

986/29

43114

电磁波测距论文集

储
刘
刘

钟

瑞
闾
荣

主 编



测绘出版社

统一书号：

15039 · 新 243

定 价：2.35 元

电磁波测距论文集

储钟瑞 刘囿 刘荣 主编

测绘出版社

电磁波测距论文集

储钟瑞 刘闾 刘荣 主编

测绘出版社出版

测绘出版社印刷厂印刷

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 15¹/₄·字数 352 千字

1983 年 3 月第一版·1983 年 3 月第一次印刷

印数 1—1,900 册·定价 2.35 元

统一书号: 15039·新 243

前 言

出版本论文集的目的是为了总结、交流和推广我国在电磁波测距的科研、试制和作业等方面的初步成果，以利于促进我国电磁波测距工作的发展。本论文集共收入微波测距技术、光波测距技术和测角测边网平差等各方面的文章共 23 篇。

论文集开始征稿以后，得到了有关单位的关心和支持，踊跃投稿，特向来稿单位和个人表示谢意。由于篇幅所限，来稿未能全部收入。

因涉及到一些我国自己的初步科研成果和新的技术，故本书定为限国内发行。

本文集由储钟瑞、刘闾、刘荣三同志主编并负责技术审定工作，由于水平有限，经验不足，错误之处，在所难免，请批评指正。

编 者

1981.4

目 录

电磁波测距技术现状及其发展趋势·····	刘 圆 赖锡安 (1)
多载波测距仪浅介·····	李学正 (17)
BJCY-I 型半导体激光测距仪设计方案及精度分析·····	赵松达 (30)
DWY-II 型全固体化微波测距仪·····	朱家洪 (39)
BJCY-I 型半导体激光测距仪光学系统设计·····	张乾元 (50)
测距仪中半导体发光二极管的高频调制光相位不均匀效应 ·····	郭长志 汪凯戈 钮金真 (65)
三厘米波段体效应振荡源的设计·····	刘定堂 (87)
微波测距仪晶体振荡器直流切换与导频·····	黄书基 杨文霞 (96)
电磁波测距精度·····	刘 荣 赵维忠 (101)
微波测距仪测相系统误差分析·····	吴晶梅 徐基谦 (108)
电磁波测距仪中晶振频率长期稳定性问题·····	吴国良 (120)
多信号调频组合频率串扰对微波测距仪测量误差影响的讨论·····	黄书基 吴功宜 (127)
调制器相位不均匀误差的计算方法·····	黄瑞光 (138)
相位式光波测距仪信号机内传递误差·····	黄瑞光 (140)
微波测距仪接收机中的相位延迟·····	吴晶梅 徐基谦 (148)
EOK 2000 光电测距仪的周期误差分析·····	郑汉球 (155)
微波测距仪零点差及其测定方法的讨论·····	张良琚 (171)
短程测距仪检验中的几个问题·····	虞润身 侯国富 徐广如 (186)
微波测距的系统误差改正·····	刘 荣 赵维忠 (201)
考虑起始数据的测边网平差问题·····	陶本藻 汤绍熙 (209)
边、角权的确定及平差结果的改进·····	赵维忠 (217)
边角同测锁网中的边、角精度匹配问题·····	赵维忠 (224)
边角网方差估计与假设检验·····	陶本藻 (232)

电磁波测距技术现状及其发展趋势

刘 阔 赖锡安

五十年代以来,科学发展的速度超过以往任何时代,其中电子技术和计算技术占有主导地位。晶体管出现于四十年代末期,在五年左右的时间里,它就取代了电子管的许多应用。六十年代集成电路的发展,使电子技术以更高的速度向各个科技领域渗透。建立在电子技术基础上的电子计算技术,从庞大的设备发展成为今天的微型计算机。电磁波测距正是在这样的条件下发展的。

第一代光波测距仪,精度只有 $\pm(2\text{cm} \pm 3 \cdot 10^{-6}D)$,而人们就惊讶不止,但存有重量达百公斤、夜间工作以及受天气影响太大等弱点,使它实际的用途受到很大限制。现在,激光测距仪白天测程达 60 公里、精度为 $\pm(5\text{mm} + 1 \cdot 10^{-6}D)$,重量才 20 公斤左右。最小的短程光波测距仪重量才 1.6 公斤。

微波测距方面,由于精度低于光波测距,发展不如后者,但也已取得了很大进展。

下面我们分几方面评述测距及其有关领域近年来的发展情况,最后探讨今后测距研究的方向问题。

一、电磁波测距仪发展情况

二十年来已经出现了很多新技术,对测距有决定意义的是以下几项:(1)激光技术;(2)晶体管和集成电路技术;(3)电子计算机技术;(4)固体微波技术。它们促进了测距技术的发展。其发展主要表现在以下四个方面。

