



测绘新技术小丛书



刘基余

# 电磁波测距仪 的现状和发展

测绘出版社

测绘新技术小丛书

# 电磁波测距仪的现状和发展

刘 基 余

测绘出版社

## 目 录

|      |                    |      |
|------|--------------------|------|
| § 1  | 光速测量的启示 .....      | (1)  |
| § 2  | 量距不用尺 .....        | (5)  |
| § 3  | 巧法算距离 .....        | (10) |
| § 4  | 电磁波测距仪的种类 .....    | (17) |
| § 5  | 激光测距仪的发展及其前程 ..... | (22) |
| § 6  | 几种典型的远程激光测距仪 ..... | (33) |
| § 7  | 短程光波测距仪 .....      | (42) |
| § 8  | 短程光波测距仪的应用问题 ..... | (53) |
| § 9  | 多波测距仪 .....        | (62) |
| § 10 | 发展中的微波测距仪 .....    | (74) |

电磁波测距仪，广义而论，是以电磁波取代人们弯腰曲背地丈量距离的仪器；通俗而言，是光波测距仪和微波测距仪的总称。按照这两种定义，我们将电磁波测距仪分为三大家族两兄弟。从 1957 年的以白炽灯作载波源的 NASM-2A 型光电测距仪投入大地测量生产作业以来，光波测距仪已发展到了第三代：第一代产品是光电测距仪，第二代产品是激光测距仪和半导体测距仪，第三代产品是多波测距仪。以 10 厘米波作载波的 MRA-1 型微波测距仪和 NASM-2A 型光电测距仪同时投入大地测量的生产作业；在二十余年的发展过程中，微波测距仪虽有许多改进和提高，但在提高测距精度方面尚未取得重大突破，因此，它难以分代而论。

随着电磁波测距仪的迅速发展，它们的种类繁多，用途广泛：从陆地测距，发展到陆空和陆海；从始用于大地测量的生产作业，渗透到工程技术，勘测设计，水电建设，地球物理，地震预报，远程兵器，尖端科学，质子加速器等科技领域的应用；甚至应用光波测距仪测量炼钢炉膛壁的变化，以便不停产地检测炼钢炉；在第二十届奥林匹克运动会上，还应用半导体测距仪测量了标枪等的投掷距离。应用如此广泛的电磁波测距仪，目前世界各国大概共拥有三万台左右。本书择其共同点，分类简述；奢望抓其本质，概述发展。

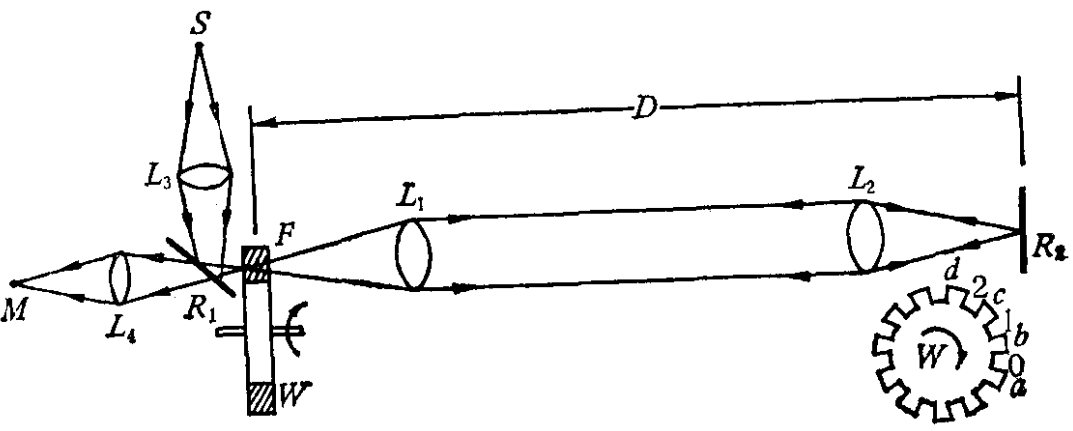
## § 1 光速测量的启示

早在 1607 年，意大利物理学家伽利略首次进行了光速

测量的试验，他令两个观测者各执一个灯笼，立于两个相距甚远的已知点上，观测者甲首先向观测者乙发出灯光，观测者乙则在观察到甲灯光的那一瞬间，立刻打开自己的灯光，于是，观测者甲测量他自己发出灯光及其观察到乙灯光之间的时间间隔，便按甲乙两者之间的已知距离而求得光速。伽利略的实验，虽然没有取得任何成果，但是，伽利略利用测量时间间隔而求得光速的设想，却为后人的实验奠定了理论基础。

