

高等学校教材

电磁波测距

周泽远 薛令瑜 编

DIANCIBOCEJU

测绘出版社

高等学校教材

电磁波测距

周泽远 薛令瑜 编

测绘出版社

(京)新登字605号

内 容 简 介

本书共六章,主要包括:光电基础知识,电磁波测距基本原理,电磁波测距仪的使用、检验及测距成果的处理、误差分析、精度评定等内容,基本上反映了电磁波测距技术的近代发展,

本书为高等院校测绘专业的教材,同时也可供专业技术人员参考使用。

电 磁 波 测 距

周泽远 薛令瑜 编

•

测绘出版社出版

测绘出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

•

开本 787×1092 1/16·印张 13.5 插页 1·字数 300 千字

1991年10月第一版·1991年10月第一次印刷

印数 0 001—2 500 册·定价 3.70 元

ISBN 7-5030-0446-0/P·155

前 言

本书是应当前高等院校测绘专业进行电磁波测距教学的需要而组织编写的一本通用教材。根据以往的教学实践经验,本教材摒弃了较陈旧的内容,而加强了对新技术、新仪器的介绍。同时,书中避免过多的涉及电工、电子学的理论知识,从而使本书既可作为大学本、专科教学用书,也为广大从事测绘专业的技术人员提供了一本实用性较强的参考书。

本书共分六章,另加两个附录。第一、二章主要讲述一些预备知识;第三、四章阐述电磁波测距的基本原理,并介绍几种有代表性的仪器;第五、六章讲述电磁波测距仪的检验及测距成果的处理、误差分析、精度评定。本书第一、五、六章及附录由周泽远编写,第二、三、四章由薛令瑜编写。同济大学顾孝烈、清华大学杨德骥、中国矿业大学周丙申、中国人民解放军测绘学院张良璐、武汉测绘科技大学刘基余等老师在审阅本书过程中提出了许多宝贵的意见,此外在编写过程中我们参阅了许多兄弟院校的教材和一些同行提供的资料,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点或错误,恳请读者指正。

编 者

1990.4.

2008.7.15

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 电磁波测距的基本概念	(1)
1.2 电磁波测距仪发展概况	(2)
1.3 光波测距仪和微波测距仪的比较	(8)
1.4 电磁波在大气中的传播	(10)
1.5 光速值	(13)
1.6 电磁波测距仪在测绘工程中的应用	(16)
第二章 光电基础知识	(19)
2.1 光速和折射率	(19)
2.2 光的全反射和折射	(21)
2.3 光源和光的调制	(24)
2.4 门电路	(27)
第三章 电磁波测距的基本原理	(41)
3.1 电磁波测距的基本方法及应用	(41)
3.2 相位测量的方法	(51)
3.3 相位量与距离信息间的转换及时序控制	(58)
3.4 多载波测距	(64)
3.5 微波测距的基本原理	(66)
第四章 电磁波测距仪	(71)
4.1 红外测距仪	(71)
4.2 激光测距仪	(96)
4.3 其它几种光电测距仪简介	(102)
4.4 微波测距仪	(112)
4.5 全站式电子速测仪	(115)
第五章 电磁波测距成果的改正计算	(125)
5.1 概述	(125)
5.2 仪器系统误差改正	(125)
5.3 大气改正	(128)
5.4 归算改正	(131)
5.5 其它改正	(140)
第六章 电磁波测距误差分析及精度估计	(143)
6.1 光电测距误差分析	(143)

6.2	光电测距仪的检验	(149)
6.3	周期误差的测定	(150)
6.4	仪器常数和调制频率的测定	(158)
6.5	微波测距的地面反射误差及其削弱方法	(180)
6.6	微波测距仪零点差的测定	(182)
6.7	系统误差检定数据的统计分析	(182)
6.8	电磁波测距的精度估计	(192)
附录 I	供电设备的使用与维护	(199)
附录 II	国内外若干光电测距仪一览表	(203)
参考书目		(209)

第一章 绪论

1.1 电磁波测距的基本概念

电磁场理论早已揭示：光波（如激光，红外光等）和微波同属于电磁波，具有相同的传播速度，约为 $3 \times 10^8 \text{ km/s}$ 。电磁波测距包括光电（光波）测距和微波测距两部分；从目前实用上的广泛性而言，前者优于后者。

所谓电磁波测距，就是用电磁波作为载波进行长度测量的一门技术。其出发公式是：

$$D = \frac{1}{2} V t \quad (1-1)$$

式中 V ——电磁波在大气中的传播速度；

t ——电磁波在被测距离上一次往返传播的时间。

由于 V 可以根据电磁波在真空中的传播速度 c 推求，所以只要能设法测定时间 t ，便可求出待测距离 D 。

根据时间 t 的测定方法不同，电磁波测距法可分为两类：一类是直接测定时间 t ，叫脉冲法；另一类是通过测定测距信号往返于被测距离的滞后相位移 φ 来间接测定时间 t ，叫相位法。

