

# 用于 LAGEOS 测距的超短脉冲激光系统

何慧娟 李永春 顾圣如 钱林兴 赵隆兴

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

谭德同 肖焱焱 陈婉珍 杨福民

(中国科学院上海天文台)

## 提 要

本文报道一个 Nd:YAG 超短脉冲激光系统。该系统在  $1.06\ \mu\text{m}$  波长处的单脉冲输出能量大于 100 mJ, 经倍频后获得  $0.53\ \mu\text{m}$  输出大于 50 mJ。该系统在上海天文台主镜为  $\phi 600\ \text{mm}$  的测距仪上使用, 测到了激光地球动力卫星 (LAGEOS), 测距能力 8000 km, 测距精度 5 cm 左右。

## 一、引 言

用激光对人造卫星的测距已从第一代发展到第二代, 近几年已经进入第三代。激光人卫测距仪转代的重要标志之一是测距精度, 测距精度又直接依赖于作为发射光源的激光器的脉宽。第一代测距仪的精度是米级, 第二代为分米级, 第三代则达到厘米级。美国宇航局 (NASA) 的流动站都采用了几百 ps 的锁模激光器, 建立了第三代激光人卫测距仪, 所用激光器大部分是夕而凡尼亚公司生产的主动锁模激光系统, 该系统庞大, 造价昂贵, 开关元件寿命影响了整个系统的寿命。八十年代初, 纯被动高功率锁模激光器已有商品, 有些台站, 例如英国皇家格林威治天文台与霍尔大学合作<sup>[1]</sup>, 就是采用这种系统, 其脉宽 150 ps, 输出单脉冲能量 30 mJ。由于纯被动锁模脉冲是由被动开关染料在自发辐射荧光的随机噪声中建立起来的, 它的锁模概率较低, 再现性差, 在重复率运转下, 每次之间的幅度抖动大,  $\sim 150\%$ , 并经常出现卫星脉冲。

1974 年报道了腔内附加主动调制器以改进被动锁模激光器的稳定性<sup>[6]</sup>, 采用了一个高电压 100 MHz 射频信号调制的普克尔盒, 使用不便。1978 年报道了脉冲序列振幅稳定性改进到  $\pm 5\%$  的 Nd 玻璃激光器<sup>[3]</sup>。文献[4]报道了一个 1 Hz 重复率下运转的 Nd:YAG 激光器, 但没给出详细的性能。

我们在 1981 年研制了重复率的主被动 Nd:YAG 锁模激光器, 采用声光调制器作为主动锁模元件, 改进了被动锁模激光器的稳定性, 使锁模概率达到 100%, 幅度稳定性在 10 Hz 时达到  $\pm 2\%$ 。对高重复率运转的腔热稳定性进行了研究<sup>[5]</sup>, 使振荡器的重复率达到 30 Hz。经过单脉冲选择器可获得 0.5~1 mJ 的单脉冲输出, 经两级放大器, 在  $1.06\ \mu\text{m}$  波长上可得到大于 100 mJ 的输出。该超短脉冲激光系统已在上海天文台与主镜口径为  $\phi 600\ \text{mm}$  的人卫测距仪组合, 在我国建立第一台第三代激光人卫测距仪的实验系统。对激光地球动力

卫星(LAGEOS)的测量表明,其测距能力达 8000 km,测距精度达 5 cm。

## 二、超短脉冲激光系统

本系统示于图 1, 激光振荡器产生序列脉冲, 由单脉冲选择器选出单脉冲, 经二级放大器放大, 用 II 类匹配方式的 KDP 晶体的非线性效应进行倍频, 输出  $0.53 \mu\text{m}$  的绿光。系统内插入三个二倍扩束镜。其中前两个用来扩大激光斑的尺寸, 以充满激光棒获得有效放大, 并降低棒内的功率密度, 防止激光介质在高功率下的非线性破坏, 第三个扩束镜用来降低功率密度, 防止对倍频晶体的损坏, 并改善方向性, 提高倍频效率。

