

文章编号: 1007-5461(2005)04-0663-05

后向散射回波与信标光到达角起伏对比实验

张守川, 吴毅

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 介绍了后向散射回波与信标光到达角起伏的原理性对比实验。该实验通过对比的方法验证后向散射的到达角起伏是否可以反映大气湍流强度。实验结果验证了后向散射的到达角起伏可以反映大气湍流强度。并且分析了对比参数。

关键词: 大气光学; 大气湍流强度; 后向散射回波; 到达角起伏

中图分类号: P407.5

文献标识码: A

1 引言

大气湍流强度 (C_n^2) 及其廓线是研究激光在大气中传输的重要参数之一, 在激光大气传输的工程应用中必须对其进行实时测量。现有的测量大气湍流强度及其廓线的手段主要有探空式测量和风廓线微波雷达反演及声雷达测量法等, 对激光大气传输所要求的 C_n^2 及其廓线测量而言, 它们有着各自的不足。利用差分温度脉动测量 C_n^2 是在原理、技术和实际测量中非常成熟的手段, 该方法是通过温度传感器测出相距为 r 的两点温度, 得到两点的温差, 进而反演出 C_n^2 。因此说, 对特定场区的统计测量而言, 这是一种有效的测量方法, 通过长期施放探空球, 并搭载温度脉动测量仪, 可以获得场区 C_n^2 廓线季节性的统计结果。但其缺点是探空仪测量得到一条完整廓线的时间比较长, 而且由于气球受风的影响较大, 探测的区域无法控制, 所以这种方法测量结果的实时性和实空性较差。微波雷达通过测得的风廓线反演 C_n^2 廓线, 但是从本波段 C_n^2 反演得到光波段的 C_n^2 需要同时测量到平均的温度和湿度廓线, 并且对这两种廓线的测量精度要求也是较高的, 再加上反演的误差, 因此对 C_n^2 的反演结果影响较大^[1]。该方法目前对测量 C_n^2 的实际使用还在进一步论证。此外, 还有声雷达测量方法。虽然在理论和实际测量中, 均证明了这一方法的有效性, 但由于声功率的极大限制, 使测量高度非常有限。

由于现有的测量方法存在实时性、局域性和精度等问题, 因此我们想通过发射望远镜把扩束的激光会聚于探测区域, 用接收望远镜探测聚焦光斑后向散射的光斑图像的到达角起伏, 进而反演大气湍流强度。随着聚焦距离的变换, 就可以得到到达角起伏廓线从而反演大气折射率结构常数廓线。利用到达角起伏测量大气湍流强度 C_n^2 , 是一种在原理和技术上十分成熟的方法, 这种方法可以很好的解决实时性、局域性和精度等问题。但是要利用激光聚焦光斑后向散射到达角起伏来反演大气湍流强度, 其根本问题就是光束在大气中二次传播的性质。后向散射到达角起伏统计特征与固定点光源的到达角起伏统计特征究竟有什么关系, 它们的相关性又如何, 从后向散射到达角起伏特征能否正确提取大气湍流强度信息, 是我们研究这样一种测量方法首先要考虑的问题。现有的理论对二次传播到达角起伏的性质进行了讨论^[2], 但是由于后向散射到达角起伏的原理十分复杂, 进行数值模拟具有相当的难度, 因而我们设计了原理性的验证实验, 取得了一些有意义的结果。

2 实验设计

为了了解聚焦光束经过漫反射, 两次通过湍流大气的基本特性, 我们设计并进行了一系列的原理性水平光路传输实验。用发射望远镜将经过扩束的激光光束会聚于靶点处的漫反射屏上, 同时在靶屏旁放置一台作为参照光源的激光器, 其发射的光束指向位于发射主望远镜旁的接收望远镜。CCD 通过接收望远镜

基金项目: 国家高技术 863 计划激光技术资助课题 (200212)