在式 (1-1) 中，如果将 V 视为常数，对 t 进行微分，得

$$dD = \frac{1}{2} V dt \quad (1-2)$$

写成有限增量的形式为

$$\Delta D = \frac{1}{2} V \Delta t \quad (1-3)$$

当要求测距误差 $\Delta D \leq 1 \text{ cm}$ 时，则要求直接测定时间 t 的误差 $\Delta t \leq \frac{2 \times \Delta D}{V} = \frac{2}{3} \times 10^{-10} \text{ s}$ 。目前欲达到上述计时精度是很困难的。所以，高精度距离测量大多不采用脉冲法，而采用相位法。

由于连续的调制信号在被测距离上往返传播而产生的相位移 φ 与所经历的时间 t 之间存在下列关系，即

$$t = \frac{\varphi}{\omega} \quad (1-4)$$

式中， ω 为调制信号的角频率，它与振荡频率 f 之间的关系为

$$\omega = 2\pi f$$

将上述关系式代入式 (1-1)，得

$$D = \frac{V}{2f} \cdot \frac{\varphi}{2\pi} \quad (1-5)$$

将式 (1-5) 对 φ 微分, 得

$$dD = \frac{V}{2f} \cdot \frac{d\varphi}{2\pi} \quad (1-6)$$

按前述的同样要求, 即 $\Delta D \leq 1\text{cm}$ 。另外, 取 $f = 15\text{MHz}$, 则要求测定相位差的误差 $\Delta\varphi \leq \frac{2 \times f \times \Delta D}{V} \times 360^\circ = 0.36^\circ$ 。可见, 欲达到这一测相精度并不困难。因此, 目前国

内外高精度的电磁波测距仪大多采用相位法。

电磁波测距仪按测程区分, 大致可分为以下三类:

(1) 远程 (或称长程) 测距仪。测程为 15km 至数百公里以上, 包括用于测量导弹、人造卫星、月球等空间目标的距离。

(2) 中程测距仪。测程为 $3 \sim 15\text{km}$, 用于控制测量和地震形变测量等。

(3) 短程测距仪。测程在 3km 及 3km 以下, 绝大多数采用红外光源。这类仪器在工程测量中得到了广泛使用。

电磁波测距仪的精度, 可按 1km 测距中误差 (即 $m_D = A + B \cdot D$, 当 $D = 1\text{km}$ 时) 划分为三级:

I 级: $m_D \leq 5\text{mm}$;

II 级: $5\text{mm} < m_D \leq 10\text{mm}$;

III 级: $10\text{mm} < m_D \leq 20\text{mm}$ 。

在 $m_D = A + BD$ 式中,

A ——仪器标称精度中的固定误差, 以 mm 为单位;

B ——仪器标称精度中的比例误差系数, 以 mm/km 为单位;

D ——测距边长度, 以 km 为单位。

1.2 电磁波测距仪发展概况

电磁波测距仪的发展至今已有 40 多年的历史。瑞典大地测量局物理学家贝尔格斯川 (Bergstrand) 采用光电技术从事光速值的测定试验, 终于在 1943 年较精确地测定了光速值。进而与该国的 AGA 仪器公司合作, 于 1948 年初步试制成功了一种利用白炽灯作光源的测距仪, 命名为 Geodimeter (大地测距仪或光电测距仪), 迈开了光电测距的第一步。后来经过不断改进, 该公司就批量生产了型号为 NASM-2A 光电测距仪, 畅销世界各国, 从而促进了各国对光电测距技术的探讨和仪器的研制。在以后的十余年时间内, 研制成功了 20 多种光电测距仪。它们的主要缺点是: 仪器笨重, 耗电量大, 白天测程较短。例如 NASM-2A 型仪器, 本身 (不包括附件) 就重达 94kg , 耗电约 150W , 白天只能测 6km 左右。

1960 年美国入梅曼 (Maiman) 研制成功了世界上第一台红宝石激光器。接着, 第二

年就产生了世界上第一台激光测距装置。十多年来,随着激光技术的迅速发展,激光测距仪的类型也就日益增多,用途更加广泛。1963年瑞士威特(WILD)厂开始采用砷化镓(GaAs)发光二极管试制测距仪,促进仪器逐步小型化。1968年定型产品(DI10)投入生产,以后又不断更新,现在有多种型号产品畅销世界各国。

