

奇尔威和凯什内斯基线
上的光速测距

里奇威和凱什內斯基綫 上的光速測距

英國·馬肯日少校編

國家測繪总局光速測距組譯

1958·8·

前言

科学上的研究与创造时时对测量科学贡献出新的技术或新的仪器。瑞典的艾里克·贝格斯特朗博士创造了一种光速测距仪 (Geodimeter)，已实际应用于长度测量，其原理系测出光束在待测离两端间往返所需的时间。此仪器由斯德哥尔摩的 Aga 公司制造。

感谢美国陆军制图局的合作，在 1953 年由华盛顿运了一架这样的仪器到英国，以供在里奇威和凯什内斯两条已丈量过的基线上作试验。此仪器也曾用以测量英国极北的肯特兰群岛上的一条一等三角边。

马肯日少校所作的这篇报告，将会引起所有的测量师，特别是从事基线测量者以及其他关心测量科学问题的人士的兴趣，因此予以公开出版。此报告记述 1953 年所作的工作，并对成果作了分析。将此报告与陆军测量局业务文件第 18 号（记述 1951 与 1952 年里奇威和凯什内斯的基线丈量）相比较，是很有意义的。

向所有热心而难苦地从事此次工作的人员致贺，他们所作出的成果指出了将来的美好希望。他们的姓名戴于附录内。我也愿向陆军制图局的司令官致谢，因为他借给我们这架仪器，并感谢他的二位技术人员 J. S. McCall 与 D. D. Mears 的宝贵帮助。

J. C. T. Willis

少将

陆军测量局局长

目 录

A. 总述	4
1. 引言	4
2. 光速测距仪原理	4
B. 季度工作的记述	5
3. 任务	5
4. 凯什内斯基线 (第一次前往)	5
5. 里奇威基线	6
6. 第一次检定	7
7. 凯什内斯基线 (第二次前往)	7
8. 肯特兰群岛	7
9. 凯什内斯基线 (最后一次前往)	8
10. 检定	8
C. 成果	8
11. 引言	8
12. 成果表	9
13. 平均海水面上楕球面长度的比较	10
14. 各种数据误差的影响	10
15. 分析	12
16. 国立物理试验所的检定	13
D. 结论	14
17. 晶体的频率	15
18. 反光镜与光路读数	15
19. 反射镜	15
20. 天气和场址选择	16
21. 观测员	16
E. 操作程序	17

22.	安装	17
23.	发电机	17
24.	测前准备	17
25.	操作	17
26.	观测的安排	17
27.	反射镜站	17
28.	校正	18
F. 计标方法		19
29.	符号	19
30.	常数	20
31.	程序	21
32.	称例	22
33.	归标到椭球面	27

附 录

1.	观测值摘要	28
2.	观测记录格式	35
3.	讯号	36
4.	杂录	37
5.	人员名单	39
6.	光速的计标	40

4. 总述

1. 引言

在最近几年中，瑞典的贝格斯特朗博士应用光速于距离的精密测量。

距离是这样测得的：用一架专门的仪器发出光束，测出发射的瞬间至该光束被一反光镜反射而返回原处的瞬间的时间间隔，反光镜置于待测距离的另一端。若光速已知，则可称出距离。

此种专门仪器称为光速测距仪 (Geodimeter) 是斯德哥尔摩的 Aga 公司制造的。

我无意对该仪器作详尽的描述，因为在“英国 测量评论” (Empire Survey Review) 第 85 与 86 期、Aga 公司出版的手册以及其他技术书刊中已作了足够的说明。但是为了未读这些文献的人的便利，我扼要地叙述一下该仪器的特点。

2. 光速测距仪的理论

[此节中有该仪器原理部分 (包括图 1 图 2)，见 Aga 光速测距仪说明书第 2 节，此处不再译出。——译者]

此型光速测距仪备有两个晶体，其频率相差 1%。这样，可以测出已知概值准到 ± 750 公尺的距离。假若概值准到 7.5 公尺则严格地说，只需使用一个频率。可是，我们在这次试验中，总是使用两个频率，因为认为这样所得结果比较精确。

仪器的主要附件是反射镜。

平面镜是由贝格斯特朗博士创造的。其直径^径为 30 公分，镜上装有望远镜，以便精确照准，望远镜可用微动螺旋予以校正。平面镜对于振动非常敏感，要装在确实稳定的基座上。