1. 多功能综合测量系统

采用集成电路部件以后,电子系统的可靠性高了,小型化也很容易实现,人们很早就想把边角测量结合起来,起初是设法把测距仪架在经纬仪上,但是二者不相容之处也很多。这使得人们把希望寄托在小型化上面,以设计出最理想的仪器。

近几年来,已经出现了应用小型电子计算机的综合测量系统,其中包括测距分系统和以编码测角及自动倾斜改正为主的电子经纬仪分系统。除此之外,还包括运算、存储、输出、记录等计算机运控分系统。仅在短短的几年内,就已有 HP3820A、ADM-70、Vec-tron、AGA710、TC1 等多种型号的产品出现。

以 HP3820A 为例^[1],测距精度为 $\pm(5\text{mm} + 5 \cdot 10^{-6}D)$,测角精度相当于 J2 级经纬仪,分辨率为 1 秒,在 $\pm 150''$ 以内时,仪器能自动进行水平角和天顶角补偿。可以向外部设备输出数据。其基本结构如图 1 所示。为了性能稳定,仪器采用了自动光强稳定、参考光与外光强自动匹配等系统。

2. 多载波测距^{[2][3][4][5]}

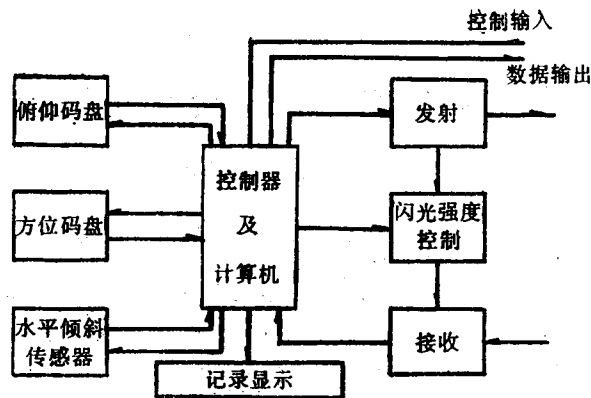


图 1

测线上每一点的气象数据通常难以测量，因此，惯例是以前两端的气象数据平均值作为全线平均值。实际上，全线平均值与测线所经过的地区、时间、地面、地形等情况有关系。利用多载波测距，从大气的色散关系可求出全线的平均折射率，这样就可以不必实际测量全线气象数据而获得距离的改正值。

电磁波测距的这一重要发展的理论根据是从大气折射率的公式分析而来。Oweus 导出了电磁波群折射率的公式

$$n_g - 1 = N = \alpha \rho_s + \beta \rho_w \quad (1)$$

其中 ρ_s —— 干空气密度

$$\rho_s = \frac{P_s}{T} \left[1 + P_s \left(57.90 \times 10^{-8} - \frac{9.325 \times 10^{-4}}{T} + \frac{0.25844}{T^2} \right) \right]$$

ρ_w —— 水蒸气密度

$$\rho_w = \frac{P_w}{T} \left\{ 1 + P_w \left[1 + (3.7 \times 10^{-4}) P_w \right] \left(-2.37321 \times 10^{-3} + \frac{2.23366}{T} - \frac{710.792}{T^2} + \frac{7.75141 \times 10^4}{T^3} \right) \right\}$$

$$\alpha = 10^{-8} \left[2371.34 + 683939.7 \frac{(130 + \sigma^2)}{(130 - \sigma^2)^2} + 4547.3 \frac{(38.9 + \sigma^2)}{(38.9 - \sigma^2)^2} \right]$$

$$\beta = 10^{-8} [6487.31 + 174.174 \sigma^2 - 3.55750 \sigma^4 + 0.61957 \sigma^6]$$

$\sigma = 1/\lambda_0$ 即真空波数 (μ^{-1})

P_s —— 含 0.03% CO_2 的干空气的分压力 (mbar)

P_w —— 水蒸气分压 (mbar)

T —— 绝对温度 °K

当使用三个载波测距时，命三个对应距离为 R_1 、 R_2 、 R_3 ，距离 D 与这些距离测值的关系是

$$D = R_1 - DN_1 = R_2 - DN_2 = R_3 - DN_3 \quad (2)$$

可以解出 ρ_s 和 ρ_w ，代入距离方程得出下列公式

$$D = R_1 - \left[\frac{(a_1\beta_3 - a_3\beta_1)\Delta R_{21} + (a_2\beta_1 - a_1\beta_2)\Delta R_{31}}{(a_2 - a_1)(\beta_3 - \beta_1) - (a_3 - a_1)(\beta_2 - \beta_1)} \right] \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta R_{21} &= R_2 - R_1 \\ \Delta R_{31} &= R_3 - R_1 \end{aligned} \quad (4)$$