收稿日期: 2004-05-12; **修改日期:** 2004-08-10

E-mail: sczhang@aiofm.ac.cn

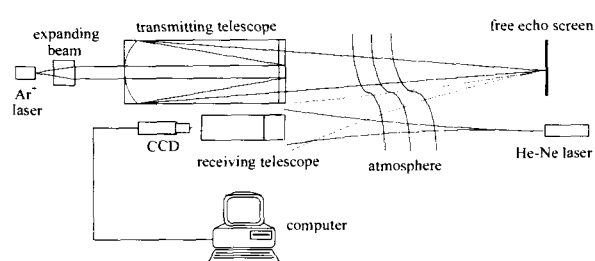


Fig.1 Light path diagram of contrastive experiment

用的是 4 倍显微物镜。采集卡为 8 位数字图像卡，采集频率为 25 Hz。

2.2 设计思路

首先，实验采用漫反射来模拟后向散射，主要是因为受限于普通 CCD 无法接收到发射激光的聚焦后向散射信号，因此采用加反射屏来增强回波功率。在各种反射中，漫反射是最接近于后向散射的性质，因此采用漫反射来模拟后向散射。其次，实验采用非共孔径接受系统，因为若用共孔径接受，光束在同一路径两次传播会把大气湍流的作用抵消掉，或淹灭了有信息的量。第三，漫反射光束与参照光选用了不同波长的激光，因为对于球面波的到达角起伏有式^[3]

$$\sigma_{\alpha}^2 = 1.05 C_n^2 z \rho^{-1/3},$$

其中 ρ 为望远镜直径。可以看出，到达角起伏与波长无关，考虑到接收光的功率，我们采用功率较大的氩离子激光器进行实验。

在其他仪器的选取上，考虑到首先应尽量减少镜面反射和角反射的影响，其次回光要被普通的可见光 CCD 接收，所以选用了石膏漫反射屏。同时由于大气湍流运动频率从几 Hz 到几百 Hz，因而选用普通的可见光 CCD 基本上可以得到有用的数据，另外实验要得到的是两光束的对比情况，所以普通 CCD 完全可以胜任。

3 实验结果与对比研究

我们在 Δz 为 1 km 和 500 m 两个靶点分别进行了实验。每个靶点又分别改变发射和接收望远镜的中心距 Δd 采集。每一组连续采集时间为 10 秒，共有 250 帧图像。

采集到的光斑图像如图 2 所示。采集的窗口为 128×128 ，其中左边的光斑为参照点光源，右边的为聚焦光斑的漫反射图像。



Fig.2 Contrastive image

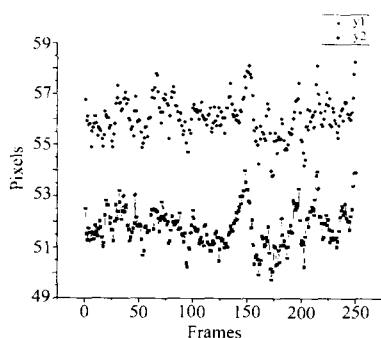


Fig.3 Angle-of-arrival fluctuation of back-scattering echo and beacon

图 3 表示的就是采集一组 250 帧图像，两光斑在纵轴方向上的到达角位移的抖动量。可以看出漫反射光波 (y_2) 和固定的点信标光波 (y_1) 在时间抖动量方面有相当好的相似性，其统计互相关系数高达 99.9%。

图 4 表示的是 142 组数据的 y 轴到达角起伏方差，可以看出漫反射光波 (s_2) 和固定的点信标光波 (s_1) 在连续观测的到达角起伏方差上相似性仍然很好，其统计互相关系数高达 97.7%。这说明非共孔径完全可以采集到大气湍流的信息，非共孔径接收回光到达角起伏的统计特征与固定点光源的到达角起伏统计特征有可比性，存在对比参数。

接下来由实验采集到的漫反射光波和固定的点信标光波的大量数据，我们对其进行统计方差的对比，从而了解非共孔径的中心距 Δd 、聚焦距离 Δz 与对比参数的影响。

同时接收漫反射屏反射的光斑及参照光斑。其实验光路见图 1。

2.1 主要实验仪器及参数

发射系统：激光器采用的是美国 COHERENT 公司的 INNOVA400 型氩离子激光器，其工作波长为 514 nm。发射主望远镜镜口直径为 500 mm。参照光激光器为 He-Ne 激光器，工作波长为 630 nm。