立方体反射镜是由美国人设计的，用以代替平面镜，它包含 54 块玻璃。透镜装在一块柔^钢盘上，盘可牢固地安置在三角桌

的仪器墩上，因为它可以将光线正确地反射到光源，所以在观测时，它的照准与校正没有平面镜那样复杂。

我们在仪器站上使用了一个大帐篷，这样，对于仪器设备的保护，以及对于工作人员的便利，是很理想的。立方体反光或平面镜每晚都安置起来。

美国人供给了几套高频无线电机组以作仪器站与反射镜站的通讯工具，经证实，这是非常合用的。

实际测量时，要用5个人，三个人在仪器站，其中二人观测，第三人读温度、气压、和湿度并用无线电机组。其余两人在反射镜站。全组共8人，使能全昼夜守护仪器，其中还包括一个计标员。

B. 季度工作的记述

3. 任务

美国陆军制图局将试验一架美国所购置的光速测距仪，他们渴望在一条相当长的已精密丈量过的距离，例如三角测量的基线上进行试验。但是在美国没有适当的基线可用，因为那儿大多数的基线是沿平原上的铁路丈量的，因此他们要求我们合作，在我国进行这项量距工作，这对他们是件憾事，而对我们倒是件幸事。

我们那时希望能在我国最长的凯什内斯基线上进行，此后，直至夏季末尾，由我们自己的观测员学会使用这项仪器，以便作进一步的试验，我们决定至少要作这样的努力。在通到昔特兰群岛的狭长三角锁的最北端试验一下我国三角测量的结果。

4. 凯什内斯基线（第一次前往）

六月初，Mearns 和 McCall 先生由美国携仪器设备飞来。Mearns 是电子工程师，McCall 是测量师。

可惜，不论是美国人或是我们都不了解观测时要求完全黑暗，因此我们乐观地向 John O'Groats 出发，由于上述

要求，只能将仪器放在瓦什山，而将反射镜放在距离 $15\frac{1}{2}$ 哩的基线彼端斯派山，才能使仪器背向北方的朦明。

在此阶段，我们甚至冒失地探询达到肯特兰的船运事宜。

在两个失败的夜晚以后，我们利用一个山头，来缩短所测距离，这是一个三角点，位于基线当中。由于长途运输所致的仪器误差已校正，平面镜和立方体反射镜（即被镜反射系——译注）都经试用。

第四夜仍然失败，Mears 担心朦明太亮，担心仪器可能在某些黑暗的路途中受到损伤，担心当地海面生雾及下雾的坏条件，他就决定在 70 码以外安置一个迴转器，最后每人都大大宽慰，因为（仪器指零表的）指针跌落。并且陆军测量局的观测员 Smith 第一次练习了仪器的操作。

第五个夜晚，证实：我们缺乏足以获得测距结果的真正黑暗程度。在 1—4 哩的短距离上用平面镜或立方体反射镜，都可得出反应，但在 7 哩时，由立方体所反射的光束不够强，这由于天光黑暗程度不够，平面镜的光亮较强，但不够稳定，是否能用它测距，还很可疑。重要的问题是航海年历上载明在那个纬度上从五月底到七月中整夜都有航海朦明（Nautical twilight）。

5. 里奇威基线

由于美国人将于七月间回国，他们^和我们在一起的时间有限了，为了最好地利用他们来访的时间，惟有放弃此处，而立刻向南方转移，到列丁城与白马山间的测线点去，此线虽然较短，约 7 哩，但这是另一条已量的基线，称为里奇威基线。航海年历上刊载：每年的这个时期内那里有 $3\frac{1}{2}$ 小时无朦明。

七月一日将仪器安置于白马山上，不顾夏季的恶劣天气，连续进行试验，终于取得了测量成果。Smith 学会如何操作仪器，在和 Mears 轮流担任观测员。到七月十五日附近，我们已经有了

了大约 15 个测回的观测值，这些数值和丈量长度的平均差数约为 $1/400000$ ，这实在是很有希望的。

以后曾在几条较长的边上试验，虽然由于天气条件不好，以致所得结果没有任何价值，但我们仍然感到满意，因为那时黑夜已经变长而可测凯什内斯测距了。

可惜，Mearns 终于在七月廿二日回华盛顿去了，他已经推迟过他的归期，在 McCall 离去后曾单独留下过。Bickers 就锻炼成为陆军测量局人员中第二个、即后备的观测员，事实上他是和 Smith 轮流观测的，以消除任何“人差”，虽则我已不再相信有人差存在了。在里奇威的剩余时期内，天气一直不好，由于有满月，使它更坏。

