

## 人造卫星激光测距试验

中国科学院上海天文台人卫测距组 中国科学院上海光机所二〇三组

## 提 要

为了研究地球动力学,利用脉冲红宝石激光器对带有逆向反射器的人造卫星进行了激光测距试验。试验地点在上海天文台佘山观测站,从1975年12月以来,多次测量了探险者29号(«Geos-A»)、探险者36号(«Geos-B»)和探险者27号(«BE-C»)三颗卫星的距离,最远达到2371公里,精度约2~3米。

## 一、概 况

利用激光可以测量地面站至人造卫星(需要装有逆向反射器)的距离。这是六十年代中期出现的一种新技术,是目前观测人卫最准确的手段,它大大超过了跟踪照相机和其他无线电方法的精度。经过十多年的努力,人卫照相机的最高精度仅达到1''(角秒)左右,对于2000公里远的卫星,相应的位置误

差为10米。由于受到大气折射等因素的影响,要得到比较大的改进,希望甚微。人卫激光测距仪受大气的影晌较小(由于光速在大气中变慢所引起),其距离改正值可以根据当地的气象资料作精确改正,在地平高度10°以上误差可以小于1厘米。因此,人卫测距技术比较容易获得2~3米的精度<sup>[1]</sup>。国外已研制成功第二代测距仪,估计精度在10厘米左右。预计1980年可能达到2厘米,即相对误差为 $1 \times 10^{-8} \sim 3 \times 10^{-9}$ <sup>[2]</sup>。

表1 一些带有逆向反射器的卫星

名 称	发射日期	轨道(公里)	倾角(度)	周期(分)	反 射 器 块 数	重量(公斤)
探险者22号(BE-B)	1964.10.10	1086×882	79.9	104.75	360 (有效反射面积80厘米 <sup>2</sup> )	52
探险者27号(BE-C)	1965.4.29	1314×936	41.2	107.75	360(80)	60
探险者29号(Geos-A)	1965.11.6	2284×1007	59.4	120.30	334(940)	175
王冠1(D1-C)	1967.2.8	1347×572	40.0	104.30	144(20~100)	23
王冠2(D1-D)	1967.2.15	1878×594	39.5	110.22	144(20~100)	23
探险者36号(Geos-B)	1968.1.11	1582×1079	105.8	112.28	400(1100)	209
风神(Peole)	1970.12.12	860×730	15.0	98.43		
TimationIII	1974.7.14	13748×13471	124.7	468.7	(540)	
Starlette	1975.2.6	1107×805	49.8	104.1	60(101)	47
探险者53(Geos-C)	1975.4.9	852×834	114.9	101.7	270(3000)	340
激光地球动力学卫星(Lageos)	1976.5.4	5937×5874	109.89	225.41	426(257)	410

人卫测距的主要目的在于根据测距资料,得出卫星的精确轨道,并根据轨道的微小变化去研究地球动力学的许多课题(如:地球引力场、地极移动、板块运动、固体潮等),还可以进行人卫大地联测,测定长达几千公里的基线以及测站的地心坐标。因此,在天文学、地球物理、大地测量、地震预报以及国防上均有着重大的意义。

目前,这类带反射器的人卫已有十多颗,列于表 1,其中《激光地球动力学卫星》(Lag-eos)特别适于精密测量,具有重大价值。国外目前已有二十多个人卫激光测距站。为了研究地球动力学和测地目的,最近,国际空间委员会已组织大规模的国际性合作<sup>[3]</sup>。几年来,美国宇航局在北美西部圣安德烈斯大断层附近,利用人卫测距技术研究地震预报,并准备设立若干流动站,在全球范围内开展观测,希望将来建立全球地震预报模型<sup>[4]</sup>。

上海天文台为了研究地球动力学,与上海光机所协作,遵照毛主席“独立自主,自力更生”的方针,从一九七二年起开展了人卫激光测距仪的研制工作。在毛主席革命路线的指引下,终于取得了初步的成功,在一九七五年十二月一日第一次得到了人卫的准确距离。

