§7.14	相干接收技术的应用问题	271
§7.15	测距光学系统	273
第八章	微波测距	278
§8.1	MRA-1 微波测距仪原理	278
§8.2	地面反射和 MRA-1 的变频平均法	284
§8.3	MRA-3 和 DM-20 等测距仪	289
§8.4	CA1000 等小型测距仪	291
§8.5	动态微波测距	291
§8.6	DI60 和 MD60 测距仪	293
§8.7	毫米波测距仪	294
§8.8	关于微波测距的精度	296
§8.9	微波角跟踪系统	298
§8.10	跟踪测距的天线装架方式	301
§8.11	国内外微波测距仪概况	303
第九章	光波测距仪	304
§9.1	相位式气体激光测距仪	304
§9.2	相位式砷化镓红外测距仪	313
§9.3	脉冲相位式测距仪	321
§9.4	超高频调制光波测距仪	323
§9.5	多载波测距	327
§9.6	其它测距方法	336
§9.7	多功能综合测量系统	337
第十章	脉冲激光测距与光雷达	349
§10.1	脉冲激光测距	349
§10.2	精密脉冲激光测距	350
§10.3	脉冲激光雷达	354
§10.4	其它类型的激光雷达	359

§10.5 激光雷达在地球物理和地震研究等方面的应用	360
展 望	361
附录 1 关于微波测距信道窜扰所导致的循环误差	363
附录 2 X-Y 装架式天线座及其测量数据的转换	371
附录 3 关于光束振幅、调制不均匀性对相位式激光测距精度的影响	377
附录 4 电磁波测距仪资料统计表	381
附录 5 微带组件产品	390
参考文献	392

绪 论

§1 电磁波测距的历史与现况

认识到光速有限而且是一个常数，这是世界科学史上的一件大事。从伽里略的山头实验到著名的迈克耳孙-莫雷实验和狭义相对论发表，物理学家们花费了近三百年时间才完成了这一认识过程。

光速约为每秒300000公里，这样高的速度要想加以利用也是很不容易的事情。四十年代前后飞行技术的发展改变了战争面貌，迫使人们寻求迅速侦测飞机的手段，这时开始发展利用电磁波反射探测飞机的设备——雷达。与此同时各种脉冲式和相位式导航系统也发展起来。它们又反过来促进了电子测时技术、测相技术、高稳定度频率源等等一系列新领域的深入研究。这些为后来的电磁波测距奠定了基础。

从1946年到1952年，贝格斯川 (Bergstrand) 吸取了新的电子技术，改进了测光速的克尔盒方法，获得了高精度的光速值。在这一实验装置的基础上，后来又作了电路原理技术上的改进，形成了第一代光波精密测距。

五十年代中期开始广泛使用的光波测距仪 NASM-2，曾以惊人的效率和精度直接测边，省去了过去基线测量和其它许多繁复过程。其结构特点是：采用高稳石英振荡电路产生调制波；使用高灵敏度的光电倍增管；采用 90° 平衡测相的相干检测等。这些措施使它具有很高的测相灵敏度。它还使用了可变光路来克服电路漂移。这些情况告诉我们，电磁波测距不是偶然出现的，而是电子技术发展并与光学仪器相结合的一个必然结果。

四十年代，由于雷达的需要，厘米波技术和器件已经成熟。微波应用于精密测距已是可能的，但是，如何防止地面反射造成的多路径效应是个必须解决的严重问题¹⁾。这项误差可以完全淹没其它误差。

1957年，瓦德里 (Wadley) 用载频宽带相位平均法削减地面反射误差，同时在电路中采用了一些特别的方案，从而研制成全电子的微波测距仪。它的特色是效率高、全天候工作，而体积与重量都达到了可以单人携带的程度。

五十年代开始，电子技术和某些有关学科都进到了高速持续发展的时期。主要标志是：晶体管技术、量子电子学、集成电路以及由量子电子学发展出来的激光技术。在短短十几年内这几样重大技术接踵出现，这是人类历史上罕见的。正是在这种形势下，测距技术也发生了突变。