目前,电磁波测距仪已发展成为一种常规的测量仪器,国内外研制、生产的厂家、公司很多。下面就光波测距仪和微波测距仪的研制、生产情况作一综合介绍。

1.2.1 光波测距仪

1. 国外一些主要厂家研制和生产光波测距仪的概况

(1) 瑞典 AGA 公司 Geodimeter 系列

AGA 公司 1948 年研制成功 Geodimeter 样机;1950~1955 年相继生产 Geodimeter 1, 2, 2A 型;1957~1964 年又相继生产 Geodimeter 3, 4, 4B, 4D, 6, 型。AGA6 型有重大改进,白天测程 3~5km,重 16kg,发射和接收光学系统共轴,有如经纬仪式的轻便结构。以后又沿用这种结构生产出 AGA6A, 6B, 6BL, 600 等型号的测距仪。

1968 年,该公司研制成功中程激光测距仪 AGA8 型,其电路结构,调频分级以及测量装置等的设计基本上与 6A 型一致。为排除杂散光的干扰,在接收光学系统中采用了尖峰滤波器,调制器为 DKDP。近年来,AGA8 型停产,以 AGA600 取代。AGA600 用 1mW 氦氖激光器作光源,测程为 40km,精度为 $\pm(5\text{mm} + 1\text{ppm} \cdot D)$ 。

70 年代初期,AGA 公司首次生产的记录式电子速测仪 AGA700/710 问世。仪器包括电子数字经纬仪,激光测距仪和一只计算机,外貌类似一台经纬仪,另有外部联接的读数与检核装置和纸带穿孔记录器(AGA Geodat700)。该测距仪的发射、接收电子系统均在主机内,水平角及垂直角用增量式扫描系统测量;斜距、水平角及垂直角的观测,平距及高差的计算均通过内部计算机连续进行(AGA 700 不能计算高差)。按气象观测数据,用一只专用计算盘求取改正值,通过开关输入计算机内,可自动进行气象改正,全套仪器重 13kg。

从 1975 年起,该公司开始生产轻便红外测距仪,型号有 AGA12, 12A, 14, 10, 110, 112, 116, 14A 等。

1979 年生产了一种几乎具备全站型优点的 AGA120 系统,它由三个分离和独立的部件组成:Geodimeter 120 主机,Geodat 120(外业数据记录存储器),经纬仪。AGA120 主机重 2.8kg,通过接合器可与大多数普通经纬仪望远镜相结合。主机面板上的显示窗及操作按钮总计有 19 种功能,一目了然。仪器内部有一只高级计算机和一只垂直角自动归算传感器,并与 Geodat 120 记录存储器相连接。

用 AGA 120 系统进行距离测量时,仪器能自动提供斜距、平距、高差、垂直角及重复观测的均值。仪器具有跟踪功能及自动检查仪器操作是否正确的功能。AGA 120 主机中的垂直角传感器为一加速度计,它所提供的垂直角作为由斜距归算至平距或求高差之用。在计算过程中,仪器自动对垂直角进行地球曲率改正及折光改正。

Geodimet 跟踪的测量装置，它与自动数据记录器联接起来，发挥了全部潜力。它的采集外业数据的微处理机，它为记录测量数据、站号、仪器高、规定了程序；其它如日期、温度、气压等亦可适当的编码记录下来。电力为 300~500 个测点，当其满载时可以传输到磁带盒内或与台式计算机（据处理，最后打印出测点的 X、Y、H 三维坐标。

1982 年以来，AGA 公司还生产了电子速测仪，型号有：AGA 140, 122, 136。这类仪器内部装有以红外光束为信息载波的单向通话装置，接收部件为 UNICOM，安装在反射器杆上。另外，增设了闪烁导光（跟踪光）。这种改进给工程测量的定线放样带来了很大方便。

（2）瑞士威特（WILD）厂生产的测距仪系列

瑞士 WILD 厂 1968 年出产了 DI10 红外测距仪。随后又改进成 DI3, DI3s。1978 年又生产一种全站型电子归算速测仪 WILD TC1，全部构件集成于一整机内，测量过程受微处理机的操纵与监控，可自动归算出平距和高差。水平角和垂直角用增量式扫描系统测量。作为记录装置的磁带盒置于仪器顶部，可以存贮 1600 个测点的数据。全部观测数据将在计算中心作进一步处理。

1980 年威特厂曾展出一种 Geomap-System，它包括从 TC1 观测到成图一整套的数据图。Geomap 系统中有台式计算机及图表显示荧光屏，其数据流程系统见图 1-1。