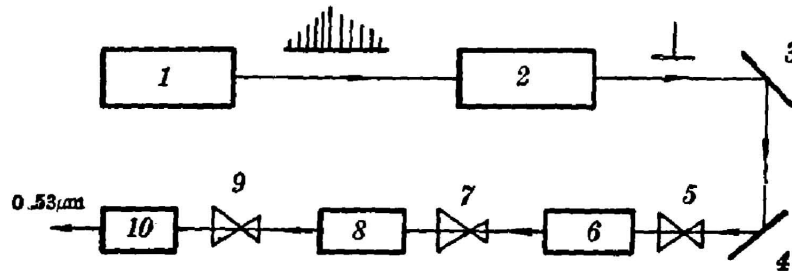


Fig. 1 Schematic diagram of repetition rate ultra-short pulse laser system  
1—Ultra-short pulse oscillator, 2—Single pulse selector, 3, 4—45° mirrors,  
5, 7, 9—Beam expanders, 6—First stage of amplifier 8—Second stage of amplifier 10—Harmonic generator

该系统中的重复率超短脉冲振荡器具有高重复率、高锁模概率和高稳定性等特点。采用主被动锁模方式, 对谐振腔在锁模方式下的热稳定性进行了研究<sup>[5]</sup>, 获得了一套计算机模拟设计方法, 在实验上得到了好的符合。谐振腔的  $G$  因子为:

$$G_1 = \frac{G_2}{2G_2^2 + 2\alpha G_2 + \alpha^2}, \quad (1)$$

其中  $\alpha = \frac{a}{b}$ 。  $a$ 、 $b$  分别是输出镜和后腔镜到内透镜的距离。在热稳条件下, 在激光器前、后腔镜上和激光棒上的光斑尺寸为:

$$W_1 = \frac{\lambda L}{\pi} \frac{2G_2^2 + 2\alpha G_2 + \alpha^2}{G_2 + \alpha}, \quad (2)$$

$$W_2 = \frac{\lambda L}{\pi} \frac{1}{G_2 + \alpha}, \quad (3)$$

$$W_3 = \frac{\lambda L}{\pi} \frac{[2G_2^2 + 3\alpha G_2 + \alpha^2]^2}{(1 + \alpha^2)(G_2 + \alpha)[2G_2 + 2\alpha G_2 + \alpha^2]}, \quad (4)$$

模体积

$$V = \pi l W_3^2 = \pi l W_1^2 \left[ \left( 1 - \frac{d_1}{R_1} \right)^2 + \left( \frac{d_1 \lambda}{\pi W_1^2} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

根据以上几个主要表达式可以用计算机作出模拟计算, 并根据腔内元件尺寸, 选择激光振荡器正常运转的参数。

采用声光调制器和染料分别作为主动锁模和被动锁模元件, 获得主被动锁模运转。声光调制器的介质是熔石英, 长 21 mm, 换能片是  $Y36^\circ$  切割的  $\text{LiNbO}_3$  片, 换能片与熔石英两

者用钢压连接,染料是五甲川溶于1,2-二氯乙烷的溶液,染料盒与后腔镜组成一体,并带有循环系统,使染料置换速率满足重复频率。

为了降低随机性,提高超短脉冲的再现性,在腔内插入一个主动声光调制器作为脉冲的预选,它形成了一个瞬时窗口,窗口的宽度是<sup>[6]</sup>

$$\tau = \frac{4 \ln 2}{\pi c} \frac{L}{\sqrt{l_2 N}} \left\{ 1 + \frac{2 - l_2}{2} \left( \frac{\pi \omega}{2L} \right)^2 \right\}, \quad (6)$$

其中  $L$  是腔长,  $l_2$  是正弦调制引起的最大单程损耗,  $\omega$  是调制器与最近腔镜间的距离,  $N$  是线性段内激光在腔内往返次数。只有在窗口宽度内的脉冲才能振荡,窗口外的其余脉冲都被抑制了。从上式可见,  $\tau$  随  $\omega$  的减小而减小,即调制器应尽可能靠近谐振腔的腔镜。根据实际测量,  $\omega$  在几个厘米内,不会使激光器阈值明显增加,也不会使稳定性明显下降,这是因为 Nd:YAG 激光器处于高增益状态,在几厘米内由于  $\omega$  引起的恒定损耗的作用极微。(6)式适用于连续锁模激光器,本文仅用(6)式来定性地描述窗口宽度。