光波测距仪最初重达百公斤，而且只能在夜间作业，但到六十年代末，采用激光和晶体管以后，²⁾ 重仅十几公斤，白天作业，精度也大为提高。与此同时，微波测距仪采用 X 波段甚至毫米波的载波，同晶体管电路相结合，向小型化发展。另一方面，它又向空载设备发展，形成新的测量系统。以半导体激光器和荧光管为光源的小型光波测距仪更是后来居上，产品

1) 多路径效应是指从主台发射到副台接收，电波有两条以上的路径。

之多不胜枚举。

七十年代起,高可靠性的集成电路已经商品化,这使得测距技术获得新的动力,进入了数字化、集成化的新阶段,现在这一过程也接近完成了。由于大规模集成化的应用,仪器正走向更高的阶段。已经出现了具备测距、测角、记录、计算等多功能的测量系统,有人称之为“全站”。

采用超短光脉冲技术,已经使脉冲激光测距获得厘米量级的精度。它首先是应用于卫星、飞船和导弹的测量,使得飞行体定轨和控制精度提高到新的水平。

为了解决地震预报,美国宇航科学家已计划把激光雷达安装在航天机或卫星上,对地震带的大量地面目标(反射镜)进行周期性监测。据估计,这种方法对于大面积地壳形变、断层位移等的观测是最直接有效的,可能成为近期地震预报的重要手段。这样做也是极为经济的,因为地面被测点虽然很多,但只有反射镜,无需人员去照管它们,比在地面设立大量测量台站经济得多,而且情报集中,易于处理。

在光雷达应用方面,要求对空间目标的坐标、速度进行跟踪测量,同时也要求进行数据处理和程序控制。这些要求与某些全能站的要求相似,只是大小的差别而已。因此,预计八十年代将是发展小型化高精度全能系统为中心。光雷达是测控及反导方面的重点,这两者肯定会相互促进。

光雷达和相位式光波测距都面临大气传输的问题。在10.6微米波段寻求快响应器件的工作已有进展,但是仍未摆脱低温工作这一苛刻条件。目前,发展远红外测距设备,仍存在一定困难。因此,除激光器之外,解决新的窗口波长所需要的接收、调制等技术及器件,仍然是重大课题。

多载波测距仪使气象误差压缩到最小限度。双光载波和双光加微波的三载波测距仪,都达到了新的精度,进入 10^{-7} 量级。这类仪器的方案都较复杂,还必须研究实用化问题。现在,频标源的小型化研究已是刻不容缓的重要课题。直接把高稳频标与多载波测距技术相结合,将开创新的精度。五十年代中期的第一代测距仪,精度达到 3×10^{-8} ,六十年代末的激光测距仪达到 1×10^{-8} ,七十年代中期的多载波测距仪达到 2×10^{-7} 。按这一进展的趋势预计,八十年代中期测距精度将有可能优于 4×10^{-8} 。

七十年代在光速测量方面取得了重大进展。这是由于下列的原因促成的。首先就是用二极管的红外混频技术成熟了,这使人们能够把现有微波频标逐步用锁相或比对的办法引渡到红外波段里来。现在的真空光速值 c 的精度已经达到 4×10^{-9} ,比五十年前高170倍。这对于电磁波测距、雷达和导航等都有重大意义。

§2 电磁波测距的一般概念

电磁波测距的结构可概括地用图1来代表。发射系统至少包括载波源,还可能包括调制波产生、放大部件,它必须有一参考波送到接收系统去,作为与反射波比对之用。目标可能是非合作目标如飞机或地物,但也可以是无源或有源的合作目标。在光波测距中常用直角棱镜、猫眼、平面镜;在微波测距中,为了避免地面反射波对接收机的干扰,常用非同频应答方式。本书主要讨论合作目标的方式,漫反射方式只是稍带讨论。

接收测量系统可能是光波段的或微波段的。通常它能放大、解调信号,并比对参考波和反

射波。而在某些个别情况下，它并不具备放大、解调作用，但必需有相位比对作用，这是更为基本的功能。

经过比对以后的结果可能是频率、相位或时间数据，由输出设备读出或经过运算处理再输出。

最简单的测距是经典干涉仪方案。它只有一个发射光源，以人眼和脑为接收系统，精度很高，但只能用于很短的长度测量。近年采用激光光源、光电器件和电子计数的干涉测长仪有新的发展。不过这种不加调制的干涉方法局限性很大。