1676 年，丹麦天文学家勒麦尔从观测木星的卫星蚀中第一次测量了光速值，其值为  $2.3 \times 10^8$  米/秒。这种以观测天体而测量光速的天文学方法，没有为更多的科学家所重视，而着眼于寻求测量光速的精密方法。直到十九世纪中叶，人们才开始了在陆地上精确测量光速的实验。

裴索是第一个不用天文学方法而测量光速的人；1849 年，他在长达 17 公里的地面距离上，成功地测量了光速，其值为  $315300 \pm 80$  公里/秒。裴索测量光速的方法，实质上与伽利略方法是一致的，只不过前者用反射镜代替了第二个观测者，以旋转齿轮代替了人工开关灯光。图（一）是裴索测量光速的实验装置示意图。光源  $S$  发出的光，经过透镜  $L_3$  和半镀银反光镜  $R_1$  而会聚于  $F$  点。在  $F$  点所处的平面内，



图（一） 裴索的齿轮法

置以一个旋转速度可调的齿轮 $W$ ，后者的齿牙不透光，仅齿隙通光；若光线从齿隙 $0$ 透射出去，则经过透镜 $L_1L_2$ 而到达反光镜 $R_2$ ，并由后者反射后，沿入射光线的路径返回到 $F$ 点，观测者通过半镀银镜 $R_1$ 而观测到回光。若旋转齿轮 $W$ ，观测者所看到的回光由强变弱；当齿轮的旋转速度增加到某一速度 $V_1$ 时，使得抵达 $F$ 的回光恰好对准齿牙 $b$ ，观测者就看不见回光，称之为“暗点”，第一次出现“暗点”的时间则为

$$t_D = \frac{1}{2nR} \quad (1)$$

式中 $n$ 为齿牙数， $R$ 为齿轮每秒钟所旋转的圈数。而光线往返于 $F$ 和 $R_2$ 之间所需要的时间为

$$t_D = \frac{2D}{c} \quad (2)$$

式中 $D$ 为 $F$ 和 $R_2$ 之间的距离， $c$ 为光的传播速度。

从式(1)(2)可知

$$c = 4nRD \quad (3)$$

上式表明，只要知道转速 $R$ 、齿牙数 $n$ 和距离 $D$ ，便可求得光速值；裴索就是按照这种“暗点”观测方法而测量光速的。反之，若知道了光速值，按式(3)不是可以求出待测距离 $D$ 吗？仿效齿轮法的原理，苏联工程师维里奇柯和华西里也夫等人于1953年研制成功了CBB-1型光电测距仪，只不过CBB-1仪器以改变测距频率取代了调节齿轮的旋转速度。这种变频式测距原理，仍为现代的某些光波测距仪所应用。例如，苏联的CT-3型激光测距仪则是其例。

随着科学技术的发展，光速的测量精度越来越高于裴索法(其误差为 $\pm 80$ 公里/秒)。本世纪五十年代，先后出现了几

次精确测量光速的实验，而导致了人们公认真空光速值 $c_0 = 299792.5 \pm 0.4$  公里/秒，这是 1957 年于加拿大召开的国际大地测量和地球物理联合会(IUGG) 第十一届全会所建议的\*。在这几次精确测量光速的实验中，瑞典大地测量局大地测量学家贝尔格斯川博士的实验是卓有成效的；他根据西德卡洛鲁斯等人关于用光电方法测量光速的理论和实践，1941 年，于诺贝尔物理研究所开始了精确测量光速的实验，贝尔格斯川博士用高频信号调制白炽灯光的方法，在大地测量控制网的基线上，对光速进行了精确测量，而于 1943 年获得首批成果，同年发表了“用高频调制光测量距离”<sup>3</sup>的著名论文，在这篇远见卓识的论文里，贝尔格斯川博士根据自己测量光速的成功实验，提出了应用光电方法测量距离的设想。此后，他继续进行研究和实验，终于在 1947 年发展成为著名的 Geodimeter (Geodetic Distance Meter 的缩写) 原理；同年，贝尔格斯川博士与瑞典 AGA 仪器公司合作，研制成功了一种用白炽灯光作载波（运载测距信号的工具）和 10 兆赫调制波为测距信号的测距仪，命名为 Geodimeter（大地测距仪）；这种以白炽灯作载波源的测距仪，我国叫做光电测距仪（早期称为光速测距仪）。1953 年，AGA 公司试制成功了世界上第一台远程光电测距仪，其型号称作 NASM-1。这种仪器于 1955 年被改进的 NASM-2 型光电测距仪所取代。1957 年商品化的 NASM-2A 型光电测距仪问世了，它被批量生产而销售世界各国。AGA 公司的光电测距仪，从样机到定型投产，经历了整整十年的不断改进和提高，才赢得