通常在三个载波中，两个是可见光(或红外)，一个是微波。 a_1 、 a_2 、 a_3 、 β_1 和 β_2 只决定于波长，对于一定仪器都是常数。水蒸气对微波影响较大，水分子是极性分子，所以 β_3 为温度的函数。把对温度的关系当成线性的，则 D 可表示为

$$D = R_1 - A(1 + A'T_c)\Delta R_{21} - B(1 + B'T_c)\Delta R_{31} \quad (5)$$

当采用 6328Å - 4416Å 和 3cm 微波为载波时，有以下之值

$$A = 20.9288$$

$$A' = -2.9184 \times 10^{-6}$$

$$B = -0.0198733$$

$$B' = 3.6243 \times 10^{-3}$$

$$T_c \text{——大气温度 } (^{\circ}\text{C})$$

美国华盛顿大学应用物理研究室的 Huggett 和 Slatter^[5]，研制了用上述三种载波的测距仪。光的调制是用 3 GHz 进行偏振调制，用计算机控制变频测相，并计算距离中数(每 10 秒进行一次)和观测中误差。仪器的短期精度达到 4×10^{-8} ，长期精度为 1.3×10^{-7} 。在加利福尼亚州霍利斯特(Hollister)监测断层蠕变的实验表明，仪器具有长期稳定性，但比较复杂，适合于固定台站使用。

改进型的三载波测距仪最近已有商品出售，称为双色 Terrameter LDM2，量程为 20km，精度为 0.1mm 或 1×10^{-7} (取二者中严格的一种)。仪器的光学头和电子部件都已大大减轻，可用于野外作业。

双光载波测距仪，相对于三载波仪器较易制作。双光载波测距，忽去水蒸气对光波的折射影响。划去式(1)中含 ρ_w 的项，可解得

$$\rho_s = \frac{\Delta R_{12}}{(a_1 - a_2)D}$$

因此，距离可表示成

$$D = R_1 - \frac{a_1 \Delta R_{12}}{a_1 - a_2} \quad (6)$$

虽然双光载波测距对气象因素的消除不如三载波那样彻底，但是它在结构上是可取的。

Georan I^{[3][4]}是近年发表的双载波测距仪中重量和体积较小的一个，在结构上还有一些特点，如采用光延迟线、相位跟踪环、双色激光器(同时产生 $0.458\mu\text{m}$ 和 $0.514\mu\text{m}$ 的光)等，精度达到 2×10^{-7} 。

3. 脉冲式光波测距

七十年代发展了新的光脉冲测距方法，精度达到 1cm。这一高精度主要是由两个方面的原因造成的：首先是找到了产生微微秒脉冲的简便方法——锁模技术；其次是找到了测

量光脉冲微微秒量级时间间隔的具体办法。

锁模技术的本质就是，在腔内插入相位同步元件，使各种模式的相位锁定，因而其光振幅能够相加。

设 T 是光波在腔内往返所需时间，传播速度为 c ，腔模的频率间隔为

$$\Delta\nu = c/2L \quad (7)$$

其中 L —— 腔长。因此腔内振荡波可以表示成

$$E(x, t) = \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} A_n \exp i \left\{ 2\pi\nu_n \left(\frac{x}{c} - t \right) + \phi_n \right\} \quad (8)$$

式中 N —— 模的总数

ν_n —— 第 n 个模的频率

ϕ_n —— 第 n 个模的相位

A_n —— 第 n 个模的复系数

上式可以化为

$$E(x, t) = e^{i 2\pi\nu_0 \left(\frac{x}{c} - t \right)} \left[\sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} A_n \exp i \left\{ 2\pi n \Delta\nu \left(\frac{x}{c} - t \right) + i \phi_n \right\} \right] \quad (9)$$

当自由振荡时， ϕ_n 各自独立取值，由于各模间的相互干涉而随机起伏。当锁模工作时， ϕ_n 之间有一定关系，假定全部 ϕ_n 锁在 $t = 0$ 和 $x = 0$ 的相位上，则

$$\phi_n = 0$$

由于这些分量频率相近，故 $A_n = A_0$ ，因此，由上式在 $x = 0$ 处就有

$$E(0, t) = A_0 \frac{\sin N\pi\Delta\nu t}{\sin\pi\Delta\nu t} e^{i 2\pi\nu_0 t} \quad (10)$$

对应的功率为

$$P(t) = A_0^2 \frac{\sin^2(N\pi\Delta\nu t)}{\sin^2(\pi\Delta\nu t)} \quad (11)$$

$P(t)$ 为脉冲序列，重复周期为

$$T = \frac{1}{\Delta\nu} = \frac{2L}{c} \quad (12)$$

其峰功率为下列极限

$$\lim_{t \rightarrow kT} P(t) = A_0^2 N^2 \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (13)$$