现代电磁波测距仪一般说来包括以下几方面：载波源、调制系统、光电接收、测量相位（或频率和时间）的系统。这几种功能中，有的可能由一个部件兼任。下面用三种不同的光测距方法来说明测距概念。

1) 脉冲式光测距 图2是这种测距的方案。脉冲发生器的窄脉冲以幅调方式调制在激光上，这一激光脉冲经过目标反射镜反射以后，进入光电器件。在激光脉冲发射时也有一部分进入光电器件（如图中虚线所示），作为参考脉冲。测量参考脉冲和反射脉冲间的时间就可以确定距离。这里由光电器件输出的

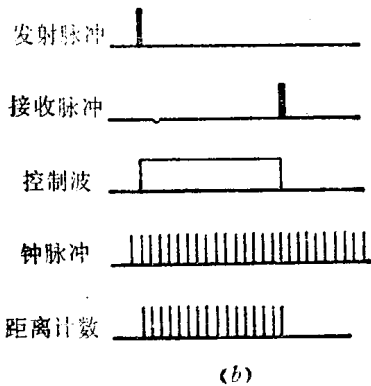
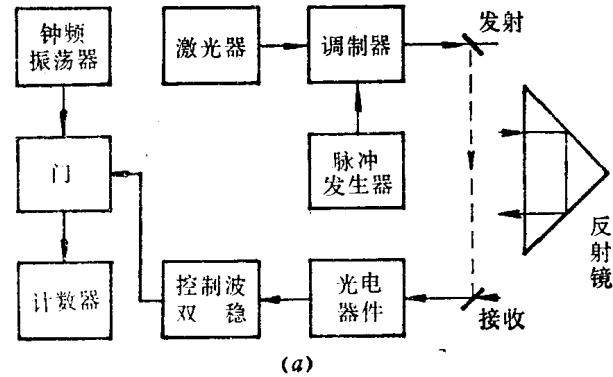


图2 脉冲式光测距
(a)方案 (b)波形

t 可以用模拟测量也可以用数字测量，图中所用是数字的。门控波为正时，门才能接通钟脉冲使之进入计数器，计数的数目就是对距离的读数或与读数成正比。如果正好把钟频选为 $c/2$ 的倍数，就可以直读。现在通用的是直读到米。

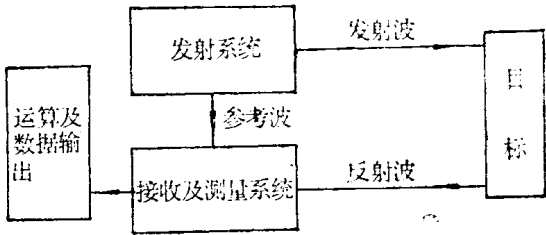


图1 电磁波测距的基本结构

发射脉冲触发控制波的前沿，反射波则触发控制波的后沿。因此如 b 图中所示，控制波的宽度就相当于光在被测距离 D 上的往返时间 t ，所以

$$D = \frac{1}{2}ct \quad (1)$$

式中 c ——光速。

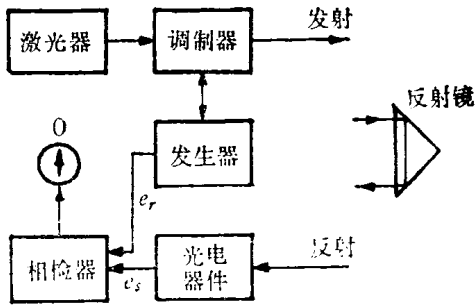


图3 变频相位式测距

2) 变频相位式测距 图3是这种方案。发生器的高频调制于激光, 经反射后, 光信号进入光电器件, 还原为调制波, 但相位滞后为 $(2D/\lambda) \cdot 2\pi$ 。对于发射调制波和反射的调制波可分别表示为

$$\begin{aligned} e_r &= E_r \sin \omega t \\ e_s &= E_s \sin \left(\omega t - \frac{2D}{\lambda} 2\pi \right) \end{aligned} \quad (2)$$