## 二、仪器情况

整个系统共分四部分:激光器及发射部分;接收部分;瞄准镜与跟踪机架;数据记录部分。图 1 是仪器的方框图。

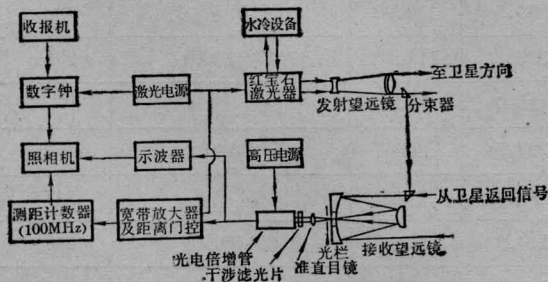


图 1 人卫激光测距仪方框图

### 1. 激光器及发射部分

激光器由上海光机所研制,工作物质红宝石棒  $\phi 12 \times 150$  毫米,用一根直管氙灯激励,椭圆柱聚光腔,水循环冷却。由于采用了 O 型密封圈,椭圆柱聚光腔可随时卸下来抛光(不影响激光输出),整个器件比较稳定。调 Q 方式采用隐化菁甲醇溶液。激光电源采用自动扫描恒流充电线路,由天文台研制,工作中得到上海市区水电油漆工程队大力协助。总电容量 2000 微法,充电电压 1400~1600 伏,总输入能量为 2000~2500 焦耳,瞬时输出能量 2.5~3 焦耳,脉冲宽度(半宽)25 毫微秒,瞬时输出功率为 100~120 兆瓦,发散角 8~10 毫弧度,重复率 12~60 次/分钟。发射望远镜为伽里略式,口径  $\phi 120$  毫米,放大倍数 8。经过发射镜后,激光发散度约为 1~1.2 毫弧度。

### 2. 接收部分

接收望远镜是卡塞格棱系统,口径 300 毫米,焦距 2100 毫米,视场光阑 10' (角分),干涉滤光片带宽 70 埃左右,透过率 70~75%。光电接收装置及测距计数器由天文台研制。接收器件采用光电倍增管(EMI9558B 或 9558QB),光阴极 S-20,在 6943 埃附近量子效率 3% 左右。管子工作时,增益约为  $5 \times 10^6$ ,由调节光电倍增管的高压来控制。目前接收器的探测阈值约为 20~30 个光电子。在室温 25°C 左右,管子的噪声仍不很大,可以正常工作。

测距计数器用于测量激光脉冲主波、回波往返的时间间隔,由宽带放大、整形器、导向双稳、门控电路、门电路、自动延时复位、测距盲区电路、100 兆周时标、计数单元和电源组成,其中 100 兆周时标和计数单元部分用上海无线电仪器厂生产的 PS-43 数字频率计。晶振稳定度  $2 \times 10^{-8}$ /天,距离分辨率  $\pm 1.5$  米。

测距计数器输入灵敏度最高约 10 毫伏,配合特制衰减器,灵敏度可以调节。该计数

器对于前沿 3 毫微秒的脉冲讯号不会带来任何畸变。

为了观测主、回波激光脉冲,配备了一台 VP-556A 型 200 兆周双线示波器。

### 3. 跟踪机架与瞄准镜

跟踪机架是光机所原有的一台地平式经纬仪,由两个观测手分别控制方位、高度两个手轮,进行目视跟踪。目前,这台仪器仅能在夜晚工作。为了瞄准卫星,有两个导星镜,口径 90 毫米,视场  $4^\circ$ ,放大倍数 15 倍。可以看到 8 等左右的卫星。

### 4. 数据记录部分

为了记录每次激光发射的准确时刻,即记下与卫星距离相对应的观测时刻(北京时间),我们研制了数字钟,采用了 MOS 集成电路,晶振稳定度  $1 \times 10^{-9}$ /天,分辨率  $\pm 0.1$  毫秒(今后分辨率可达到  $\pm 10$  微秒),每发射一次激光,数字钟即自动瞬时取样并显示。

利用时间讯号接收机(M10型)接收 BPV 时号,进行比对。如要保证  $\pm 0.1 \sim \pm 10$  微秒的精度,今后必须配备铷钟,并接收甚低频时号。

计数器与数字钟均用数字显示,用示波器照相机 SB-408B 拍摄记录。

## 三、测距能力估算

下面对我们整套系统的测距能力作一些估算。回波信号的大小,可以根据以下距离方程估算:

$$S = \frac{3.5 \times 10^{18} \cdot E \cdot A_s \cdot A_r \cdot T^2 \cdot K_t \cdot K_r}{R^4 \cdot \Omega_t \cdot \Omega_s} \text{ (光子)} \quad (1)$$

式中  $S$ ——回波信号的强度(光子)

$E$ ——激光能量(焦耳),取 3 焦耳

$A_s$ ——卫星上反射器的有效反射面积,“探险者 27 号”为 80 厘米<sup>2</sup>,  
“探险者 29 号”为 940 厘米<sup>2</sup>