这说明功率比例于 N^2 。

脉冲宽度 τ 由 (11) 式可得

$$\tau = 1/N\Delta\nu \quad (14)$$

而 N 约为线宽 B 与腔频间隔之比 $N \approx B/\Delta\nu$ ，因此

$$\tau = 1/B \quad (15)$$

这表明，各种物质的激光脉冲有其特征宽度。

锁模可用两种方法，一种是损耗调制(图 2a)，在腔内加了超声调制器，损耗随时间

作 $\sin \omega t$ 形式的变化, 当光往返通过它时, 恰好都在损耗为 0 的时刻; 光的衰减很小, 则该模式可建立, 不满足此条件之模则受损失不能起振。另一种是调相锁模(图 2 b), 在调制电压不为 0 时, 腔的频率变了, 故只有在电压为 0 时通过调制晶体之模能建立, 其调制周期为 $T = 2L/c$, 或调制频率 $F = c/2L$ 。

除了产生超短脉冲之外, 接收和测量超短脉冲也是很困难的问题。

在 Golden 等人已发表的文章所谈的仪器中^[6], 测量系统分为两部分, 一为概值距离测量接收机, 另一为游标距离测量接收机。收发时间间隔, 可用游标周期的整数倍和一个分数周期来表示。整数直接由概值距离接收机测得。要求它的精度高于 $\pm 0.25\tau_v$ (τ_v 为游标周期), 以便解除游标系统的整值距离模糊。

游标系统的测时部件, 包括: 变象管、极高频驱动电路、象加强器和象记录装置。

利用极高频电压, 使变象管扫描形成时间基线, 这样, 光脉冲就打在变象管上形成亮点, 其位置可决定游标距离值。但这时存在相邻象限模糊问题。为解除这一模糊, 必须采用另外的措施。这是方案中的一个弱点。

游标测量的结果可表示为

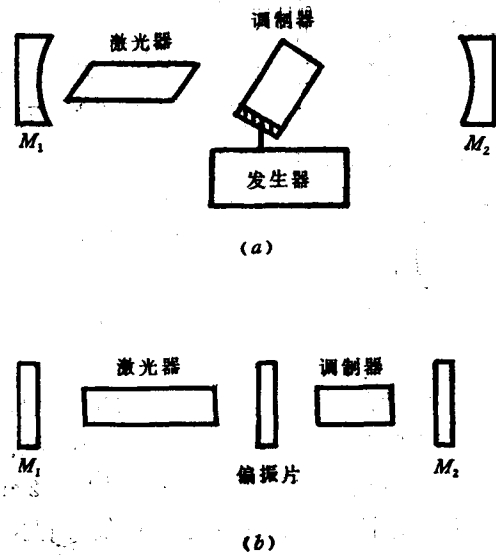
$$T = N\tau_v + \Delta\theta \frac{\tau_v}{2\pi} \quad (16)$$

N 由概值测量接收机解决。从式 (16) 的形式看, 它和相位式测距的公式类似。游标用来得分数, 故精度较高。

仪器性能为: 脉冲宽度 500ps, 光脉冲能量 1 mJ, 光波长 $0.6943\mu\text{m}$, 最大测程 18km, 所用变象管为 RCA73435L。

进一步提高性能, 需要用几个 ps 的窄脉冲激光。困难首先是光学部件在更高的脉冲功率冲击下, 可能损坏。其次是光学系统必须有足够的带宽。此外, 窄脉冲光的接收器件要求高灵敏、宽频带。在测时方面, 直接计数目前最高约为 1000MHz, 相应的测距误差仍太大, 故不能指望使用通常的脉冲计数测时方式。在 Golden 等的另一报告中, 准备用极高频圆扫描作游标测时, 并用电荷耦合器件的方式直接输出数据。这一方法与微波测距早期的圆扫描测相原理相似, 但所用频率高达数百兆赫。值得注意的一种新技术是下面要介绍的时间扩展技术, 它从另一方面解决测量极短时间间隔的办法。

十年来, 激光测卫技术也获得迅速发展, 精度从 50 厘米左右提高到了几个厘米。这主要归功于激光脉宽的缩短、单光子检测技术的发展、微处理机的应用、大气折射计算的



M_1, M_2 为反射镜

图 2

改进、具有高稳定轨道而且消除了反射误差的 Lageos 卫星的发射等等。同时测时技术的发展也是重要因素。

远程脉冲光波测距，通常与测角、数据处理等结合而形成完整的激光雷达。它同时具有高精度测距和测角能力、并可对卫星进行跟踪。美国 GTE Sylvania 公司正在建造的测卫光雷达主要指标如下：