距离信息包含在相位之中, 其中利用相检器来检测相位差。相检器的输出 v_0 与参考 e_r 和信号 e_s 之相位差 θ 有关, 一般可以表示为

$$v_0 = K \cos \theta \quad (3)$$

其中 K 为常数。用 v_0 来测 θ 是可以的, 但误差大, 这里不用它测相而只用作相位平衡指示。当 $v_0=0$ 时

$$\theta = (2N+1) \frac{\pi}{2} \quad N=0, 1, 2 \dots \quad (4)$$

在这些点, 参考与信号相位关系由上式确定, 不随幅度而变。这种平衡点不会在所有频率发生, 把(2)式的相位 $4\pi D/\lambda$ 代入(4)就得到

$$D = (2N+1)c/8f_l \quad (5)$$

这里 f_l 是平衡点的调制频率。但由一个频率得不出 N , 所以需再寻另一个平衡点 f_L (假定它高于 f_l)。 f_L 相当于 N 变为 $N+m$ 的平衡点频率, 即

$$D = (2N+2m+1)c/8f_L \quad (6)$$

m 可以由电表随频率而变的指0次数和最靠近的平衡频率差值来确定 (实际上由(5)式可知平衡频率是等间隔的, $\Delta f = \frac{c}{4D}$, 测一个间隔就可以定 Δf , 它相当于 $m=1$), 故由(5)

和(6)式可解出

$$\left. \begin{aligned} N &= \frac{mf_L}{f_L - f_l} - \frac{1}{2} \\ D &= \frac{m}{f_L - f_l} \cdot \frac{c}{4} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

变频式测距是最早使用的方案。苏联的CBB-1用人眼观测闪光, 它用两只克尔盒调制器, 一只作为高频电光调制器, 另一只则作为相检器用。所以在原理上也属于上述范围。

3) 定频相位式测距 图4为定频相位式测距方案。它在结构上和变频式测距相似, 也是用高频振荡调制光束。但多用光电器件接收反射光信号, 由相检波器检测 e_r 和 e_s 的相位差。当 $\theta \neq 0$ 时变动移相器, 使参考波相移增减, 最后达到平衡 $v_0=0$, 这时(4)式成立。由于参考波经过了相移 ϕ , 故

$$\theta = \frac{4\pi D}{\lambda} - \phi = (2N+1) \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

由此得出

$$D = (2N+1) \frac{\lambda}{8} + \frac{\phi \lambda}{4\pi} = NU + l \quad (9)$$

其中 $U = \lambda/4$, $l = (\lambda/8) + \phi\lambda/4\pi$ 。

由移相器读数可得 l 。求 N 需用多频调制法。每一波长相当于一种单位的尺，其长分别为 $U_1 = \lambda_1/4$, $U_2 = \lambda_2/4 \cdots D$ 可以表示为整数个 U_i 和余长 l_i 之和。以三个调制频率为例 (图 4b)：

$$\left. \begin{aligned} D &= N_1 U_1 + l_1, & l_1 < U_1 \\ D &= N_2 U_2 + l_2, & l_2 < U_2 \\ D &= N_3 U_3 + l_3, & l_3 < U_3 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

以上各式中， l_1 , l_2 和 l_3 是由测距得到的已知值， N_1 , N_2 和 N_3 是待定的。这里先考虑两个调制波 λ_1 和 λ_2 ($\lambda_1 > \lambda_2$)。假定 U_1 和 U_2 存在一个最小公倍距离，用 D_{12} 表示，则

$$D_{12} = N_{12} U_1 = (N_{12} + 1) U_2 \quad (11)$$

由此可解出 D_{12} 值及与 D_{12} 相应的 N_{12}

$$N_1 = N_{12} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}, \quad D_{12} = \frac{U_1 U_2}{U_1 - U_2} \quad (12)$$

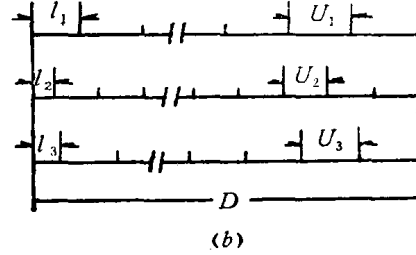
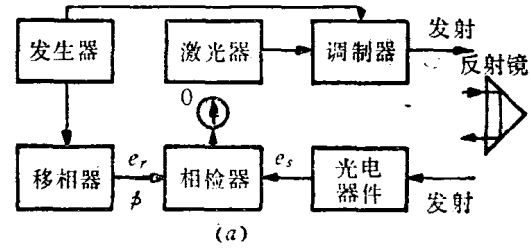


