

# 激光在海洋大气中传输时的闪烁与抖动

杨高潮 韩守春 刘晓春 邵石生

胡 明 饶瑞中 宋正方

(中国科学院安徽光机所, 合肥)

**摘要:** 本文报道了在大万山群岛进行的激光强度起伏(闪烁)和光束抖动(到达角起伏与等晕角)的实验结果, 并与同时测量的湍流强度数据作了比较。结果表明, 时值秋末冬初的南海海面大气的湍流是相当强的, 对激光传输的影响是很显著的。

## Scintillation and dancing of laser beam propagation in marine atmosphere

Yang Gaochao, Han Shouchung, Liu Xiaochung, Shao Shisheng

Hu Ming, Rao Ruizhong, Song Zhengfang

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

**Abstract:** In this paper, experimental results of intensity fluctuation (scintillation) and dancing (angle-of-arrival fluctuation and isoplanatic angle) of laser beam at Dawanshan Islands are reported. The results are compared with the data of turbulent intensity measured simultaneously. It is indicated that the turbulence in marine atmosphere of the South China Sea during late autumn and early winter is rather violent, and its effect on laser propagation is remarkable.

### 一、引 言

早在60年代初期, 人们已开始研究激光在海上应用的可能性, 目前已发展了机载海洋测深仪、测污雷达等多种激光工程。由于这些工程的激光束不可避免地要穿过海面大气, 受到大气湍流的影响, 因此, 研究这种环境中激光强度起伏(闪烁)和抖动(到达角起伏和等晕角)的特点, 对于海上激光工程的设计和应用是有实际意义的。

我们从1989年10月下旬至11月中旬在南海大万山群岛进行了激光闪烁与抖动的测量, 与此同时还观测了湍流强度, 以便了解大气本身的特点。本文对闪烁与抖动的观测结果作了报道, 并用现有理论作了分析。

## 二、测量概况

实验是在我国南海海域的大万山岛和小万山岛上进行的。选择了两种传输光程，距离分别为1800m和500m，基地设在大万山岛上的万山村西端，在作长距离实验时由设置在小万山岛东南部岩石上的反射镜回激光束，而作短距离实验时，则在海湾对面的岩石上架设激光器（直接光路）或反射镜（反射光路），光路距海面约12m。

闪烁与抖动实验中使用了He-Ne激光（ $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$ ），实验装置见图1。

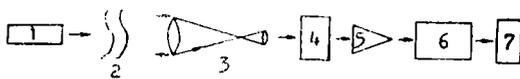


图1 实验装置简图

- 1—He-Ne激光 2—大气 3—接收望远镜 4—探测器 5—放大  
6—数据采集器 7—计算机

激光束未经望远镜直接发射（或经过平面反射镜反射）到 $\phi 200\text{mm}$ 的折射式接收望远镜上，由探测器转换成电信号，放大后经数据采集器送到微计算机进行处理。在闪烁测量时，探测器使用光电倍增管，在作抖动测量时则用四象限硅光电二极管，该探测器的非线性问题已用计算机作了修正。整个系统的最小分辨率

为 $0.78\mu\text{rad}$ ，测量总误差约为5%。测量误差与探测器的非线性和接收、发射系统的机械稳定度以及多路数据放大器的性能等直接有关。

## 三、实验结果

### 1. 闪烁

在11月7日至11月9日用反射光路测量了大万山与小万山之间He-Ne激光的闪烁，共观测了160组数据，数据处理方法同文献[1]。图2给出了11月8日从中午11时到晚上23时期间对数强度方差 $\sigma_{\ln I}^2$ 随时间的变化情况。图上所反映的情况是很典型的。这天早上高空有薄云，至12时30分左右转为多云至阴，16时后由多云转晴，直至夜间。闪烁强度明显地跟着天空状况而变化，夜间 $\sigma_{\ln I}^2$ 逐渐变弱，但仍比阴天时的大。这种变化主要是由太阳辐照造成的，我们以前曾多次观测到，无疑是符合一般规律的。