6. 第一次检定

现在，航海年历上的记载是使我们对卡什内斯比较乐观了，但是在回到北方之前，利用这个机会检定了晶体频率和测高仪（即气压测高仪——译注），这是在国立物理试验所进行的。

7. 凯什内斯基线（第二次前往）

第二次在凯什内斯的日期是八月十三至廿六日，在此期间，虽则由于天气的缘故，只有七个夜晚可做观测，但仍获得一些成果，可惜，在凯什斯基线上特别是瓦什山今年很忙碌，这不仅是由于本项工作，也由于为了改正方位角而作的拉伯拉斯观测，以及由于其他美国人的需要。肯特兰群岛的萨沙沃同样是我们要去的，我们决定携光速测距仪飞往该群岛，等天文队做完凯什内斯的工作后再回来。

8. 肯特兰群岛（萨沙沃——费特勒）

该测线由恩斯特岛的萨沙沃起到费特勒岛的沃德山，是我国三角网中极北的一条边，其长度约与凯什内斯基线相当。

在正好两星期内获得了优良的成果，而没有受到初期的冬季暴风的影响。

9. 凯什内斯基线（最后一次前往）

观测组再度回到凯什内斯，在我们的期限的末尾，在一个星期的恶劣天气之后，在九月廿日到十月七日期中，获得了进一步的成果。

10. 检 定

这是我们现场试验的结束工作。将光速测距仪连同测高仪送到国立物理试验所在 Barrel, Froome, Essen 和 Cook 诸博士的指导下进行最后的检定*。在此期间，并对光速测距仪本身作了检定**。（*指气压读数误差和晶体频率的检定；**指 Z 值和 L 值的检定，参看 16.3 节和 29 节——译注）。

C. 成 果

11. 引 言

我想强调这一事实：我们初次的试验，限于在一条精密丈量过的基线上用光速测距仪作比较，以测验该仪器的精度，并测验我国一条弱的三角边。我们没有在较长的距离上和更好的场所进行测距，这仅仅是受到时间限制的缘故。

在此次试验中，只要能观测时就观测，以取得成果，而没有顾到天气条件是否合适。

有若干理由来抛弃某些成果（见附录 1），而对其他成果就难以断定哪些是不正常的了。我们舍弃了所有的又使用一个频率的结果，其余结果示如图 9, 10, 11。有些成果因为观测时天气实在坏，虽则已将它们绘在图上，但最后取平均值时，没有使用它们。此处所谓坏天气是指下雨、地面尘雾或是下雾——见 20 节。

曾试图找出其余成果与天气情况之间的关系（在凯什内斯天气变化特别厉害），但未成功。

12. 成果表

期 间	测 线 (第一个站 是仪器站)	光速测距 结 果 D (G)	基线丈量 结 果 D (C)	观测者	观测值 个 数	每观测 值的或 然误差	平均值的或然 误差	相对误差 (G-C) 的约值	附 註
1953									
七 月 5—29日	白马山, 列宁城 (里奇威 基线)	公尺 11260.697 .708 .704	公尺 11260.677	M* S M和S	5 9 14	公尺 ± 0.003 0.007 0.007	公尺 ± 0.002 0.002 0.002	$+1/560,000$ $+1/360,000$ $+1/420,000$	舍弃了三个观测值。由B观测的一些结果未用, 因为他是在练习。一般说来, 成果是很好地达到了三角测量的精度的。
八 月 13—24日 九月20日 至 十月五日	瓦什山, 斯敦山 (凯什内斯 基线)	24828.678 .707 .697 .698	24828.626	S S B S和B	3 7 6 16	$\pm 0.004^m$ 0.021 0.024 0.020	$\pm 0.002^m$ 0.008 0.010 0.005	$+1/480,000$ $+1/310,000$ $+1/350,000$ $+1/340,000$	23个观测值中舍弃了7个, 其中三个是第一次作业时测得的, 其余是第二次作业时测得的, 两次作业所得结果都不是良好的范例, 其主要由于天气坏, 在此情况下, $1/340,000$ 是可满意的, 而且比该地区的一等三角测量还好。
九 月 11—13日	萨沙次, 费特勒	23128.166 .170 .167	三角测量结果 23128.264	S B S和B	7 3 10	$\pm 0.006^m$ 0.007 0.006	$\pm 0.002^m$ 0.004 0.002	不能直接 比较	九月十二日, 由于天气情况, 舍弃了2个观测值, 此二者各为一个观测员所测。虽则此处不可能作直接比较, 但结果很好, 它给出一个优越的范例。

* S = Smith, B = Bickers, M = Mearns.