$A_r$ ——接收镜的有效面积(厘米<sup>2</sup>),取

640 厘米<sup>2</sup>

$T$ ——在 6943 埃处的大气透过率,卫星高度  $40^\circ$  左右,对于余山取  $T^2 = 0.3$

$K_t$ ——发射系统的效率(透射系数),取 0.7

$K_r$ ——接收系统的效率(包括干涉滤光片),取 0.4

$R$ ——卫星的斜距,取 1500 公里

$\Omega_t$ ——激光发散角,取 1.2 毫弧度

$\Omega_s$ ——卫星上反射器的发散角(立体角)

E-29-20''

E-27-12''

可以算得

$S = 2.8 \times 10^4$  (光子) 对“E-27”

$11.2 \times 10^4$  (光子) 对“E-29”

如果取光电倍增管量子效率  $\eta = 0.03$ ,并考虑到实际收到的光子数比理论计算要小 13 分贝(这是经验数据,主要由于卫星速度光行差效应、后向反射器性能不佳等因素造成)。则可收到的光电子数为:

对“E-27” 42 个光电子

对“E-29” 168 个光电子

如果探测阈值为 30 个光电子,用上式亦可以算出,对于“E-29”,可以测量的最远距离约为 2300 公里;在天气极好的情况,可以达到 2500 公里,如果再要提高作用距离,那就必须采取措施,如提高接收器的灵敏度、压低光电倍增管的暗电流噪声以及减小发射束宽等。

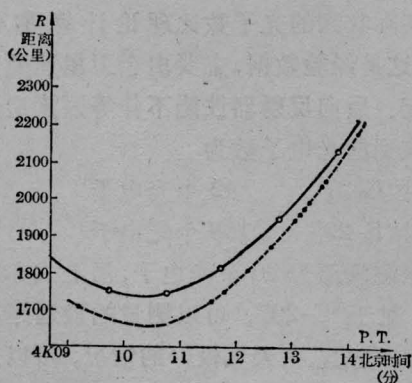
## 四、观测结果

在测距试验前,必须严格调整三轴(瞄准镜、发射镜和接收镜的光轴)平行。我们是以接收镜为主,利用靶板(1.3 公里远)调整激光光束(通过发射镜以后)的方向与之平行。一般是在黄昏时进行调试,将静态激光打向

靶板, 观察激光光斑与十字丝是否重合。瞄准镜与接收镜是通过观察北极星来校准的。调整工作比较简便。

观测室建造在上海西南郊余山顶上(上海天文台余山站), 大小是  $6 \times 7$  米<sup>2</sup>, 活动屋顶大小  $5 \times 5$  米<sup>2</sup>。测距仪置于室内一两米高的圆台上, 以便对地面目标进行测距试验及调试仪器。电子设备在室内东侧。

一九七五年下半年以来, 上海天文台二室党支部根据毛主席“集中优势兵力”打歼灭战的思想, 全室动员, 群策群力, 日夜奋战, 进展较快。除数字钟外, 所有设备在十一月中旬全部准备就绪。随后, 就进入紧张的实测阶段。在十二月一日凌晨对《探险者 29 号》(Geos-A) 进行了第一次测距试验, 获得初步成功。在两分钟时间内, 共发射了十七次, 其中记下了三次距离值, 经验证, 与预报值完全相符。



对象: 探险者 29 号(Geos-A)

日期: 1976.1.13. 北京时间 4 时 09 分-4 时 15 分

虚线 表示激光实测距离。

实线 表示预报的距离(根据目视观测计算)

图 2 激光实测距离与预报距离的比较  
(显然两者之间存在系统差, 可见利用测距资料能改进轨道参数)

随后在十二月廿六日, 对《探险者 27 号》(即 BE-C) 进行了成功的测距, 1976 年 1 月份, 又对《探险者 29 号》进行了多次测距, 均获成功。1976 年 7 月, 又对《探险者 36 号》(即 Geos-B) 进行了拦截和激光测距。此时数字钟及记时系统已投入使用, 多次得到完整的

激光测距资料, 这些资料已用于改进卫星轨道。综合这两段时间的观测情况, 最远距离为 2371.531 公里, 最低角度(高度角)  $37^\circ$ , 一圈中最多测到十四个距离值, 命中率达 30~40% 左右。图 2 是 1976 年 1 月 13 日对《探险者 29 号》实测距离值与根据目视观测计算的距离值之间的比较。显然二者之间存在系统差, 测得的距离要近几十公里, 这是由于目视资料的误差太大所造成。由此可见, 激光测距的结果将大大有助于改进人卫的轨道计算。