振荡器的光路图见图2。为了适合激光人卫测距仪上接收系统的响应时间,把脉宽从30 ps加宽到120 ps,用F-P代替普通楔形输出镜,腔内外加一片辅助F-P,改变F-P的厚度和反射率以改变脉冲宽度。

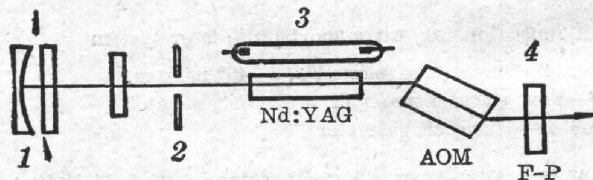


Fig. 2 High repetition rate ultra-short pulse oscillator  
1—Rear mirror contacted by dye cell with circulating system  
2—Transverse mode selecting aperture 3—Xe-flash lamp  
4—Front mirror

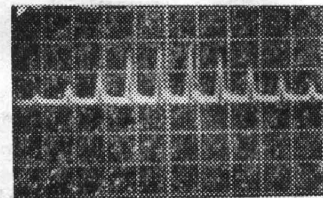


Fig. 3 Mode-locked train of pulses (Time scale: 10 ns/cm)

图3给出序列脉冲的包络图,这是70个脉冲的重复曝光,证明脉冲序列的稳定性是好的。

脉冲宽度用西安光机所研制的条纹相机测量,输出倍频后分成两路,一路输入到强流

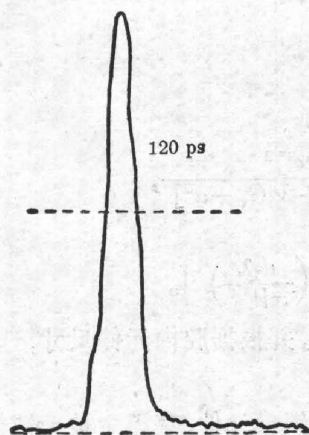


Fig. 4 Pulse duration measured by streak camera

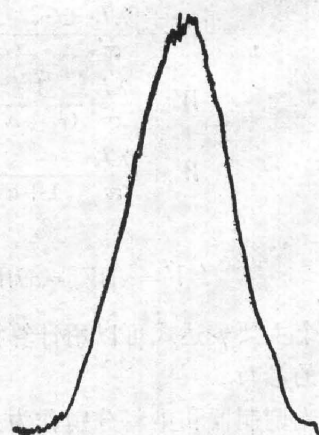


Fig. 5 Scanning curve of output near field spot

管,产生脉冲电信号触发条纹管,另一路输入到条纹管即产生条纹信号。图 4 是条纹相机的记录曲线。输出光斑是  $TEM_{00}$  模,用黑度计对场图照片进行扫迹,可得到图 5 所示的扫迹曲线。

用示波器测量了激光振荡器在 10 Hz 运转时脉冲包络的取样图,它显示出序列脉冲包络峰值稳定性。图 6 是用存储示波器得到的图,在 10 Hz 时取样 30 次,从图中 30 个脉冲可算得稳定性为  $\sim \pm 2\%$ 。

超短脉冲振荡器输出的是序列脉冲,为获得单脉冲,需经一个单脉冲选择器(见图 7)。光路由两个以上正交方式放置的偏振棱镜和一个  $LiNbO_3$  普克尔盒组成。电路上由一个 PIN 二极管接收序列脉冲,而产生的信号经放大后,触发高压开关管。由 Blumlein 成形线产生一个前沿约 2 ns 的高压脉冲,在特定时刻加在普克尔盒的两个电极上;在序列脉冲中,被高压脉冲所套上的那个脉冲即为被选出的单脉冲。