---

\* 1975 年 8 月，国际大地测量学会 (IAG) 于法国召开的第十六届全会，建议采用新的真空光速：

$$c_0 = 299792458 \pm 1.2 \text{ 米/秒}$$

了世界名牌产品的声誉。

## § 2 量距不用尺

精确地测定两点间的距离，是经济建设、国防建设和科学研究中一项颇为重要的工作。边长，是测量工作中最基本的观测元素之一，不测量一定数量的边长，就无法建立测量工作的基础——大地控制网。

在光电测距仪问世以前，距离的精确测量主要是依靠人们弯腰曲背地用长约 24 米的因瓦基线尺一尺一尺地丈量。这种基线测量方法，要求选择和布设平坦开阔的测线场地；为了达到建立大地控制网的应用目的，还需测量一定的几何图形，平差计算基线网的观测成果。这样测量一条一等三角起始边，不仅需要耗费大量的人力、物力和财力，而且对于地形复杂的地区，基线测量是十分困难的。因此，在经典大地测量中尽可能地少作距离测量，而利用角度观测值推算所需要的边长。

NASM-2A 型光电测距仪的问世，使人们从繁重的基线测量中解放出来。应用 NASM-2A 仪器，既不要选择和布设平坦开阔的量距路线，又不要观测和计算复杂的基线网；只要在测线的一端架设仪器，另一端安置一个反光镜，就可以直接测量待测距离。NASM-2A 仪器的夜间最大作用距离为 30 公里左右，外部符合精度约为  $1:350\,000$ 。因此，它可用来直接测量三角锁、网的起始边，亦可用它布设测边测角三角锁，或在旧三角锁、网中加测若干起始边，以提高三角锁、网的精度；在高山、森林和沼泽等难以布设三角锁、网的困难地区（如我国的青藏地区），可用光电测距仪测设精密导线。

光电测距仪的问世，为人们开创了距离测量的新途径。

光电测距仪是怎样测得待测距离的呢？这是我们甚为关注的问题。也许你有这样的生活实践：当你面向高山用双手在嘴上合成一个圆筒形喇叭，大声而又短促地呼叫时，声音便从呼叫的地方出发，向高山的方向传播出去，倾刻，声音又从高山那里反射回来，传到你的耳朵里，于是你听到了回声。如果你记录了声音从“出发”到“返回”所经历的时间，又知道声音的传播速度，那么马上可以算出人与高山之间的距离。光电测距仪的工作原理与“回声测距法”大体相似，只不过前者以调制光（光强按一定规律变化的光）代替声音，应用发送设备代替人的呼叫，而用接收设备间接地测量测距信号往返于测线的传播时间。根据式（2）可知，两倍的待测距离等于测距信号往返于测线的传播时间  $t_D$  与光速  $c$  之积，亦即

$$D = \frac{1}{2} c t_D \quad (4)$$

NASM-2A 仪器，不是直接测量传播时间，而是通过测量测距信号往返于测线的滞后相位  $\varphi_D$ （因待测距离  $D$  所引起的相位移叫做滞后相位）求得待测距离的；根据相位的定义，滞后相位  $\varphi_D$  等于测距信号的角频率  $\Omega$  乘以传播时间  $t_D$ ，亦即  $\varphi_D = \Omega t_D$ ，故知