根据实测的最远距离与理论估算的距离相比, 可以认为本系统各部分的调整是符合要求的。

## 五、测量结果的处理与精度估算

在我们的系统中, 测距计数器记录的是激光从地面到卫星往返的时间间隔  $\tau$ , 真正的卫星距离  $r$ , 要按下式计算:

$$r = \frac{c}{2} \cdot \tau - \Delta r_1 - \Delta r_2 \quad (2)$$

式中  $c$ ——真空中的光速, 取 299792.46 公里/秒;

$\Delta r_1$ ——大气改正, 由于光速在大气中变慢所引起。可按 [5, 6] 给出的公式计算;

$\Delta r_2$ ——整个测距系统的迟滞差, 可由测量地面已知的距离得出。

每次激光发射时刻用 UTC 系统, 需要准确到  $\pm 0.1$  毫秒左右, 记录下来的时刻  $T_0$ , 需按下列公式换算为准确的时刻  $T$ :

$$T = T_0 + \frac{\tau}{2} + \Delta t \quad (3)$$

式中,  $\Delta t$ ——激光发射的延迟时间(一般  $T_0$  是触发氙灯的时刻, 而激光输出的时刻往往要迟几百微秒, 在我们系统为 0.5 毫秒左右, 可用 1 兆周的计数器作记录)。

激光测距的精度主要取决于计数器的分

辨率以及激光的脉冲宽度。此外,也与回波信号的强度、接收器件(如光电倍增管)的频率响应等有关。

另外,根据对地面目标的测距试验,亦可以估计系统的测距精度。我们曾对一个目标(11.576公里,有反射器)进行了32次测距,对回波进行人为衰减,用脉冲前沿不同的部位去关闭计数器,测距的距离值的弥散(均方差)为 $\pm 2.4$ 米。

因此我们认为,本系统目前的测距精度约为2~3米左右。

以上试验是很初步的,有待改进。工作中得到紫金山天文台人卫室的大力协助,特表感谢。

### 参 考 资 料

- [1] C. G. Lehr; *IEEE. Trans. Geosci. Electron.*, **GE-7**, 261 (1969).
- [2] T. E. Megumigal *et al.*, NASA N75-30541(1975)
- [3] *Cospar Information Bulletin*, No. 76(1976).
- [4] *A. W & S. T.*, **102**, No. 19, 36(1975).
- [5] J. W. Marini, NASA N74-15150(1974).
- [6] D. L. Zanter *et al.*, NASA N76-18435,(1976).

## 应用激光快速遥测热轧钢带的厚度

丁士豪 华伟亢

(上海交通大学激光研究室)

目前国内不少单位应用电感、电容、射线及微波等多种方法测量各种板材的厚度,但 these 方法都有些共同的弱点,譬如:对材料的性质、温度、轧制过程中材料跳动情况以及轧制速度都有较严的要求,其适应性也不大。尤其在热轧钢带现场高温、快速轧制、钢带剧烈弹跳等恶劣条件下更难以采用这些方法来测量厚度。我们经过一段时间的摸索和试验,发现采用激光测厚方法,能适应其他测厚技术难以适应的热轧测量的条件,适用范围也较广。与其他方法相比,应用激光测厚具有其独特的优点:

(1) 测量速度快。允许被测物以5米/秒左右的速度通过,能在被测物快速运动状态下自动、迅速测出厚度。

(2) 被测物跳动对测量影响较小。被测钢带上下弹跳在25~100毫米(甚至更大)范围内仍能正常地进行测量。

(3) 测量范围较宽。可测0~70毫米不同厚度的材料(以被测材料上下跳动距离不超过最大测量范围为限)。适当选择系统,也可测更厚的材料。

(4) 不受被测材料的温度影响。对冷轧钢带或热轧炽红钢板均能适应。

(5) 测厚精度较高。适当选择系统,相对精度可在 $10^{-2} \sim 4 \times 10^{-5}$ 数量级。

(6) 对被测材料的适应性较强。能用于热轧、冷轧测量各种金属或非金属、绝缘板材、带材等的厚度。

### 一、基本 原 理

应用光电原理进行测厚是近年来采用的一种较新技术。早期曾采用一种三角测量法,但在许多情况下,这种方法往往受到结构的限制,系统较复杂,且测厚精度也不大。现在