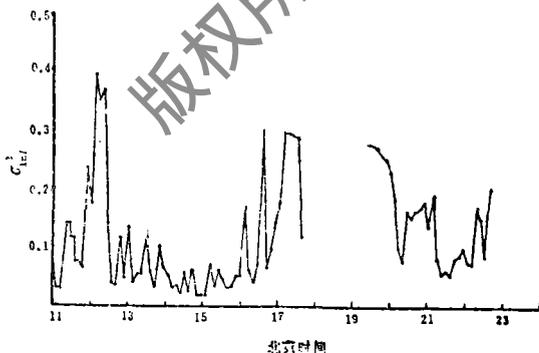


图2 闪烁的日变化 (1989.11.8.大万山)

从理论上说，反射光路的闪烁强度（球面波）为〔2〕

$$\sigma_{\ln I}^2 = 2 \times 0.496 C_n^2 k^{7/6} (2L)^{11/6} \quad (1)$$

式中， $C_n^2$ 为湍流强度， $k = 2\pi/\lambda$ ， $\lambda$ 为激光波长， $L$ 为传输距离，等式右边的因子2是反射光路的放大倍数，现在 $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$ ， $L = 1.8\text{km}$ ，由此可算得光路上的平均湍流强度为

$$C_n^2 = 2.092 \times 10^{-15} \sigma_{\ln I}^2 \quad (2)$$

上述公式是对点接收孔径而言的，实际使用的

的是 $\phi 200\text{mm}$ 的接收孔径，因此还需作孔径平滑因子修正。从理论曲线上可查得 $\Theta \approx 0.02$ ，因此

$$C_n^2 = 1.05 \times 10^{-13} \sigma_{\ln I}^2 \quad (3)$$

测得的  $\sigma_{1nl}^2$  最大达到0.7, 最小为0.02, 由此可知  $C_n^2$  的变化范围为  $2 \times 10^{-15} \sim 7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ , 这同用温度脉动测量的结果相当一致(后者最大达  $9 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ , 最小为  $1.7 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ )。至于逐点之间比较, 由于湍流探测器放置的地点不在光路上, 测量时间也不同步, 因而无法进行。但从平均而言, 闪烁强度白天平均为0.27 (11月9日11时至15时), 换算成  $C_n^2$  为  $2.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ , 小于温度脉动测得的白天平均结果 ( $5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ )。这是完全可以理解的, 因为光束行经的路程几乎完全是空旷的海面, 而湍流探测器放在山坡上, 地形的影响很大, 势必测得较强的湍流。

## 2. 抖动

光束抖动是利用四象限光电二极管系统进行的, 该系统的详细情况见文献〔3〕。我们在万山利用500m的光程测量了直接光路的抖动, 共取得38组大数据(见表1)。在该系统中同