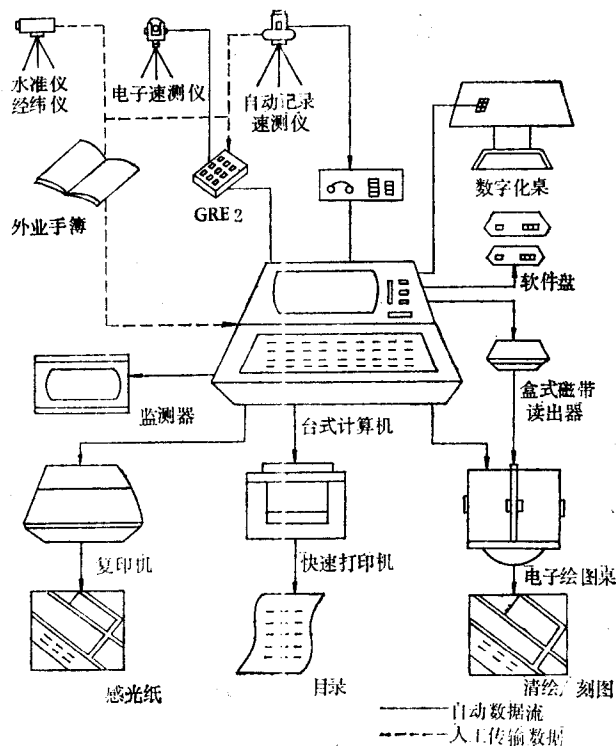


图 1-1 WILD Geomap 数据流程

近年来,该厂又生产出一种模块式全能测量系统。它有以下几个主要部分和后续的数据流程系统,即: Theomat Wild T-2000信息经纬仪; Distomat Wild DI4, DI4L, DI5或 DI20 红外测距仪; Wild GRE3 数据终端; Wild Geomap 系统。

T2000 信息经纬仪由光—电子扫描动态系统进行角度观测。为了消除偏心差的影响而在度盘的对径位置处扫描。当取盘左盘右照准时,水平度盘及垂直度盘取各自的平均值,其中误差均为 $\pm 0.5''$ 。

Wild GRE3 磁泡存储器,体积小,储存量大,是一种较先进的信息存储装置。它与 T2000 连接时,能自动记录;与一般水准仪、经纬仪或其它电子测距仪连用时,亦可用作手工输入。GRE3 与计算机之间的转换可采用 RS 232 或 TTY 接口。GRE3 可将外业测量数据传输至 Wild Geomap 系统以便打印、计算及生产地图。坐标和测设元素亦可由 Geomap 传输至 GRE3,以便外业使用。

(3) 瑞士克恩 (Kern) 厂生产的测距仪系列

Kern 厂早先生产的红外测距仪有 DM1000、DM2000 和 DM500。DM501 为 DM500 的改进型,以后又生产了 DM502/503/504/550 等。1979 年以来, Kern 厂将 DM501、DM502、DM503 与电子经纬仪 E_1 或 E_2 作相应的结合并加上数据存储器,形成新型电子速测仪,如 DM503/ E_1 等。当仪器照准目标后,自动观测的数据如水平方向、垂直角、距离,能直接输入到存储器内,以便日后传递到电子数据绘图仪 (EDP) 中去进行绘图。

DM501/ E_1 、DM503/ E_1 等的记录装置 R48 为电子外业手簿,一切数据可用人工输入。当其与电子经纬仪联接起来后,则实测数据 (如水平方向、垂直角、距离) 可以自动记录。

1980 年 Kern 厂生产出一种与 DM501、DM502、DM503、DM504 连用并与反射镜处于同一地点的远端接收机,它对来自测距仪的信号进行解码,并按数字形式显示数据。当接收机在测距仪的发射光束内时则产生声信号。这些改进措施对测量工作带来了很多方便。

Kern 厂曾与英国 Com-Rad 有限公司合作生产出高精度的短程测距仪 Mekometer ME3000,其特点是:精度高 [$\pm (0.2\text{mm} + (1\sim 2)\text{ppm})$],能自动进行折射率改正。其光源为氙气闪光灯,有效光谱为 $0.485\mu\text{m}$ 。近期产品为 ME5000。ME5000 与 ME3000 比较,后者在技术上又有很大进步,主要技术指标为:标称精度 $\pm (0.2\text{mm} + 0.2\text{ppm})$,标称测程 $20\text{m}\sim 8\text{km}$ 。

该厂的模块式 SICORD 仪器系统的中心装置为电子经纬仪 E_1 或 E_2 。其它还有: DM502、503、504 等测距仪; R48 记录器; DIF41 数据接口; HP-41C/CV, CX 袖珍计算器; DL-40 数据传输器; RD10 远端接收器。这个系统的主要优点在于用户可以自行组合装配,使其最能适应各种独特的测量任务。该系统的作业流程如图 1-2 所示。