接收系统：接收望远镜镜口直径为 120 mm。CCD 为台湾敏通公司的 MTV-12V1 型 CCD。CCD 镜头采

3.1 Δd 的影响

以 1 km 的数据为例，如图 5(a) 和图 5(b) 就是在 1 km 靶点，两望远镜中心距 Δd 为 44 cm 的条件下得到的 x 轴和 y 轴两光斑到达角位移方差之比。其中横轴为参照光斑的到达角位移方差，纵轴为聚焦光斑的到达角位移方差。

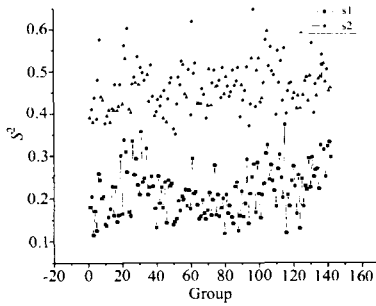


Fig.4 Angle-of-arrival fluctuation variance of back-scattering echo and beacon

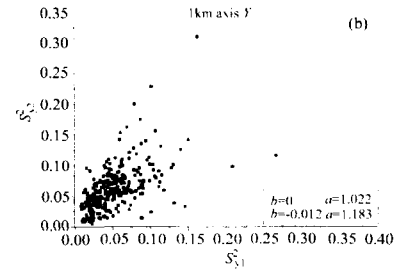
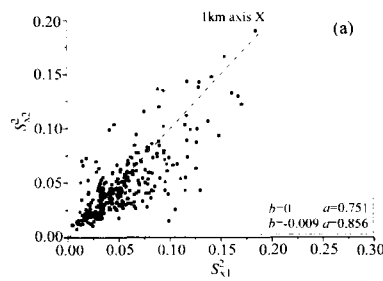


Fig.5 Contrast of angle-of-arrival fluctuation variance in $\Delta d = 44$ cm, $\Delta z = 1$ km

图 6(a) 和图 6(b) 则是两望远镜中心距 Δd 为 95 cm 的条件下得到的。其中虚线为两方差之比为 1，图中的参数 a 与 b 表示为：对数据进行最小二乘直线拟合得到的直线 $y = ax + b$ ，斜率 a 代表两方差的相似系数，越接近于 1 代表两组方差越相似； b 代表系统测量误差，说明由于测量仪器、手段所带来的影响。

为了便于分析，我们首先不考虑系统测量误差带来的影响。由以上两组图我们可以看到在 $b = 0$ 的情况下， a 与非共孔径的发射、接收望远镜之间的中心距 Δd 有关。中心距越大， a 越接近于 1，即 $|1 - a|$ 越小。也就是说，中心距 Δd 越大，两组数据的相似度越好。

如果考虑上系统测量误差，即 $b \neq 0$ 的情况，由两组图中可以看到， a 与中心距的关系和 $b = 0$ 时基本一致。另外我们看到在 $\Delta z = 1$ km 时考虑了系统测量误差后对 a 的修正并没有什么积极的影响，因此我们可以大胆假设在 Δz 足够远的情况下，测量可能不需要进行方差的订正。

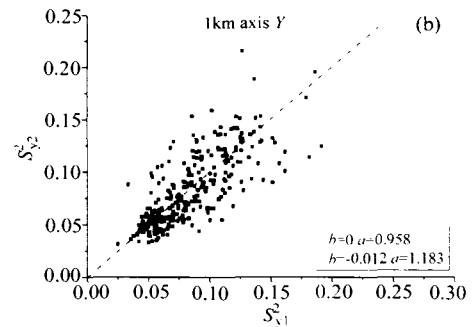
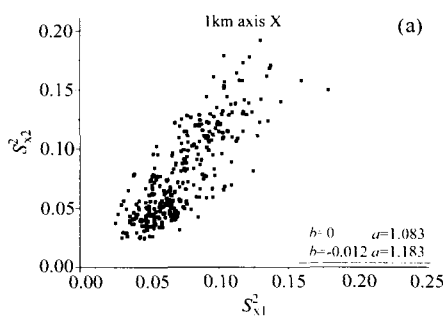