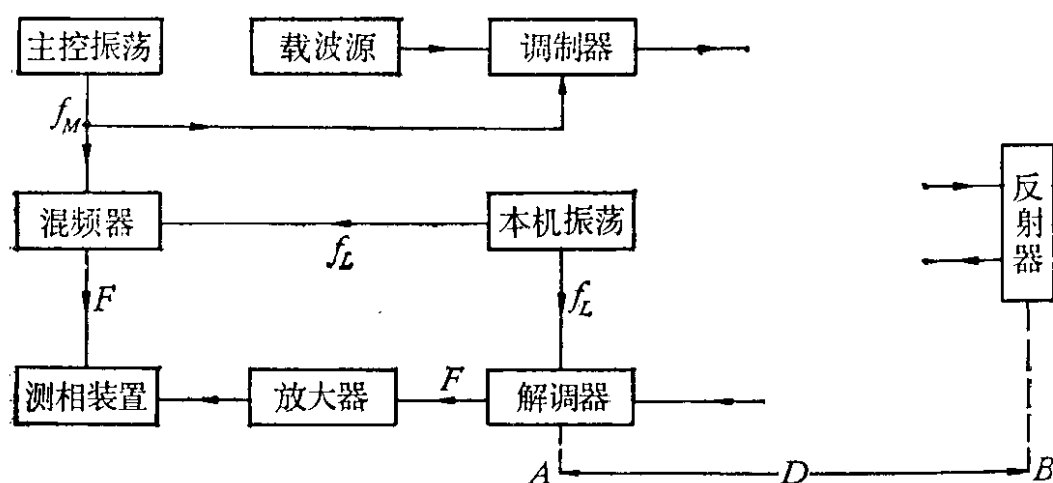
$$t_D = \frac{\varphi_D}{\Omega} \quad (5)$$

将式（5）代入式（4），并考虑到  $\Omega = 2\pi f$ （此外  $f$  为测距信号的频率），则有

$$D = \frac{\varphi_D}{4\pi f} \cdot c \quad (6)$$

上式中的测距频率  $f$  是已知的，按照仪器所测得的滞后相位

$\varphi_D$  便可算得待测距离；这和根据式（4）所算得的结果是完全相同的。由此观之，电磁波测距仪既可以应用直接测定传播时间的方法，又可以应用测量滞后相位的方法而求得待测距离。用于精确测量距离的电磁波测距仪，多采用测量滞后相位的方法；这种类型的仪器叫做相位式测距仪，式（6）是它的基本求距公式，图（二）是它的基本结构。



图（二） 相位式测距仪的基本结构

图（二）表示仪器置于测线的  $A$  端点，反射器置于测线的  $B$  端点。在应用光波作载波的情况下，载波源就是一个光源，反射器就是反光镜，解调器是一个光电转换器件（如光电倍增管）。现以光波测距仪为例，说明相位式测距仪的工作原理。从图（二）可见，主控振荡器所产生的频率为  $f_M$  的测距信号加到调制器，当载波源发射的光线通过调制器时，光波的振幅就受到测距信号的调制，而变成一种光强（它与振幅的平方成正比）按测距信号规律而变化的光，这种光叫做调制光。后者发向置于测线彼端的反射器；调制光经过待测距离  $D$  而到达反射器，并由后者将它反射送回测站。经过了两倍距离的调制光被送到解调器，在解调器上还加入了频率为  $f_L$  的本机振荡信号，因此，解调器既将回光的强弱变

化转换成电流变化，而从调制光中“取出”测距信号，又将高频测距信号经过解调器的混频作用而变成一个频率为  $F(=f_M-f_L)$  的低频信号，后者叫做被测信号，它携带着测距信号往返于测线所产生的滞后相位；这个被测信号经过放大器而进入测相装置。主控振荡器所产生的测距信号，还有极少部分加到混频器，与来自本机振荡器的本振信号相混频，而得到一个和被测信号同一频率  $F$  的低频信号，它是相位测量的基准，故称之为基准信号，后者亦送入测相装置。在测相装置中，对被测信号和基准信号进行相位比较，并测量出两者的相位差；在不顾及仪器内部相移的情况下，后者就是测距信号往返于测线的滞后相位  $\varphi_D$ 。测得了  $\varphi_D$ ，则可按式（6）求得待测距离  $D$ 。

在一般情况下，测距频率较高（波长较短），而待测距离又较长；相位是以  $2\pi$  为周期的，它的一个周期（ $2\pi$ ）相应于一个波长；当测距频率为 15 兆赫（波长则为 20 米）时， $3600^\circ$  的滞后相位，按照式（6）求得的相应距离为 100 米；因此，滞后相位  $\varphi_D$  一般等于  $N$  个整周期和不足一个周期的零头  $\Delta\varphi$ ，亦即