图4 定频相位式测距

(a) 方块图 (b) 用二种调制波测距示意

同样，对于 λ_1 和 λ_3 也假定存在最小公倍距离 D_{13} 和相应的 N_{13} ，

$$N_{13} = \frac{\lambda_3}{\lambda_1 - \lambda_3}, \quad D_{13} = \frac{U_1 U_3}{U_1 - U_3} \quad (13)$$

当距离 $D < D_{12}$ 时， N_1 和 N_2 的关系可表示为

$$N_2 = \begin{cases} N_1 & \text{当 } l_2 > l_1 \\ N_1 + 1 & \text{当 } l_2 < l_1 \end{cases}$$

因此从(10)的前两式可解出

$$N_1 = \begin{cases} \frac{l_2 - l_1}{U_1 - U_2} & \text{当 } l_2 > l_1 \\ \frac{l_2 - l_1 + U_2}{U_1 - U_2} & \text{当 } l_2 < l_1 \end{cases} \quad (14)$$

所以

$$D = \begin{cases} \frac{l_2 - l_1}{U_1 - U_2} U_1 + l_1 & \text{当 } l_2 > l_1 \\ \frac{l_2 - l_1 + U_2}{U_1 - U_2} U_1 + l_1 & \text{当 } l_2 < l_1 \end{cases} \quad (15)$$

如果 $D_{13} > D > D_{12}$ ，而且 D_{13} 是 D_{12} 的倍数，则对于用 (U_1, U_2) 组合进行的测量有

$$D = P D_{12} + N'_1 U_1 + l_1 \quad (16)$$

N'_1 是按(14)式求得的，同样，对于用 (U_1, U_3) 组合进行测量有

$$N_1 = \begin{cases} \frac{l_3 - l_1}{U_1 - U_3} & l_3 > l_1 \\ \frac{l_3 - l_1 + U_3}{U_1 - U_3} & l_3 < l_1 \end{cases}$$

对比(16)和(10)之第一式, $N_1 = N_{12}P + N'_1$ 。初看起来, 要 f_2 似乎多余。实则(17)然, 通常 f_1 和 f_2 较接近, 所以 $(U_1 - U_2)$ 较小, 而 l_1 和 l_2 中含有测相误差, 这使得 N_1 可能算得不准。但是, N'_1 已准确知道, 而 N_{12} 比较大, 用试算法就可以定出 P 和 N_1 。

当 $D > D_{13}$ 时, 可把 D 表示成

$$D = QD_{13} + PD_{12} + N'_1U_1 + l_1 \quad (18)$$

为了定出 D , 要求知道距离的概值, 其误差应小于 D_{13} 。如果希望对概值精度放得很松, 一般说来需要增加频率。

§3 电磁波测距的分类

目前世界上已有的测距仪型号甚多, 不下百种。为了分析研究问题, 下面按载波、调制、接收、测量、反射目标等分类。

(1) 载波分类

- 1) 单载波——可见、红外、微波;
- 2) 双载波——(可见、可见)、(可见、红外)等;
- 3) 三载波——(可见、可见、微波); (可见、红外、微波)等。

载波选择受到以下几个因素的限制: (1)必须是大气窗口波长(如不在大气中用而在海水中用, 当然应考虑海水窗口波长); (2)必须能找到调制办法, 而且调制功率合理; (3)必须有相应的接收器件, 其响应速度能满足要求; (4)有合适波源。这些条件并不一定同时都必需满足, 看所用方案要求而定。例如, 用同一个调制器兼解调器的测距方案, 接收用人眼, 光电器件就可以省去了。

近年来发展的双载波和三载波测距, 对克服气象误差有良好效果。但为了充分发挥其作用, 在选定载波时要考虑如何尽量加大不同波长间的色散作用。

(2) 调制分类, 由于微波和光波相差甚远, 分开为两类:

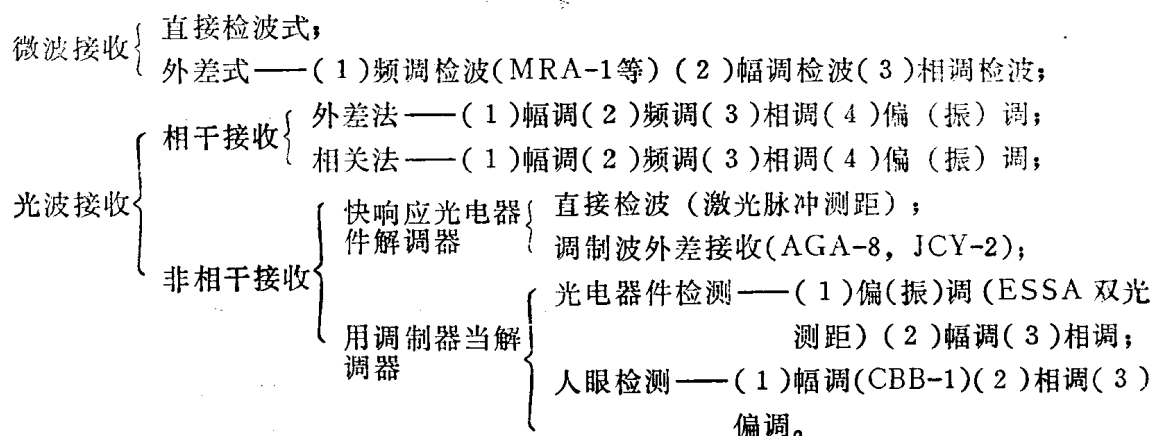
- | | | |
|-------|---|---|
| 微波的调制 | { | 单纯载波 (无调制的微波干涉法); |
| | | 脉冲调制——(1)幅调(2)频调(3)相调; |
| | | 连续波调制——(1)幅调(2)频调(MRA-1等)(3)相调; |
| 光波的调制 | { | 单纯载波 (无调制载波干涉法); |
| | | 脉冲调幅——(1)Q调制 (脉冲测距)(2)锁模 (光雷达)(3)腔倒空; |
| | | 超高频调制——(1)偏(振)调(Mekometer II)(2)幅调(3)频调(4)相调; |
| | | (连续波) |
| | | 微波脉冲调制——(1)偏(振)调(双光测距)(2)幅调(3)频调(4)相调; |
| | | 高频调制——(1)幅调(JCY-2)(2)相调(3)频调(4)偏(振)调; |
| | | 纵模拍频 |

以上除了单纯载波是干涉仪方法之外, 其余在测距中都可考虑使用。微波的调制较简单, 速调管以调频最合适, 体效应管的固体源也以调频为宜。光的调制, 现在多为调幅或调偏振。用微波去调制光, 所需功率较大, 故多用脉冲调制方式。

实现调制的方式是多种多样的。对 GaAs 管最简单的是电源调制, 不需要调制器件。气体激光器最简单的调制是纵模拍频, 连外界调制电源也不用。除了这两种之外, 还有使用调

制器的腔内、腔外调制方式, 这些方式也分为许多种具体调制器。

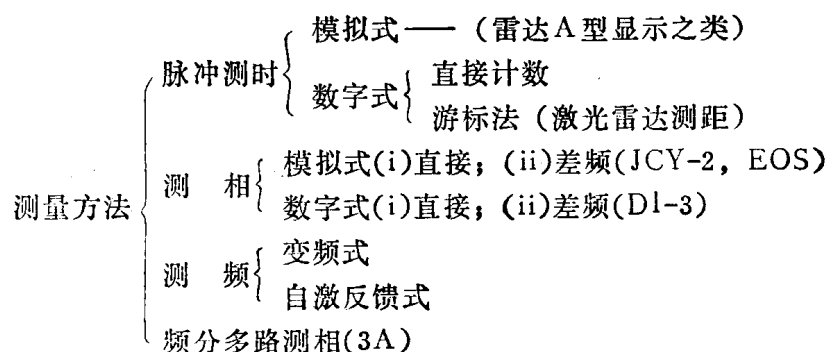
(3) 接收方式分类



微波的接收方式与一般通信技术相似, 不需多述。光波接收现在几乎全为非相干接收。原因是相干接收法尽管理论上可获得高灵敏度, 但在光学系统方面要求严格准直, 这对于移动式仪器很难达到和保持。