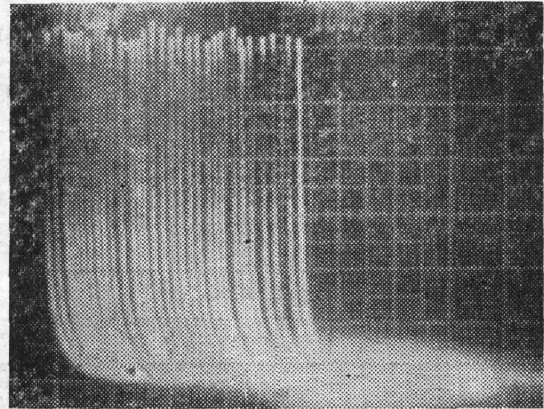


Fig. 6 Stability of pulse train (10 Hz)

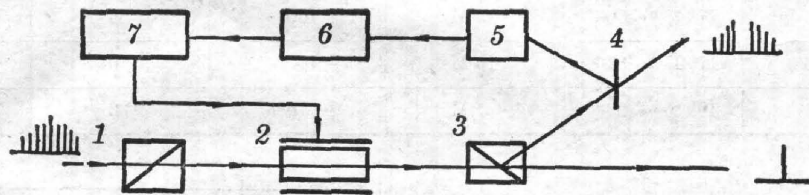


Fig. 7 Single pulse selector

1, 3—Glan prism; 2—Pockels cell; 4—Reflective mirror; 5—Photodetector;  
6—Trigger amplifier; 7—Forming network of high voltage pulse

上述选出的单脉冲经扩束后,输入到两级放大器,可获得大于 100 mJ 的  $1.06 \mu\text{m}$  激光输出,由 II 类 KDP 晶体倍频,可得到大于 50 mJ 的单脉冲绿光输出。

Nd:YAG 超短脉冲激光系统的单脉冲输出能量是 30~50 mJ 可调 ( $0.53 \mu\text{m}$ ),脉宽 120 ps,模式  $TEM_{00}$ ,方向性 0.5 mrad,重复率 1 Hz、5 Hz、10 Hz。

### 三、在激光人卫测距上的应用

Nd:YAG 超短脉冲激光系统与主镜为  $\phi 600 \text{ mm}$  的激光人卫测距仪组合,组建了我国第一台第三代激光人卫测距仪的实验系统。该系统在 1985 年 12 月 12 日首次测得了激光地球动力卫星的距离,测量数据发送到国际激光数据处理收集中心之一——美国宇航局戈达德空间飞行中心激光跟踪网(NASA/GLTN),他们把分析结果用电传打回。表 1 给出了超短脉冲激光系统的实际观测和我们分析结果的汇总表。表 2 是 NASA/GLTN 分析的结果。图 8、9 分别给出了 1985 年 12 月 16 日和 1986 年 1 月 8 日对 LAGEOS 的实测距离曲线。在整个弧段上有一部分没有数据,这是偶然故障造成,并非系统固有的毛病。从表 1、2 的分

析说明,我们使用了 Nd:YAG 超短脉冲激光系统,使测距精度达到了 5 cm 左右,已经达到了国外第三代测距系统的先进水平。

Table 1 Summary of Observation

| Observation Date | Observation Time                                 | Length of arc | Observation Points | Internal Consistent accuracy |
|------------------|--|---------------|--------------------|------------------------------|
| Dec. 12. 1985    | 18 <sup>h</sup> 40 <sup>m</sup> ~59 <sup>m</sup> | 11 M          | 182                | 6.3 cm                       |
| Dec. 16. 1985    | 20 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup> ~41 <sup>m</sup> | 29 M          | 144                | 7.6 cm                       |
| Jan. 5. 1986     | 17 <sup>h</sup> 43 <sup>m</sup> ~56 <sup>m</sup> | 13 M          | 133                | 6.1 cm                       |
| Jan. 8. 1986     | 17 <sup>h</sup> 27 <sup>m</sup> ~37 <sup>m</sup> | 10 M          | 131                | 6.9 cm                       |
| Jan. 9. 1986     | 19 <sup>h</sup> 16 <sup>m</sup> ~23 <sup>m</sup> | 7 M           | 16                 | 5.0 cm                       |