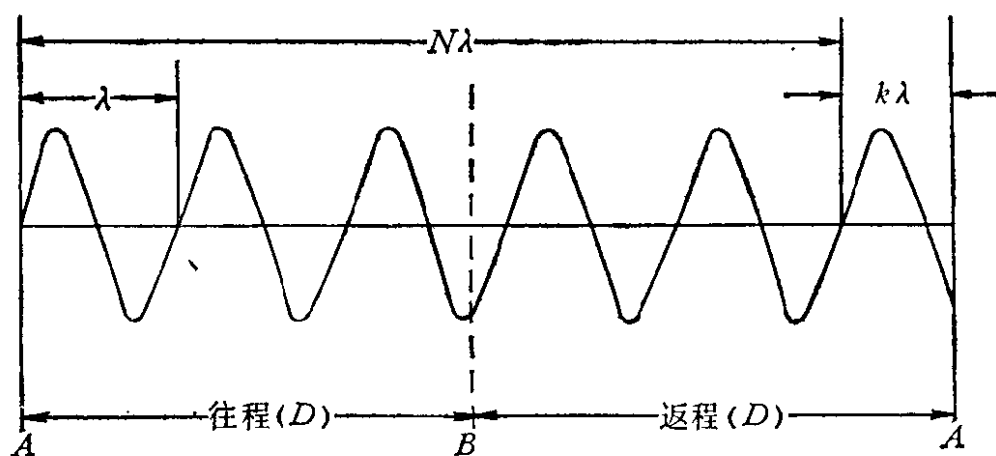
$$\varphi_D = N \cdot 2\pi + \Delta\varphi \quad (7)$$

将上式代入式（6）可得

$$\begin{aligned} D &= \frac{c}{4\pi f} (N \cdot 2\pi + \Delta\varphi) \\ &= \frac{c}{2f} \left( N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) \\ &= \frac{1}{2} \lambda (N + k) \\ &= u(N + k) \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $\lambda$  为测距信号的波长（它等于  $c/f$ ）， $u = \frac{1}{2}\lambda$ ，叫做单位长度， $k = \Delta\varphi/2\pi$ ，它是一个小于 1 的系数。

式（8）表明，电磁波测距的实质也是一种“线尺量距法”，只不过电磁波测距仪所用的“线尺”，是一种不需人工操作的看不见摸不着的“电尺”（ $u$ ），用电尺去“丈量” $AB$  两点间的距离  $D$  时，有  $N$  个“整尺段”和不足一个尺段的零头，后者叫做剩余长度。如果按照往返程将电尺的量距结果予以展开，则如图（三）所示；因为在往返程的情况下，



图（三） 电尺量距

“电尺”的长度是一个波长，所以“整尺段”数  $N$  叫做波数。在一般情况下，波数  $N$  是不能由仪器直接测量出来的；仪器只能直接测量出来不足一个波数的零头。如果仪器仅仅用一个测距频率，那么它就不能分辨出“零头”相同的不同距离，这就叫做“多值性”。例如，有尾数相同的三条距离： $D_1 = 9006.342$  米， $D_2 = 11006.342$  米， $D_3 = 10006.342$  米；如果仪器仅用一个 15 兆赫的测距频率，不管仪器在那一条距离上进行测量，它只能直接测得 6.342 米，而无法确定所测距离是  $D_1$ ？还是  $D_2$ ？或是  $D_3$ ？若要解决测距成果的这种多值性，必须

设法解算波数 $N$ 。

### § 3 巧法算距离

在几百种远、中、短程光波测距仪中，解算波数 $N$ 的方法可以归纳为变频、定频、混合三大方法，现简要介绍于后。

#### 一 变频解算法

采用变频法解算波数 $N$ 的光波测距仪，叫做变频式光波测距仪；这种仪器的测距频率可在一定范围内（如 9.6 兆赫—10.4 兆赫）均匀变化，它利用均匀调变测距频率的方法，迫使式（8）中的 $k$ 值等于零，进而测得待测距离。这好像手头有许多长短不同的尺子，当用这些尺子测量一条距离时，总可以选择几把尺子，恰好将待测距离丈量成整倍数的尺长，而无“零头”。例如，手中有长为 6 米、5 米和 3.75 米的三把尺子，当丈量一条 105 米的距离时，用 6 米尺量不尽（ $k=0.5$ ）；而用 5 米和 3.75 米尺子却刚刚量尽（ $k=0$ ），此时待测距离分别为  $21 \times 5$  米和  $28 \times 3.75$  米。变频式光波测距仪是这样选择长度合适的电尺测量距离的：当用它测量一条待测距离时，首先于测距频率可变范围的低端（如 9.6 兆赫）附近调变测距频率，致使待测距离