表1 到达角标准差与等晕角测量值

日 期	时 间	$\sigma_a$	$C_n^2(\alpha)$	$\theta_0$	$C_n^2(\theta_0)$
11/09/89	20:08	7.54E-06	6.100177E-14	9.11E-06	3.71692E-14
11/09/89	20:28	3.09E-06	1.024511E-14	0.0000184	1.151729E-14
11/09/89	20:38	3.54E-06	1.344641E-14	0.0000139	1.838044E-14
11/09/89	20:48	3.32E-06	1.182704E-14	0.0000141	1.794794E-14
11/09/89	21:05	2.91E-06	9.086271E-15	0.0000159	1.469099E-14
11/09/89	21:17	3.31E-06	1.17559E-14	0.0000253	6.774007E-15
11/09/89	21:28	4.73E-06	2.400612E-14	7.74E-06	4.876913E-14
11/09/89	21:39	2.72E-06	7.938483E-15	0.0000277	5.824342E-15
11/10/89	09:45	0.000003	9.657001E-15	0.0000455	2.546992E-15
11/10/89	09:58	4.69E-06	2.360182E-14	0.000018	1.1947E-14
11/10/89	10:10	4.52E-06	2.192182E-14	0.0000134	1.953767E-14
11/10/89	10:28	3.89E-06	1.623674E-14	0.000018	1.1947E-14
11/10/89	10:38	5.24E-06	2.946201E-14	0.0000232	7.826484E-15
11/10/89	10:48	4.21E-06	1.901796E-14	0.0000235	7.660672E-15
11/10/89	11:11	3.95E-06	1.674148E-14	0.0000261	6.43151E-15
11/10/89	11:36	3.46E-06	1.284553E-14	0.0000196	1.036621E-14
11/10/89	11:48	5.08E-06	2.769027E-14	0.0000185	1.141372E-14
11/10/89	11:58	3.88E-06	1.615337E-14	0.0000151	1.601098E-14
11/10/89	12:15	4.32E-06	2.002475E-14	0.0000137	1.882979E-14
11/10/89	12:25	8.35E-06	7.481224E-14	5.65E-06	8.240728E-14
11/10/89	12:38	4.38E-06	2.058486E-14	0.0000176	1.240297E-14
11/10/89	12:50	3.83E-06	1.573973E-14	0.0000159	1.469099E-14
11/10/89	13:02	3.83E-06	1.573973E-14	0.000037	3.595097E-15
11/10/89	14:41	3.15E-06	1.064684E-14	0.0000439	2.703581E-15
11/10/89	14:51	0.0000034	1.240388E-14	0.0000353	3.888266E-15
11/10/89	15:02	2.43E-06	6.335958E-15	0.0000484	2.297762E-15
11/10/89	15:13	0.0000024	6.18048E-15	0.000044	2.693349E-15
11/10/89	15:25	5.73E-06	3.52297E-14	0.0000135	1.929703E-14
11/10/89	15:35	3.15E-06	1.064684E-14	0.0000269	6.115888E-15
11/10/89	15:46	3.37E-06	1.218596E-14	0.0000251	6.864213E-15
11/10/89	16:02	4.78E-06	2.451633E-14	0.0000173	1.276348E-14
11/10/89	16:28	2.28E-06	5.577883E-15	0.0000381	3.423781E-15
11/10/89	16:45	0.0000064	4.395008E-14	0.0000118	2.414963E-14
11/10/89	16:54	0.0000067	4.816697E-14	7.27E-06	5.413634E-14
11/10/89	17:08	4.62E-06	2.290254E-14	0.000016	1.453829E-14
11/10/89	17:19	2.46E-06	6.493367E-15	0.0000371	3.57896E-15
11/10/89	17:28	6.47E-06	4.491675E-14	5.94E-06	7.581168E-14
11/10/89	17:42	3.56E-06	1.359877E-14	9.78E-06	3.30229E-14

时还可测量光强起伏,利用理论公式推算了等晕角 $\theta_0$ 。到达角起伏和等晕角理论关系分别为

$$\sigma_a^2 = 2.912C_n^2 LD^{-1/3} \quad (4)$$

$$\theta_0 = 0.9676 [\log(1 + \sigma_a^2 / \bar{S}^2)] \quad (5)$$

式中, $D$ 为接收望远镜的孔径, $\sigma_a^2$ 为信号起伏方差, $\bar{S}$ 为信号平均值。由此可知,光程上的平均折射率结构常数 $C_n^2(\alpha)$ 和 $C_n^2(\theta_0)$ 是

$$C_n^2(\alpha) = 1.07 \times 10^{-3} \sigma_a^2 \quad (6)$$

$$C_n^2(\theta_0) = 1.48 \times 10^{-22} \theta_0^{-5/3} \quad (7)$$

对于(7)式已计及孔径平滑因子( $\Theta = 0.1$ )。

从表1可以看出,光束的均方根抖动角最大为 $8.4\mu\text{rad}$ ,最小测得 $2.3\mu\text{rad}$ ,相应的 $C_n^2(\alpha)$ 值为 $5.6 \times 10^{-15} \sim 7.5 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ ,这同闪烁一样,可以和温度脉动测量结果相比。至于最小没有测得 $2\mu\text{rad}$ 以下的原因,有可能同系统的误差有关。等晕角 $\theta_0$ 在 $5.7 \sim 48\mu\text{rad}$ 之间变化,所折算的 $C_n^2(\theta_0)$ 变化范围为 $2.3 \times 10^{-15} \sim 8.2 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ ,比较接近温度脉动测量的结果。