13. 平均海水面上的椭球面长度的比较。

期 间	测 线	高 度 (呎)	椭 球 面 长 度 (S)	
			光速测距	悬链丈量
1953 9 月 5—29日	白马山 列宁城	858.1	11260.209 ^m	11260.189 ^m
		914.7	.220	
		平均	.215	
八 月 13—24日 9月20日 —10月5日	瓦什山	408.7	24828.051	24828.000
			.080	
	斯派山	581.6	.070	
		平均	.071	

表中光速测距值的顺序与表 12 中所列者相同。

14. 各种数据的误差的影响

14.1 温 度

图表丁 (图 12) 所示温度改正几乎是直线性的——实际上当温度降低时它微微减小——因此, 在所有的温度情况下, 温度误差的影响大致相同, 由图表可看出, 每 1°C 的误差对距离 D 产生约 $1/1000000$ 的误差。

14.2 气 压

气压读数误差的影响随温度而变, 图表 P (图 13) 表示: 对于一定的气压误差而言, 当温度降低时, 误差的影响增大。在同一温度下这些曲线是直线性的, 因此, 若温度不变, 同样的气压误差对于距离 D 的影响是相同的, 而与气压值无关。在 -10°C 时

一个 10^{-12} 的气压误差影响 D 的 $1/238000$ ；在 0°C 时，
 $1/250000$ ，在 10°C 时， $1/263000$ ，在 20°C 时 $1/278000$ 。

14.3 湿度

图表 H (图 14) 中的湿度改正曲线非真线性，温度增高，则其影响增大。可是一般地说，湿度读数误差的影响是很小的；在图表中最高温度 30°C 时，由 60% 变到 100%，使 D 变化约 $1/1700,000$ 。

14.4 颜色

见图表 C (图 14)，由于滤光器的群频率已由厂家准确地检定过，它不致产生误差，玻璃中所用的染料未必有什么化学上的不稳定性。

14.5 频率变化 (下列字母的意义见 29 节)

根据下列等式：

$$U = 7.492552 \times 10^7 / f$$

$$D = k + UN$$

可证明：

$$dD = -df(D - k) / f$$

$$dD = -df D / 10^{-7}$$

因此， f 每变化 1 周/秒，使 D 产生 $1/10^7$ 之差。

14.6 高程误差

在同 D 化标刻 S ，或者在其反标时，此误差发生影响，就反标的情况而言 (见 33.3) 可证明在 h_1, h_2 变化 dh_1, dh_2 时：

$$dD = \frac{1}{2D} \left\{ \frac{K^2}{R} (dh_1 + dh_2) + 2(dh_1 - dh_2)(h_1 - h_2) \right\}$$

此微分式的第一项的变化与测线的长度成正比 (假定 $K = D$ ，且 dh_1 及 dh_2 为常量)，一般是很小的，当然这取决于 dh_1 及

dh_2 。设 $dh_1 = dh_2 = 5 \text{ 呎} = 1.5 \text{ m}$ ，很明显，第二项等于另，当 D 约为 30 公里时，第一项 $= dD = 0.008 \text{ m}$ 。若 dh_1 与 dh_2 的符号相反，而 h_1 与 h_2 之差较大，则第二项成为主要的，当距离缩短时，其影响增大，这因为它是与 D 成反比的。（假定 dh_1 ， dh_2 ， Δh 是常量），设 $dh_1 = -dh_2 = 5 \text{ 呎} = 1.5 \text{ m}$ ， $\Delta h = 100 \text{ m}$ ，则第二项为另，而第一项给出 dD ：

$$dD = 300/D \text{ 公尺}$$

在 30 公里时，它是 0.010 m ，在 3 公里时是 0.100 m 。当测线短而仪器站与反光镜站的高差大时，高程测量必需更准确。

15. 分析

各结果列于带有附注的表格中，虽则已使用或然误差来衡量观测值不符合的情况，但严格说来，仅当误差真正是偶然性质时，才能使用。可是，可以证明，所有的系统误差已经被仪器和操作方法所消除，因此，用或然误差作为判断标准可能是，也可能不是正确的，但可以相信，正确的可能性很大，因为在结果中没有显著的系统性迹象。贝格斯特朗也曾应用同样的判断标准。