测程	最短	约 600m
	最长	>10000km
测距精度		优于 5 cm
距离分辨力		优于 2 cm
数据率		4.0pps
转动范围		方位 $\pm 270^\circ$ ，俯仰 $\pm 100^\circ$
跟踪范围		计算机控制跟踪、可从仰角 10° 直到天顶角 2° ，

今后几年，测距精度提高到 1~2 cm 是可能的。尽管如此，由于激光雷达系统造价昂贵，固定一点使用效率很低。因此，发展了机动性很高的车载和空载测距光雷达系统。车载的典型设备，采用 30cm 直径的单筒望远镜，小功率(3.5MW)高重复率(10/sec) YAG 锁模激光器。空载的设备可放在卫星或航天机上，沿一定轨道飞行，它可以按预订轨道程序，对遍布数百平方公里以上的大区域内反射镜进行测距。信息可在传到地面后处理，也可以在空中处理，从而大大提高作业效率。这无疑是激光测距技术应用上的一个飞跃，对需要在短时间内取得大量信息的地震预报具有重大意义。

4. 微波测距仪

微波测距仪的发展有以下几方面：小型化、动目标测量、高调制频率测距、毫米波测距等。

(1) 微波测距小型化

微波测距利用固体微波源和集成电路已基本实现小型化，CA1000 是一个例子。它使用了玻纤外壳，使仪器重量仅为 1.6 公斤，成为名符其实的袖珍仪器。主副台都只用一块晶体（没有恒温控制）经过频率综合得出其它频率。主副台相互锁频在 1 KHz 差频。载波为三厘米波段，使用小喇叭天线可测 10km，大喇叭可测 30km。精度为 $\pm (15\text{mm} + 5 \cdot 10^{-6} D)$ 。

(2) 动目标测量

动目标测量有其特殊要求和问题：目标运动快，仪器操作周期应短，因此，必须自动化；为捕获目标快，要求波瓣宽一些，而且在暂时丢失目标时，应保持工作状态。

MRB201 是七十年代发展出来的动态微波测距仪。载频为 10 厘米波段，调制频率为 1.5MHz 左右，无模糊距离为 100km，分辨力为 0.1 米，可自动连续显示距离。信号如中断；仪器的数字距离积分器自动转为“速率记忆”状态工作，按最后的速率显示，直到信号恢复为止，随后自动改正显示。数据可以输出给打印机、磁带或纸带记录仪。动目标测距精度 $\pm 1.5\text{m}$ 。

MRB301 是对空测距仪器，载波仍为 10 厘米波段，调制频率 15 MHz，精度为 $\pm (1\text{m} \pm$

$3 \cdot 10^{-6} D$), 测程 150km, 目标速度可测范围为 0—800km/hr。

(3) 高调制频率的微波测距仪

理论分析证明, 地面反射误差 ΔD 可用下式表示

$$\Delta D = \frac{\lambda_1}{2\pi} \sum_{i=1}^n R_i \cos \frac{2\pi \Delta d_i}{\lambda_0} \sin \frac{2\pi \Delta d_i}{\lambda_i} \quad (17)$$

其中 λ_1 —— 调制波长

λ_0 —— 载波波长

R_i —— 第 i 区的地面反射衰减系数

Δd_i —— 第 i 区的反射波程差

在缩短了 λ_1 之后, ΔD 就可以随之变小。这种方法比过去沿用已久的载波宽频带平均法要简单得多。DI60、MD60 等仪器都是用 150MHz 作为精测调制频率, 得到了较好的结果。

(4) 毫米波测距仪

采用毫米波载波可以减小地面反射的误差, 同时可提高天线的增益, 缩小天线的体积, 使仪器小型化。例如, MRA-4 (微波测距公司产) 载波为 35GHz, 抛物面直径 33cm, 波束宽 2° , 精测调制频率为 75MHz。方案与 MRA 3 相近, 中频为 46.5MHz, 差频为 1.5KHz。测距精度为 $\pm (3\text{mm} \pm 3 \cdot 10^{-6} D)$, 分辨力为 1mm。

二、在时间测量技术、光速测量以及 大气折射率分布研究方面的进展

1. 时间测量技术

直接计数的最高频率仅能达 1000MHz 左右, 对应的时间测量误差已在 1ns。这对卫星的测距要求已不能满足。新的时间扩大 (或时间放大) 技术是一条很有潜力的方向。