$\sigma_a$ 和 $\theta_0$ 是利用同一信号测量获得的,等效的湍流强度平均说来很一致,分别为 $2.09 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ 和 $1.75 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ ,但两者的相关系数却只达0.8左右。从理论上说振幅起伏与相位起伏应当是完全相关的,不完全相关的事实可能说明测量上存在一定问题。一些理论分析表明,等晕角测量应当使用 $\phi 10\text{mm}$ 左右的接收孔径<sup>[4]</sup>,而我们使用的是 $\phi 200\text{mm}$ 的接收望远镜;此外,是否还存在其它原因,比如说理论上的问题,我们将在以后的工作中加以探讨。

#### 四、小 结

闪烁、抖动的测量结果表明,时值秋末冬初的大万山群岛海域上面的大气湍流仍然相当强。如果按湍流强度与高度的关系 $Z^{-1/3}$ 推算到离海面1.5m处,则湍流强度大约为 $3 \times 10^{-14} \sim 1 \times 10^{-12} \text{m}^{-2/3}$ ,这基本上属于地面大气中等至强湍流的范围,其原因显然同当地的气候有关。由于纬度比较低(北纬 $21^\circ 56'$ ),虽然进入秋末冬初季节,而太阳辐照仍然强烈,平均气温可达到 $22^\circ\text{C} \sim 27^\circ\text{C}$ ,夜间温度也不低,21时的温度与早上9时的温度相当。我们的测量结果明显地反映了这种特点,因此,在设计和应用作为海面探测的激光工程时应充分注意上述特点。

此次实验工作得到了国家海洋局南海分局大万山海洋站的大力支持,特此致谢。

#### 参 考 文 献

- [1] 宋正方,孙毅义,顾慰渝 *et al.* 强湍流条件下激光闪烁的若干特性. 应用激光, 1983; 3(1): 7
- [2] 张逸新,宋正方,莫知本. 折叠式光路中激光束的大气闪烁. 中国激光, 1987; 14(3): 179
- [3] 宋正方,刘宏伟. 湍流大气中非共轴反射光束的到达角起伏(待发表)
- [4] Eaton F D, Peterson W A, Hines J R *et al.* Isoplanatic angle direct measurements and associated atmospheric conditions. Appl Opt, 1985; 24(19): 3264

# 新型连续可调激光衰减器

李国华 赵明山 于德洪 宋连科

(曲阜师范大学激光研究所, 曲阜)

**摘要:** 本文介绍一种基于偏光分束原理的新型光学衰减器, 理论分析和实验测量均表明, 该衰减器具有动态范围大、衰减比连续可调且与入射偏振态无关、不改变光束偏振态及空间分布特性等特点, 是一类较理想的激光衰减器件。

## Continuously adjustable attenuator for laser

Li Guohua, Zhao Mingshan, Yu Dehong, Song Lianke

(Laser Institute, Qufu Normal University)

**Abstract:** A new type of continuously adjustable optical attenuator based on the principle of polarization beam splitting is described. The results of both theoretical analyses and experimental measurement show that the device has advantages of large dynamic range, polarization-independent attenuation properties and no change in polarization state and space distribution of the beam.

### 一、引 言

光学衰减器是光学、特别是激光调制及应用技术中常用的器件。利用材料的吸收、反射或散射等特性研制的各种衰减器已有许多报道<sup>[1]</sup>。本文介绍一类基于偏光分束原理的新型光学衰减器, 该衰减器具有动态范围大、衰减比连续可调且与偏振无关、不改变光束偏振及空间分布特性等特点, 从而在激光调制及应用技术, 光纤通信及现代光学技术中具有广阔的应用前景。

\* \* \*

作者简介: 杨高潮, 男, 1956年1月出生。工程师。现从事激光大气传输研究工作。

韩守春, 男, 1943年10月出生。高级工程师。现从事激光大气传输研究工作。

刘晓春, 男, 1954年9月出生。工程师。现从事激光大气传输研究工作。

邵石生, 男, 1952年12月出生。实验师。现从事激光大气传输研究工作。

饶瑞中, 男, 1963年10月出生。助研。现从事激光大气传输研究工作。

胡 明, 男, 1963年6月出生。实验员。现从事激光大气传输研究工作。

宋正方, 男, 1935年12月出生。研究员。现从事激光大气传输研究工作。

收稿日期: 1990年2月22日。