$$D = \frac{1}{2} N \lambda_L = \frac{Nc}{2f_L} \quad (9)$$

此时，接收系统中观测到的来自反光镜的回光最暗，同时于频率计上读取频率 $f_L$ 值。然后再逐渐调变测距频率，接收系统中的回光随之调变而由暗变亮，由亮变暗；若将回光从最暗到最亮再到最暗，叫做一个暗点变化周期；当测距频率均匀调变到高端（如 10.4 兆赫）附近时，暗点变化了 $n$ 个

周期，此时则有

$$D = \frac{c}{2f_H}(N + n) \quad (10)$$

并于频率计上测得频率  $f_H$ ，暗点变化周期数  $n$  是在调变测距频率过程中直接观测到的。故可按照式 (9) (10) 而求得波数

$$N = \frac{nf_L}{f_H - f_L} \quad (11)$$

算得波数  $N$  以后，便可按式 (9) 求得待测距离  $D$ 。苏联研制的 CBB-1 型光电测距仪，是变频式光波测距仪的第一代产品。现代的光波测距仪只有少数采用变频法解算波数  $N$ ，而且将人眼直接观察回光的亮暗变化，改用光电法测量暗点，因此，仪器的观测速度和测距精度均有了较大的提高。例如，苏联的 CT-3 型变频式激光测距仪，测量 20 公里时，可以达到 1:400 000 的精度。

## 二 定频解算法

定频法，是应用两个以上的固定不变的测距频率，直接测得不足一个单位长度  $u$  的剩余长度，而通过一定的方法解算波数  $N$ 。采用定频法解算波数  $N$  的光波测距仪，叫做定频式光波测距仪。解算波数  $N$  的定频法又分为十进扩大法、递增扩大法和低频扩大法。

### 1 十进扩大法

解算波数  $N$  的十进扩大法，是应用四个以上的逐个减小的测距频率，致使单位长度  $u_1$  逐级放大 10 倍，以此构成一个十进制读数系统，从而将求解波数  $N$  的问题转化为解算波数差。例如，JCY-2 激光测距仪、MA-100 红外测距仪和 Georan-1 双色激光测距仪等均采用十进扩大法。

如果十进扩大法应用五个测距频率,且知  $f_1 > f_2 > f_3 > f_4 > f_5$ , 而各个频率的相应波长为  $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 < \lambda_4 < \lambda_5$ 。当用这五个测距频率测量一条距离时, 根据式 (8) 可得到下列方程组:

$$\left. \begin{aligned} D &= u_1(N_1 + k_1) \\ D &= u_2(N_2 + k_2) \\ D &= u_3(N_3 + k_3) \\ D &= u_4(N_4 + k_4) \\ D &= u_5(N_5 + k_5) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中单位长度  $u_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ) 是相应于测距频率  $f_i$  的二分之一波长或四分之一波长 (因仪器不同而异), 一般  $u_i \leq 10$  米; 仪器直接测得的剩余长度是不足一个  $u_i$  的, 待求的波数  $N_i$  是一个较大的数; 为了将求解波数  $N_i$  的问题转化为解算波数差, 将式 (12) 作一些适当的变换, 而推导出十进扩大法的实用公式:

$$\left. \begin{aligned} D &= n_{02}u_1[(N_1 - N_2) + (k_1 - k_2)] \\ D &= n_{03}u_1[(N_1 - N_3) + (k_1 - k_3)] \\ D &= n_{04}u_1[(N_1 - N_4) + (k_1 - k_4)] \\ D &= n_{05}u_1[(N_1 - N_5) + (k_1 - k_5)] \\ D &= u_1[N_1 + k_1] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中 
$$n_{0j} = \frac{f_1}{f_1 - f_j} \quad (14)$$