在非相干的光波接收中, 用快响应器件直接接收时, 调制频率限于100兆赫以下, 故多用于高频调制的测距。由调制器——光电器件组成的接收解调器也有很大优点, 就是不要求快响应光电器件。当某些载波(如远红外)没有合适的快响应器件时, 可采用这种方式。现在的微波调制光测距也是一直用这种方法。

(4) 测量方法分类



历史上最早出现的方法就是变频方式, 非索齿轮法和贝格斯川仪器的原型都属此类。在某些微波和超高频调制的光测距中, 变频法仍在沿用。变频法的弱点是在不同频率时, 电路的幅度和相位等性能随之而变, 以至在测量结果中引起误差, 而且边长越短要求的变频范围越大, 不易制作稳定的频率源。

五十年代的仪器引入了固定调制频率的测相方案, 它至今仍是较好的方法之一。在集成电路和计算技术发展后, 数字测相兴起。在现有的方案中, 差频接收的数字测相方案, 在稳定性和精度等方面都是较好的, 它也易于和计算机配合, 在小型仪器中已普遍采用。

由于锁模技术的应用, 已经能利用微微秒激光脉冲进行测量, 与此相应, 特殊光电接收器件也达到微微秒响应时间。新的游标技术使脉冲式激光测距达到1~2厘米的精度, 进入高精度行列。

反馈式测频法是别具一格的方案, 它把光的发射、传播和接收当成一个闭合的振荡系

统，通过测定振荡频率来定出距离。频分多路相位测量法是美3A测高仪的方法，测量速度快、适合空用。

(5)反射目标分类

反射目标 { 漫反射目标 (非合作目标)
合作目标——(1)平面反射镜(2)猫眼反射镜(3)角反射镜
有源目标 { 同频载波应答机
非同频载波应答机

脉冲式光测距，用于地形测量、坦克测距以及火炮目标定位，其测量对象不能控制，而且要求迅速测得结果，反射面情况变化甚大。这种情况都属于漫反射方式工作。在精密测距中，显然不能用漫反射目标工作。

在合作目标中，三种反射镜对光波测距都是可用的。平面镜反射效率是较高的，在早期光波测距中曾使用过，但对光困难，在中远程时，稍有不稳就会中断，因此已被淘汰。猫眼系统在反射功能方面比平面镜好，其缺点是光损耗太多，而且体积重量都大大超过直角棱镜系统，现在也已很少使用。直角棱镜可用多块组合成一块，远程时用几盘拼装来增大反射面积。由于直角棱镜在很大角范围内都有使光返回的特性，对光十分简单，获得了最广泛的应用。

原理上讲，平面镜、猫眼反射镜和角反射器，在微波段也同样可用。但由于微波束散度较大、地形地物的乱反射较强，使用无源的反射器极为不利。现代微波测距仪几乎都是用非同频载波应答机(副台)，以克服地面反射和本机的干扰。光波测距也可用有源反射器来扩大测程和提高精度。

§4 方案的综合

原则上可以利用上节的五类“要素”来综合出测距方案。有些较新的方案也可推出来。但是，并不是从四种环节各取其一种方法都能形成新的方案，例如，当调制取幅调时，接收也应取幅调解调器。就是说在某些方面只有某种方式是相容的。

现在把已有的各种主要方案用载波、调制、接收、测量四方面表示如下。

(1)脉冲激光精密测距 激光+锁模+快响应器件+游标法；

(2)相位式激光测距(JCY-2) 激光+高频幅调+快响应器件外差接收+模拟测相；

(3)小型红外测距 红外荧光+高频幅调+快响应器件外差接收+数字测相；

(4)微波调制光测距 激光+微波连续波偏振调制+慢响应器件+模拟测相；

(5)多载波测距 双载波为：双激光+微波脉冲偏振调制+快响应器件+变频测相。三载波时为：双激光+微波偏振调制+快响应器件+变频测相，另加上：微波+(外差接收+有源应答)+模拟差频测相。所以三载波的现有方案相当于在双光波测距之外再加一路特殊的微波测相；