时间扩大法的应用原理, 可用图 3 说明。需要测量的是从发射脉冲到接收脉冲之间的

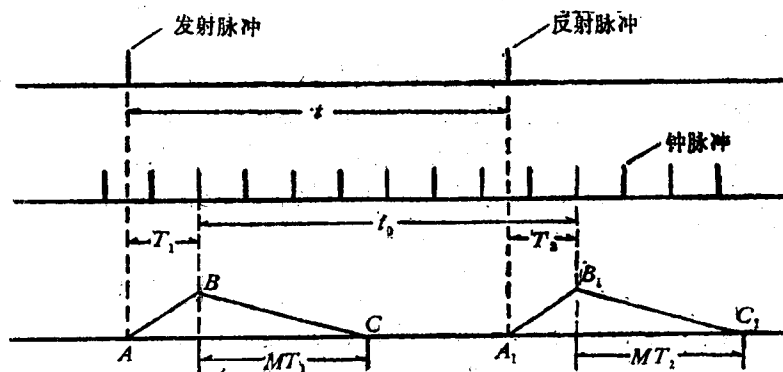


图 3

时间间隔 t 。现在用图上的关系来说明测量原理。

在发射脉冲来到时，有一个充电电路开始充电，它以线性的电压上升率增长，直到发射脉冲后的第二个钟脉冲到达时为止。在反射脉冲到达时，也是在另一电路进行这种过程。显然，存在下列关系

$$t = t_0 + T_1 - T_2$$

这里 t_0 —— t 内包含的钟周期整数倍的时间

T_1 —— 发射脉冲到它之后第二个钟脉冲的时间

T_2 —— 反射脉冲到它之后第二个钟脉冲的时间

从通常的计数方式可以得到 T_0 。 T_1 和 T_2 则是很短的时间，这里采用充放电时间扩展方法来测量它们。在 T_1 或 T_2 期间，使它有较大的充电电流，这个电流是稳流的，所以充电结束时电容上的电压将与充电时间成线性关系。在充电结束后，开始放电。放电电流也是稳流的，但稳流值为充电时的 $1/N$ 。这样，电容放掉全部充电时所收电量，就需要 M 倍原充电时间，即放电时间被拉长为 MT_1 或 MT_2 ，测量 MT_1 或 MT_2 又可以用典型的时间计数法。这种方法把时间扩大了来测量，所以称为“时间扩大”或“时间放大”法。例如用 100 毫安充电电流，而用 10 微安放电电流，则可得到 $M = 10^4$ 。如果， t_0 时间内记数为 N_0 ， T_1 化为 MT_1 后用同一钟频计数为 N_1 ， T_2 化为 MT_2 后计数为 N_2 ，则时间测量结果为

$$t = (N_0 M + N_1 - N_2) T_0 / M$$

这里 T_0 —— 钟的周期。可以看出，上式相当于用频率高 M 倍的钟频脉冲来测时间。例如，用 100MHz 钟频的时间扩展测时装置，若扩展 100 倍，则其效果与直接用 10000MHz 钟频测时一样。这样就使得人们有可能把测时引起的测距误差降下去。

2. 光速测量的新结果

自从激光问世以来，人们就开始重新考虑测光速的方法。使激光波长稳定在某种微观系统上，测定其频率 f 和波长 λ ，就可以得出光速值

$$c_0 = f\lambda \quad (18)$$

直接测定光在已知距离上的传播时间的方法，其精度受到已知距离精度的限制，还受到测时技术的限制。

Evenson^[7]等利用甲烷去稳定 He-Ne 的 3.39 微米激光辐射线，测定频率值，然后与测出的波长相乘，得出了比过去精度高 100 倍的光速新值^[6]。

甲烷 3.39 微米激光饱和吸收线属于 ν_3 谱系的 P(7) 线，其特性为：塞曼效应小，没有一阶的斯塔克位移，线宽很窄，只有 25KHz。频率稳定度可做到 10^{-14} 。它是最合适作为长度和频率标准的辐射线之一。

Barger 和 Hall 利用 Kr⁸⁶ 的 6058Å 长度基准，测定了甲烷稳定的激光器波长。由于 Kr 线不对称，得到两个结果。当以 Kr 线最高强度点为基准时，有

$$\lambda_0 = 33922.31404 \text{ Å} \quad \delta\lambda = \pm 1.2 \times 10^{-4} \text{ Å}$$

当以 Kr 线重心定义长度为基准时，有

$$\lambda_0 = 33922.31376 \text{ \AA} \quad \delta\lambda = \pm 1.2 \times 10^{-4} \text{ \AA}$$

米定义咨询委员会 (CCDM) 1973 年综合了上述结果和其它一些数据, 给出了甲烷的 3.39 微米线的波长为

$$\lambda_{\text{CH}_4}[\text{P}(7), \text{谱系 } \nu_3] = 33922.3140 \text{ \AA}$$

测量 3.39 微米线的频率是比较难的, 原因是, 铯钟频率在微波范围, 两者的频率相差 10^4 , 把两者对比, 必须有一系列频率近乎这两者之间的振荡器, 才有可能实现逐级比对, 把频标引渡到长度基准上去。