上式中的  $j = 2, 3, 4, 5$ ; 按照十进扩大法的定义, 则知放大系数  $n_{05} = 10$ ,  $n_{04} = 100$ ,  $n_{03} = 1000$ ,  $n_{02} = 10\,000$ 。因此, 当  $u_1 = 2.5$  米时, 从式 (13) 可知, 仪器能够直接测得的最大距离——解算周期是 25 公里。这样, 就将原来求解 2.5 米的整倍数问题转化为解算 25 公里的整倍数, 亦即, 不需要

知道待测距离有多少个 2.5 米，只要知道待测距离有多少个 25 公里，这是极容易做到的。

## 2 递增扩大法

NASM-2A 型光电测距仪是创用递增扩大法的，现代的 AGA 型远中程光波测距仪仍应用递增扩大法。这种方法是应用彼此存在一定比例关系的三个以上的测距频率，致使单位长度  $u_1$  逐级放大一定的倍数，以此构成一个分级解算距离的系统，从而将求解波数  $N$  的问题转化为解算波数差。

如果递增扩大法应用三个测距频率，且知  $f_1 < f_2 < f_3$ ，而各个频率的相应波长为  $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ 。当用这三个测距频率测量一条距离时，则有下列三个测距方程：

$$\left. \begin{aligned} D &= N_1 u_1 + L_1 \\ D &= N_2 u_2 + L_2 \\ D &= N_3 u_3 + L_3 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中剩余长度  $L = ku$ ，单位长度  $u_i (i = 1, 2, 3)$  是相应于测距频率  $f_i$  的四分之一波长或者二分之一波长（因仪器不同而异）；因为测距频率一般在 10 兆赫以上，所以  $u_i \leq 15$  米。仪器只能直接测得不足一个单位长度的距离——剩余长度  $L_i$ ，为了简化波数  $N$  的解算，便将式 (15) 予以适当变换，而推导出递增扩大法的应用公式：

$$\left. \begin{aligned} D &= n_{02} u_1 [(N_2 - N_1) + K_{12}] \\ D &= n_{03} u_1 [(N_3 - N_1) + K_{13}] \\ D &= u_1 [N_1 + K_1] \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\text{式中} \quad n_{0i} = \frac{f_1}{f_i - f_1} \quad (17)$$

$$K_{12} = \frac{n_{02}(L_2 - L_1) + L_2}{n_{02} u_1}$$

$$K_{13} = \frac{n_{03}(L_3 - L_1) + L_3}{n_{03}u_1}$$

式 (17) 中的  $j=2,3$ ，一般采用  $n_{03}=20$ ， $n_{02}=400$ 。因此，当  $u_1=5$  米时，从式 (16) 可知，仪器的解算周期为 2 公里，亦即，用三个测距频率测量距离时，需要知道待测距离为 2 公里的多少倍。为了扩大解算周期，通常还增设一个测距频率  $f_4$ ，AGA-8 型激光测距仪即如此；在 AGA-8 仪器中，取  $n_{04}=f_3/(f_3-f_4)=10000$ ，因此，AGA-8 仪器的解算周期是近于 50 公里。仪器能直接测量 50 公里以内的距离，这对于实际应用是很有利的。

### 3 低频扩大法

短程光波测距仪大多数采用低频扩大法解算波数  $N$ 。这种方法是采用二个以上的测距频率，其一为高频，通常叫做精测频率，它是用于测定待测距离的米位及其以下的数，其余的测距频率为“低频”，常曰粗测频率，它是用于测定待测距离的十米位以上的数，亦即，高频定精度，低频测大数。

如果低频扩大法采用三个测距频率，彼此之间相差较大；例如 EOT-2000 型仪器的三个测距频率如下：

$$f_F = 14.985570 \text{ 兆赫}$$

$$f_{c1} = 1.498557 \text{ 兆赫}$$

$$f_{c2} = 74.928 \text{ 千赫}$$

当用三个测距频率测量一条距离时，则有如下测距方程式：

$$\left. \begin{aligned} D &= u_{c2}(N_{c2} + K_{c2}) \\ D &= u_{c1}(N_{c1} + K_{c1}) \\ D &= u_F(N_F + K_F) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

对于 EOT-2000 仪器而言， $u_F=10$  米， $u_{c1}=100$  米， $u_{c2}=2000$  米；因为  $K<1$ ，故用精测频率  $f$  只能测量 10