(6)脉冲相位式测距 有两种，一为：脉冲光+高频幅调+快响应器件+模拟测相；一为：脉冲光+谐波外差接收+模拟测相；

(7)空载测高仪 激光+高频幅调+快响应器件+模拟测相；

(8)微波测距 微波+高频频率调制+差频测相+非同频应答，这是通用的方案。和光

波测距相比，微波测距仪型号较少，具体结构差别不大。

§5 能 量 计 算

我们通过脉冲激光测距和相位式激光测距的例子来说明光能计算。

脉冲式激光测距 这是最早使用的激光仪器。先考虑使用合作目标，脉冲激光测距的接收信号公式可以逐步推出（见图5）如下：

设发射的激光功率为 P_t ，发射光学系统透过率为 β_t ，实际发射功率为 $P_t\beta_t$ ，设光束发散角为 θ_t ，在距离 D 处散开的面积为

为 $\frac{\pi D^2 \theta_t^2}{4}$ ，所以信号功率密度为

$$4P_t\beta_t/\pi D^2\theta_t^2$$

设反射镜等效面积为 σ 反射率为 β_r ，大气衰减系数为 α ，反射镜的反射功率为

$$\frac{4P_t\beta_t\sigma\beta_r}{\pi D^2\theta_t^2}e^{-\alpha D}$$

设反射镜发散角为 θ_r ，在接收处散

开面积为 $\pi D^2 \theta_r^2/4$ ，同时又受到一次大气衰减，所以反射回来的光功率密度为

$$\left[\frac{4P_t\beta_t\sigma\beta_r}{\pi D^2\theta_t^2}e^{-\alpha D} \right] \cdot \frac{4}{\pi D^2\theta_r^2}e^{-\alpha D} = \frac{16P_t\beta_t\sigma\beta_r}{\pi^2 D^4\theta_t^2\theta_r^2}e^{-2\alpha D}$$

设接收面积为 A_r ，接收光学系统透过率为 β_r ，则代入以后，得到接收的光功率为

$$P_r = \frac{16P_t\sigma\beta_t\beta_r A_r}{\pi^2 D^4\theta_t^2\theta_r^2}e^{-2\alpha D} \quad (19)$$

这是有反射镜的精密测距适用公式。以上我们假定光束截面大于目标。

以漫反射方式工作时，接收信号可以类似地推导出来

$$P_r = \frac{P_t\sigma_s\beta_t\beta_r A_r}{4\pi D^4\theta_t^2}e^{-2\alpha D} \quad (20)$$

这里 σ_s 是目标的雷达散射截面积。这两个式子除了 σ 和 σ_s 外，其余因子符号皆相同。公式中的计量单位是： P_t 、 P_r 为瓦， A_r 、 σ 和 σ_s 用米²， D 为米， θ_t 和 θ_r 用弧度， β_t 和 β_r 用比例，无因次。

作为测高的设备使用时，目标大于光束，接收功率为

$$P_r = \frac{P_t r A_r \beta_t \beta_r \cos \phi}{\pi D^2} e^{-2\alpha D} \quad (21)$$

其中 r 为表面反射率， ϕ 为表面法线与光传播方向的夹角。

如果我们把最小可测功率 P_{min} 代入到式(19)、(20)、(21)，就可解出在一定功率时的测程；或者解出在测程一定时所需要的功率。很显然的是大气衰减的因子 $e^{-2\alpha D}$ 影响很大，它造成一个不定因素。

相位式激光测距仪 相位式仪器有许多种方案，图6为幅调模拟测相的光测距。假定光

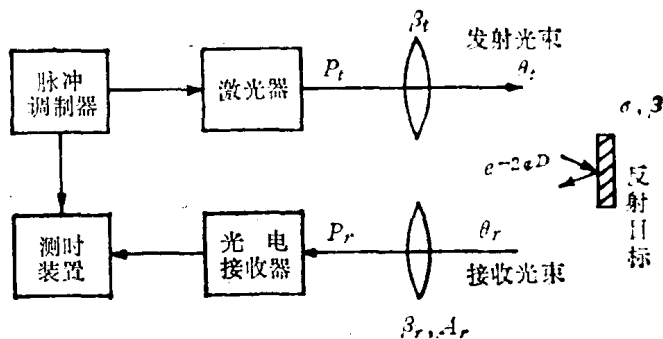


图5 脉冲激光测距光能计算