Evenson 等利用图 4 的比对链来测定 λ_{CH_4} 的频率。测量的关键是利用光外差技术和金属—金属点接触二极管, 使测频扩展到红外区。二极管起着混频和谐波产生两重作用。每一二极管都有几个频率在起拍频作用。实验步骤见文献^[7]。

实验得到甲烷 3.39 微米线的频率值

$$\nu_{\text{CH}_4} = 88.376181627 (50) \text{ THz}$$

$$(\delta\nu/\nu)_{\text{CH}_4} = \pm 5.6 \times 10^{-10}$$

以此值与 Barger 和 Hall 的 λ_{CH_4} 相乘, 得到

$$c_0 = 299792456.2 \text{ m/s}$$

$$\delta c_0/c_0 = 3.5 \times 10^{-9} \quad (19)$$

若使用 CCDM 建议的波长值, 则

$$c_0 = 299792458 \pm 1.2 \text{ m/s} \quad (20)$$

其精度为 4×10^{-9}

Blany 在 1974 年发表了另一结果^[8], 他是用 CO_2 的 R(12)9.3 μm 线, 测得频率为

$$\nu = 32.176079482 \text{ THz}$$

随机不确定性为 $\sigma_m = 1.3 \times 10^{-10}$, 系统不确定性为 $\pm 7 \times 10^{-10}$, 波长为

$$\lambda_{\text{CO}_2} = 9.317246348 \text{ }\mu\text{m}$$

系统不确定性为 $\pm 1.4 \times 10^{-9}$ 。这样得到

$$c_0 = 299792459.0 \pm 0.8 \text{ m/s} \quad (21)$$

精度为 $\pm 2.7 \times 10^{-9}$ 。

3. 激光测距的大气折射误差改正^{[8][9]}

在卫星测轨时, 激光测距需达到上千公里以上, 这时射线穿过整个大气层, 大气改正问题就成为测距精度中的重大问题。

大气改正的复杂性在于不能随时知道大气层的分布情况; 大气层对激光测距的影响随射线所穿过的厚度而异, 它是仰角的函数; 大气情况随日照而变, 它也应该是时间、季节的函数。

Marini 和 Murray 提出球对称大气折射模型, 它是以测站地点的温度、压力、湿度作为已知量, 研究球对称大气的折射改正公式。他们导出了一个连分式^[9]表示距离改正值