DM503、DM504 是该厂的新产品,具有高灵敏度的硅雪崩二极管,在良好的大气条件下,一只棱镜可测 2500m, 7 只棱镜可测 5000m,其精度为 $\pm (3\text{mm} + 2\text{ppm}\cdot D)$ 。

(4) 德国奥普托 (Opton) 公司的测距仪系列

1968 年该公司生产的 SM11 和 Reg Elta14 红外测距仪同为经纬仪式,可纵转的望远

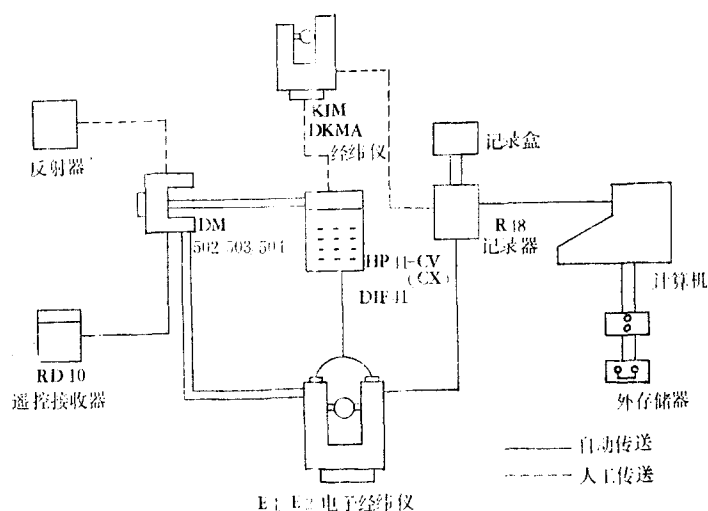


图 1-2 Kern SICORD 系统作业流程

镜按共轴方式组装。SM11 测距自动化，测角仍为光学读数。Reg Elta14 叫做记录式电子速测仪，它与 Eltac 计算机，纸带穿孔器和打印记录装置相连接；测距、测角、记录以及坐标计算均系自动化；另附有 ASG 放样表。

70 年代中期，Opton 公司生产了 Eldi1、Eldi2、Eldi2s、Eldi3 及 SM4 等红外测距仪；前 4 种为共轴式，SM4 是 Eldi2 和光学经纬仪 Th-42 的结合。

随着微电子技术的发展，Opton 公司用了 10 年时间，从 1968 年的 Reg Elta14 发展成为 1978 年的 Elta2 和 Elta4，前者是一种由内部微处理机控制的，能自动归算、记录、存贮及按程序处理数据的仪器，后者是一种自动归算工程速测仪。

1980 年第 64 届德国测量会议在 Wiesbaden 展览的仪器中，首次展出与 Elta2 相联结的新的测量数据处理与绘图系统 GEOS-1 型，它包括 Elta2 观测到绘图的全部数据流程，该系统中有 HP 台式计算机及 DZ-7C 精密绘图桌。

(5) 其它一些国家生产的测距仪

德国蔡司 (Zeiss) 厂于 1977 年生产的经纬仪式速测仪 EOT2000，将秒级光学经纬仪、红外测距仪、微信息处理机及磁带记录盒集成于一整机内，由微信息处理机计算斜距、平距、高差、高程等。

日本测机舍 (SOKKISHA) 近年来生产出一种微型红外测距仪 RED mini，测程可达 500m，精度为 $\pm(5\text{mm} + 5\text{ppm} \cdot D)$ ，重量为 0.9kg，尺寸为 $82 \times 82 \times 17.4\text{mm}$ 。

美国光谱物理公司 (Spectra Physics)，休勒特-派克尔德公司 (Hewlett-Packard)，开易公司 (Keuffel & Esser Comp) 及精密国际有限公司 (Precision International Inc) 等都生产光电测距仪。例如光谱物理公司曾研制 Geodolite3G 高精度仪器 ($1\text{mm} + 1\text{ppm} \cdot D$)，测程可达 70km。开依公司的 Vectron 电子测量系统是一部外业测量和数据收集电子化的全站型系统，即在外业自动记录，存储全部数据并计算坐标 (X、Y、H)。