Table 2 NASA/GLTN Analysis Results

| Observation Date | Observation Time                                 | Length of arc | Observation Points | Edited Points | Internal Consistent accuracy |
|------------------|--|---------------|--------------------|---------------|------------------------------|
| Dec. 12. 1985    | 18 <sup>h</sup> 48 <sup>m</sup> ~59 <sup>m</sup> | 11 M          | 80                 | 19            | 7.2 cm                       |
| Dec. 16. 1985    | 20 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup> ~41 <sup>m</sup> | 29 M          | 50                 | 1             | 4.9 cm                       |
| Jan. 5. 1986     | 17 <sup>h</sup> 43 <sup>m</sup> ~56 <sup>m</sup> | 13 M          | 100                | 3             | 4.5 cm                       |
| Jan. 8. 1986     | 17 <sup>h</sup> 27 <sup>m</sup> ~37 <sup>m</sup> | 10 M          | 100                | 0             | 3.5 cm                       |
| Jan. 9. 1986     | 19 <sup>h</sup> 16 <sup>m</sup> ~23 <sup>m</sup> | 7 M           | 16                 | 2             | 6.0 cm                       |

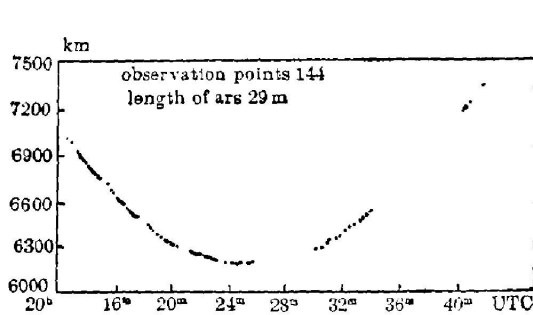


Fig. 8 Range measuring curve of LAGEOS on Dec. 16. 1985

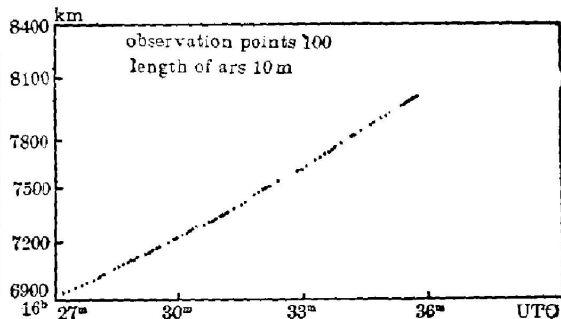


Fig. 9 Range measuring curve of LAGEOS on Jan. 8. 1986

## 考 参 文 献

- [1] D. R. Hull *et al.*; *I. C. L. Digest, Supplement*, (Guangzhou, China, 1983), 14.
- [2] B. C. Johnson *et al.*; *Tech. Digest, Int. Electron Devices Meeting*, 1974, p. 323.
- [3] W. Seka *et al.*; *JAP*, 1978, **49**, No. 4 (Apr), 3377.
- [4] B. B. Craig *et al.*; *2nd Int. Conf. Picosecond Phenomena*, (Berlin: Springer-Verlag, 1980), 253.
- [5] 何慧娟等;《中国激光》, 1983, **10**, No. 11 (Nov), 785.
- [6] S. Kishida *et al.*; *Opt. Commun.*, 1976, **18**, No. 1 (Jul), 19.

## Ultra-short pulse laser system used for ranging LAGEOS

HE HUIJUAN, LI YONGCHUN, GU SHENGRU, QIAN LINXING ZHAO LONGXING  
(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

TAN DETONG, XIAO ZHIQUN, CHENG WANZHEN AND YANG FUMING  
(*Shanghai Observatory, Academia Sinica*)

(Received 5 April 1986)

### Abstract

A new Nd:YAG ultra-short pulse laser system is reported. The single pulse energy of this system is more than 100 mJ at 1.06  $\mu\text{m}$ . Output single pulse energy at 0.53  $\mu\text{m}$  is more than 50 mJ. This laser system is used for ranging LAGEOS with  $\phi 600$  mm received telescope in Shanghai observatory. Its ranging distance is 8000 km. Ranging accuracy is about 5 cm.