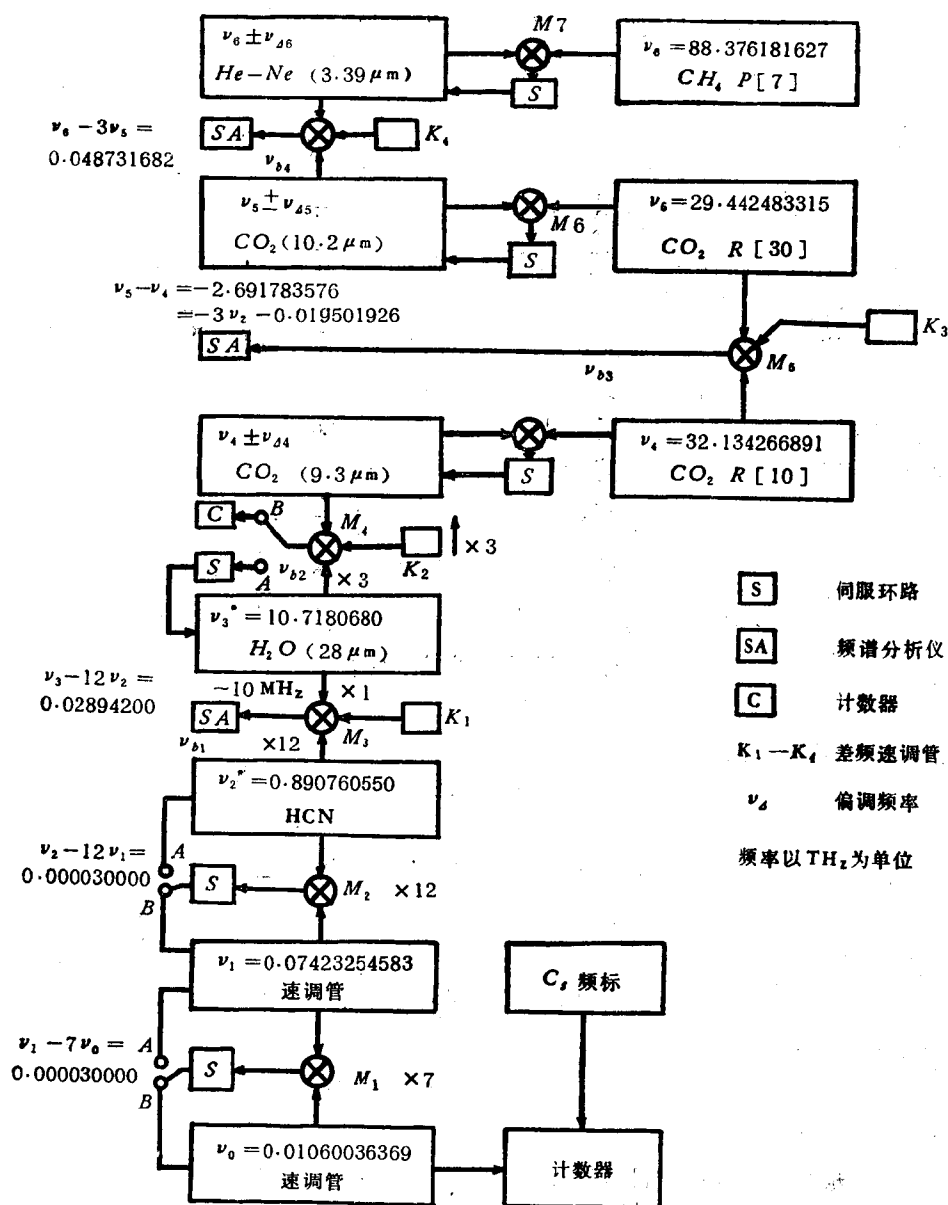


图4 激光器频综链^[7]

$$\Delta R = \frac{f(\lambda)}{f_1(\varphi, H)} \cdot \frac{A+B}{\sin E + \frac{B/(A+B)}{\sin E + 0.01}} \quad (22)$$

其中函数为

$$f(\lambda) = 0.9650 + \frac{0.016}{\lambda^2} + \frac{0.000228}{\lambda^4}$$

$$f_1(\varphi, H) = 1 - 0.0026 \cos 2\varphi - 0.00031H$$

当 $\lambda = 0.6943\mu\text{m}$ 时, $f(\lambda) = 1$, 其余各符号为

$$A = 0.002357P_0 + 0.000141e_0$$

$$B = (1.084 \times 10^{-8})P_0T_0K + (4.734 \times 10^{-8})\frac{P_0^2}{T_0} \cdot \frac{2}{\left(3 - \frac{1}{K}\right)}$$

$$K = 1.163 - 0.00968\cos 2\varphi - 0.00104T_0 + 0.00001435P_0$$

φ ——纬度

E ——卫星真仰角

P_0 ——测站的大气压力 (mbar)

T_0 ——测站的大气温度 ($^{\circ}\text{K}$)

e_0 ——测站的水蒸气压力 (mbar)

H ——测站的海拔高度 (km)

式 (22) 得出的结果与单个气球无线电探空数据所得路径相比, 符合甚高, 10° 仰角时计算值的标准偏差在厘米量级, 天顶时则更好, 相差仅 0.04cm 。

由于实际大气折射率并非球对称的, 而是有水平梯度分布的, 所以球对称分布的公式仍包含有较大误差。另一方面单个探空气球得到的数据也是不完整的数据。Zanter、Gardner 和 Rao 等研究了这个问题^[10]。

假定在给定高度时, 折射与位置之关系为线性的, 最简单的估计是,

$$N = N_r + \theta N_{\theta} + \phi N_{\phi} \sin \theta$$

其中 N ——折射模数

θ ——纬度的余角

ϕ ——经度

N_r 、 N_{θ} 、 N_{ϕ} ——每一高度所对应的三个系数

这里 θ 与南北方向的水平位移成比例, $\phi \sin \theta$ 与东西方向位移成比例。在特定高度确定这三个系数时, 要求至少预知该高度上的三个点的折射模数。

折射并不严格遵守上述线性关系, 更精确的是二次式

$$N = N_r + \theta N_{\theta} + \phi N_{\phi} \sin \theta + \theta^2 N_{\theta\theta} + \phi^2 N_{\phi\phi} \sin^2 \theta$$

这一公式要求每一高度有 6 个系数, 至少需要用 6 个折射数据来定它。为了简化, 采用下列折射公式

$$N = N_r + \theta N_{\theta} + \phi N_{\phi} \sin \theta + \theta \phi N_{\theta\phi} \sin \theta$$

这称为四系数模型, 精度稍逊于前式, 但由于高空大气较均匀, 故误差不大。

为了确定出大气折射剖面, 在实验上用探空气球进行测定。在某几个位置上并且在昼夜的各种时刻, 在几分钟内放出若干气球, 跟踪高度约达 15 公里。每一高度测 8 个折射率数据, 用以确定大气剖面。图 5 为实测的 N_g , $\frac{\partial N_g}{\partial \theta}$, $\frac{1}{\sin \theta} \cdot \frac{\partial N_g}{\partial \varphi}$ 的曲线。

探空数据可得出三种射线迹线,