HP 公司生产的测距仪有 HP3800、3800A、3800B、3810A、3820A、3808A 等。

世界上研制以及成批生产的测距仪的厂家很多，其产品型号也很多，但从测程、精度、功能来看，前面列举的一些产品已足具代表性了。

2. 我国研制测距仪的概况

我国从 50 年代后期就开始研制测距仪，先后生产了很多型号的仪器。具有代表性的有 1974 年武汉地震研究所等单位研制成功的 JCY-2 型精密激光测距仪；1977 年上海研制成功的 DCS-1 型激光测距仪。1982 年武汉地震研究所又研制成功 JCY-3 型数字显示的激光测距仪；1975 年北京测绘仪器厂生产了 HGC-1 型红外短程测距仪，1976 年常州第二电子仪器厂生产了 DCH-1 短程红外测距仪，近年来又批量生产了 DCH-2 型红外测距仪。随着电子技术的发展，更新型的仪器将相继产生。武汉测绘科技大学曾与苏州光学仪器厂合作，研制成功 J2-HC 型红外测距经纬仪；近年来又研制了 HBC-5 型红外测距仪。

1.2.2 微波测距仪

微波测距仪的研制是在 50 年代开始的。1954 年，南非国立电讯研究所的瓦德莱 (T. L. Wadley) 等人根据南非三角测量的建议，开始研究适用于精密长度测量的微波测距仪。1957 年，由南非特劳梅特 (Tellurometer) 仪器公司生产，定型为 MRA1 型，主机重约 14kg。1959 年又生产了 MRA2 型。1962 年生产出 MRA3 型，它能在恶劣的大气条件下达到 50km 的测程，但测距精度较低。为减弱地面反射误差的影响，提高测距精度，1965 年将 MRA 系列作进一步改进，成为 MRA4 型、MRA5 型，测程为 25m~50km，波束宽度为 2° ，使短距离的测距精度已与光波测距仪接近，而长距离的精度仍低于光波测距仪。

除上述南非生产的 MRA 系列微波测距仪外，其它国家也生产了各种类型的微波测距仪。如美国丘比克 (Cubic) 仪器公司的 DM20 型，德国东部的 PEM2 型，瑞士 WILD 公司的 DI50、DI60，日本的 ADM6 型，英国的 CA1000 型等。德国西部、苏联、匈牙利也有类似仪器生产。

我国生产的微波测距仪主要有 WJ1 型和 WJ2 型。

1984 年美国生产出高精度微波测距仪 CMW20 型，精度为 $\pm(5\text{mm} + 3\text{ppm} \cdot D)$ ，测程为 20m~25km，可见，其测距精度已达到与一般光波测距仪相当的程度，把微波测距仪的质量指标提高到了一个新的水平。

电磁波测距仪，特别是短程测距仪已成为常规测量仪器，总的发展趋势是体积更加小型化、功能全能化，操作自动化。预计惯性测量系统和多普勒接收机将可能用来取代短程电磁波测距仪；不过要做到这点，这类系统的体积、重量、操作及携带等方面的问题目前尚难以解决。美国有人建议用短基线卫星干涉测量的方法，采用所谓 MITES 系统来测量长短距离，精度为 $1\text{ppm} \cdot D$ 。该系统包含两个小于 0.1m^3 的地面终端设备，它要求在几分钟时间内同时跟踪全球定位系统 4 颗卫星。这种叫做“微型干涉仪地面测量终端设备”的

仪器,基本上可以取代标准的长、短程电子测距仪,但它难以满足电子速测仪在土地测量、工程测量和地形测量中的需要。

1.3 光波测距仪和微波测距仪的比较

光波测距仪和微波测距仪虽同属电磁波测距仪,但它们在测距方案、测距精度、对外界条件的适应性以及仪器的整体结构等方面是存在差别的。下面作一些比较,从中我们可以看出不同仪器所适用的范围。

1.3.1 测距方案

对于相位式测距仪而言,两者都有合作目标(少数近期出厂的光波测距仪除外),合作目标可分为反射式和应答式。

1. 反射式测距方案

反射式测距方案的基本原理是:

设发射信号(主振)的相位为

$$\omega t \quad \text{①}$$

通过被测距离 D 后,返回信号的相位为

$$\omega t - 2\omega t_D \quad \text{②}$$

仪器本振信号的相位为

$$\omega' t \quad \text{③}$$

经接收光学系统进行混频后,得到带有距离信息的测相信号的相位为

$$\text{②} - \text{③} = \omega t - 2\omega t_D - \omega' t \quad \text{④}$$

测站将主振信号①与本振信号③混频后得到基准(参考)信号的相位为

$$\text{①} - \text{③} = \omega t - \omega' t \quad \text{⑤}$$

通过鉴相器将带有距离信息的测相信号④与基准信号⑤进行比相,从而得出相位差

$$\text{⑤} - \text{④} = 2\omega t_D \quad \text{⑥}$$

这种方案的主要特点是直接返回测距信号。目前光波测距仪大多采用这种测距方案。

2. 应答式测距方案

这种方案目前仅用于微波测距仪。微波测距仪由主台和副台组成。主台发射被测距离信号调制的微波信号,副台接收主台发射的信号经过处理后,又将带有距离信息的测相信号和副台测距信号一起发回主台。主台接收后经过混频、放大,分出两路测相信号:一是带有距离信息的测距信号 FM,另一是基准信号 AM。通过移相—鉴相,即可测出相位差。其基本原理如下:

设主台发射的测距信号相位为

$$\omega t \quad \text{①}'$$

经被测距离 D 后被副台接收, 其相位为

$$\omega t - \omega t_D \quad \text{②}'$$

副台本身也发射角频率为 ω' (设 $\omega' < \omega$) 的测距信号, 相位为

$$\omega' t \quad \text{③}'$$

在副台混频器上, 将主台来的信号②'与本身发射的信号③'混频后, 得到测相信号的相位为

$$\text{②}' - \text{③}' = \omega t - \omega t_D - \omega' t \quad \text{④}'$$

副台将两种信号③'、④'发回主台, 到达主台后的相位分别为

$$\omega' t - \omega' t_D \quad \text{⑤}'$$

$$(\omega - \omega') t - (\omega - \omega') t_D - \omega t_D \quad \text{⑥}'$$

经主台混频器, 将①'与⑤'混频后得到基准信号 AM, 其相位为

$$\text{①}' - \text{⑤}' = \omega t - \omega' t + \omega' t_D \quad \text{⑦}'$$

信号⑥'经主台处理后得到带有距离信息的测距信号 FM, 经鉴相器与⑦'比相, 最后得到相位差为

$$\text{⑦}' - \text{⑥}' = 2\omega t_D \quad \text{⑧}'$$

由此可见, 两种方案所测得的相位差是相同的。副台在测距过程中起着一种特殊反射器 (有源反射器) 的作用, 其主要目的在于防止干扰, 增大测程, 便于野外作业。

3. 两种方案的比较

由比较测程方程式可知, 在相同发射功率的情况下, 前者的测程小于后者。从作业组织考虑, 后者优于前者, 不过随着通讯设备 (如对讲机) 的小型化, 这种差别已不明显了。

1.3.2 测距精度

微波测距仪, 由于发射波束有一定宽度, 地面反射误差较大。光波测距仪, 光束较集中, 间接反射信号的影响较小。因而, 一般而言, 在测距误差中的固定误差部分, 后者优于前者。而比例误差部分, 后者亦优于前者, 这一点可以通过分析两者计算折射率的公式看出。

一般用于计算微波折射率的公式为

$$(n-1)10^6 = \frac{103.49}{273.15+t} (P-e) + \frac{86.26}{273.15+t} \left(1 + \frac{5748}{273.15+t}\right) e$$

$$e = E_{\text{水}} - 0.000662(t-t')(1+0.001146t')P$$

式中

P ——大气压力, 以 mmHg 为单位^[注],

[注] 1 mmHg = 133.32 Pa

t ——干温, 以 $^{\circ}\text{C}$ 为单位;

t' ——湿温, 以 $^{\circ}\text{C}$ 为单位;

E, e ——温度为 t' 时的饱和水汽压, 以 mmHg 为单位。

对于波长为 6328Å 的激光, 其折射率一般用下式计算:

$$(n-1)10^8 = \frac{300.23}{1+\alpha t} \cdot \frac{P}{760} - \frac{5.5 \times 10^{-2}}{1+\alpha t} e$$

式中

α ——空气的膨胀系数;

e ——空气的湿度, 为 mmHg 为单位;

其它符号的意义同上。

在相同的外界条件下, 假定气象因素具有相等的误差, 可以分别估算出气象因素的误差对折射率的影响。

对于微波:

$$\begin{aligned} m_s^2 \times 10^{12} = & \left\{ \frac{103.49}{273.15+t} \right\}^2 m_p^2 + \left\{ -\frac{17.23}{273.15+t} + \frac{495822}{(273.15+t)^2} \right\}^2 m_t^2 \\ & + \left\{ -\frac{103.49}{(273.15+t)^2} P + \frac{17.23}{(273.15+t)^2} e - \frac{991644}{(273.15+t)^2} \right\}^2 m_e^2 \\ m_s = & 0.000662 P \sqrt{2 m_t} \end{aligned}$$

对于激光:

$$\begin{aligned} m_s^2 \times 10^{12} = & \left\{ -\frac{300.23}{(1+\alpha t)^2} \cdot \frac{P}{760} + \frac{5.5 \times 10^{-2}}{(1+\alpha t)^2} e \right\}^2 m_t^2 + \left\{ \frac{300.23}{(1+\alpha t)760} \right\}^2 m_p^2 \\ & + \left\{ -\frac{5.5 \times 10^{-2}}{1+\alpha t} \right\}^2 m_e^2 \end{aligned}$$