详细的观测值（附录 1）表示：一般 f_1 的数值较大，这没有显明的理由。这未必是由于 f_1 的漂移的缘故，因为在国立物理实验所检定时， f_1 最大的变化为 13 周/秒，误差仅为 $1/770,000$ 。（见 14.5）

报告说明：在测验时 f_1 和 f_2 的偶然变化都是 ± 7 周/秒。平均的情况，由两频率所得长度之差是超过这个数字的，这种“不正常”的原因大概是在于仪器本身。由所得的成果来看，很难将此认作重要的问题。在这一方面，指出下列情形是有兴趣的，十月分，国立物理实验所检定乙和 L。时，大半的观测是用 f_2 进行的，可是，以 f_1 试验这些数值时，並沒有发现对 f_2 应该偏爱的理由，在

观测值中不会出现这种趋势。

在八月分前，没有知道两个测高仪的检定改正值，因此，在里奇威基线的全部过程以及在凯什内斯基线的首次作业中，都以测高仪读数应用为计称的数据。最大的检定改正值是10呎，相当于 0.3 mm Hg ，因而由于未顾及该改正值而产生的误差约为 $1/8000000$ （见14.2），这是完全可以忽略的。

16. 国立物理试验所的检定

16.1 测高仪

两个测高仪检定结果比较如下：

读 数 (呎)	测 高 仪 号 码			
	6 — 3714		6 — 3685	
	八月	十月	八月	十月
2000	+ 10	0	+ 10	+ 10
1500	+ 5	0	+ 10	+ 10
1000	+ 5	0	+ 10	+ 10
500	+ 5	+ 10	+ 5	+ 10

No. 6—3714 用于仪器站，No. 3—3685 用于反光镜站。

虽然改正值已变化，但其最大值仍为 +10 呎，在15节的末尾已经指出，这数值是微小的，因此它的变化也是不足道的。

16.2 晶体频率

晶体振荡器的频率 f_1 和 f_2 是根据国立物理试验所的标准频率测定的，第一次测定在 1953 年 8 月 7 日，第二次在 1953 年 10 月 12 日，在两次测定之间，仪器使用于苏格兰。在加热一小时后，所得结果如下：

f_1 9999 944 周/秒， 美国数据 1953 年 6 月

9999 932

1953 年 8 月 7 日

9999 945 周/秒,	美国数据	1953年10月12日
f_2 10 099 854 周/秒,	美国数据	1953年6月
10 099 855	,	1953年8月7日
10 099 853	,	1953年10月12日

16.2.1 在加热期中频率的漂移

在第一次试验时, 频率 f_1 于加热器打开后 即加测定, 发现在20分钟内, 它由9999 956周/秒降低到9999 932周/秒。此后, 漂移即被偶然变化或是由于加热器工作情况而产生的变化所掩盖。测定时室温为22°C。

16.2.2 频率的稳定性

在试验中, 测得两个频率环绕着各自的平均值变化都是7周/秒。这个变化值前面已经提到过。振荡器受到轻敲和振动时, 以及改变输出电压的控制时, 频率的变化没有超出过2周/秒。

陆军测量局所用的数值就是美国数据, 虽然在八月分 f_1 下降了12周/秒, 但在最后检定时它又回到与美国数据只差1周/秒之内, 所以认为是不重要的。

16.3 仪器常数 Z

曾暂时应用30节中所给的 Z 与 L_0 值, 国立物理试验所在十月间测定 f_1 与 f_2 时, 校核 $3Z$ 和 L_0 。他们作出结论: 应用的 Z 和 L_0 值没有显著的误差。

根据检定的结果, 一般可以说: 在观测过程中所采用的各项数据没有显著的误差。

D. 结论与所获教训

从我们经验以及这一季度用光速测距仪工作所得经验, 获得各种教训, 而所发现的其他问题, 对于今后的研究和实验也将是有益的。