在一般大气条件下, 设 $P=760\text{mmHg}$, $e=10\text{mmHg}$, $t=+20^{\circ}\text{C}$; 假定 $m_t = m_e = \pm 1^{\circ}\text{C}$, $m_p = 1\text{mmHg}$ 。则由以上两式求得对于微波测距的影响为 $m_s \approx 4 \cdot 10^{-6} D$; 对于激光测距的影响为 $m_s \approx 1 \cdot 10^{-6} D$ 。

由此可见, 即使用相同的精度测定大气参数, 计算出的折射率的精度差异仍较大。所以目前光波测距的精度一般高于微波测距。

1.4 电磁波在大气中的传播

1.4.1 光波在大气中的传播

电磁波测距是在一定的大气条件下进行的。大气的温度、压力及组成成份对电磁波的衰减和传播速度产生很大的影响。大气的组成成份在不同高度、不同纬度、不同季节的条件下都会有变化。对一般测距而言, 影响大的主要是接近地面数百米高度下的大气层。这层大气的主要成份是氧(O_2)和氮(N_2)。而以氮的成份居多, 但对传播的影响不大。其

组成成份与体积比,如表 1-1 所示。二氧化碳 (CO_2) 约占 0.322%, 甲烷 (CH_4) 约占 0.0015%, 其余更少。其中次要成份常常有些变化,对电磁波的吸收常起主要作用。氮和氧占大气的主体,但它们在红外区没有吸收线。

一氧化氮 (N_2O) 在对流层中的比例较稳定,随时间和空间的变化不大,但在平流层则下降到 0.1×10^{-6} 的体积比。二氧化碳 (CO_2) 的含量,据统计每年大约增大 0.2%,在极区海平面其混合比稍低于其它地区,城市高于乡村。北半球地表的氧 (O_2) 混合比有季节性起伏,约 $(6 \sim 9) \times 10^{-6}$ 。一氧化碳 (CO) 在海平面的混合比约为 0.19×10^{-6} ,它随时间和空间而异,实测值约为 $(0.05 \sim 0.25) \times 10^{-6}$;其含量在市区高于农村,夜间高于白天。甲烷在海平面上的混合比相当稳定,在大多数对流层中也相当稳定。在对流层以上 50km 处甲烷混合比下降到 0.25×10^{-6} 。水汽 (H_2O) 是对光波和微波传播影响很大的分子,它随高度、纬度、季节温度而有很大差异。水汽含量与高度 H 之间的关系为

大气的组合成份 表 1-1

成 份	体积比 ($\times 10^{-6}$)
CO_2	322
N_2O	0.27
CO	0.19
CH_4	1.5
N_2	7.8×10^5
O_2	2.1×10^5
H_2O	不定

$$C_H = C_0 10^{-H/\beta} \quad (1-7)$$

在下层大气中 $\beta = 5000$, C_H 为 H 高度的水汽含量,高度单位为米; C_0 为接近地面的水汽含量。

大气中还有一些悬浮的粒状物质、烟、尘雾、雨和一些有机物,如花粉、细菌、微生物等,它们使大气混浊,形成所谓“气溶胶”。

上面是有关大气组合成分的论述。下面分析大气对光的衰减。

设光的传播是沿 x 方向通过一个微观的薄层 dx , 输入功率为 $P(x)$ 。设传播介质的损耗是线性的,即与 $P(x)$ 成正比例,同时它又正比于 dx ,因而通过此薄层的损耗为

$$dP = -\alpha \cdot P \cdot dx$$

这里 α 为衰减系数。由此得到在距离波源 R 处的功率为

$$P = P_0 \cdot e^{-\alpha R} \quad (1-8)$$

式中 P_0 为波源的功率; P 为 R 处的功率。

α 是波长 λ 、距离 R 以及高度 H 等的函数,是几个影响因素的和,即

$$\alpha = \alpha_{m.} + \alpha_{m.} + \alpha_p \quad (1-9)$$

式中 $\alpha_{m.}$ 为分子散射系数; $\alpha_{m.}$ 为分子吸收系数; α_p 为粒子散射系数。

大气成份的衰减作用各自不同。气体分子吸收是具有高选择性的共振吸收,它不会对所有波长起作用,因而形成了低衰减的电磁波“窗口”,但对于分子散射和粒子散射而言,它是非共振的,因而使得很宽波段的波都受到衰减。

由于大气成份随高度有很大变化,所以大气透射率与光线的天顶距有关。正对天顶衰减较小,而水平传播时则较大。可以粗略地把大气沿垂直方向分成许多层,在同一平面内,成份是近似相同的。一条天顶距为 θ 的光线,其路程上所经历的空气质量显然是 0° 天