Fig.6 Contrast of angle-of-arrival fluctuation variance in $\Delta d = 95$ cm, $\Delta z = 1$ km

接着我们讨论中心距 Δd 与最小二乘法误差 σ^2 的关系，这个误差直观的反映了实验数据与理想状态的离散度。由表 1 可以看出，在 $\Delta z = 1$ km 的情况下，中心距 Δd 越大误差越小，离散度越好。

3.2 Δz 的影响

图 7(a) 和图 7(b) 为 $\Delta z = 500$ m 的情况下，两望远镜中心距 Δd 为 97 cm 的条件下得到的。比图 7 和图 6 两组 Δd 大致相同的数据，当不考虑系统测量误差带来的影响（即 $b = 0$ ）时，聚焦距离 Δz 越大，

Table 1 Errors in different conditions

		X axis		Y axis	
		$b = 0$	$b \neq 0$	$b = 0$	$b \neq 0$
$\Delta z = 1$ km	$\Delta d = 44$ cm	0.238	0.302	0.325	0.302
	$\Delta d = 95$ cm	0.158	0.162	0.149	0.205
$\Delta z = 500$ m	$\Delta d = 97$ cm	0.367	0.281	1.159	1.117

a 越接近于 1, 即在近距离 (500 m), 漫反射光波到达角起伏方差与固定的点信标光波的到达角起伏方差二者之间的相似度较差, 存在一个系统偏差。

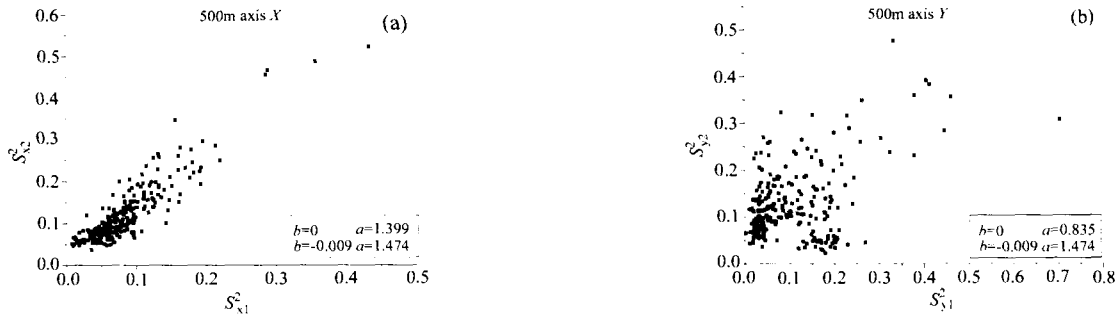


Fig.7 Contrast of angle-of-arrival fluctuation variance in $\Delta d=97$ cm, $\Delta z=500$ m

考虑上系统测量误差, 即 $b \neq 0$ 的情况, 可以看到, 在近距离 a 值和 $b=0$ 时有所不同, 但是并没有向着接近 1 的方向去发展, 反而有种更加偏离 1 的趋势。因此我们认为在近距离出现的系统偏差并不是由系统测量误差引起的。在实际测量时就需要通过大量的实测数据进行统计分析, 从而得到近距离的系统订正参数进行必要的统计订正。

再讨论聚焦距离 Δz 与最小二乘法误差 σ^2 的关系。由表 1 的后两行可以对比看出, 聚焦距离 Δz 越大误差 σ^2 越小, 离散度越好。在 $\Delta z=500$ m 的近距离情况下, 考虑系统测量误差 ($b \neq 0$) 时可以减小 σ^2 , 由此也更加证明了在近距离测量时需要进行必要的统计订正。

4 总结与讨论

根据采集的实验数据进行的统计分析, 我们得到了基本令人满意的结果:

- 1) 聚焦光束的后向散射光斑的到达角起伏, 含有大气湍流的信息。
- 2) 对于非共孔径接收系统, 聚焦光束的后向散射光斑的到达角起伏与发射接收望远镜的中心距有关, 直观看中心距越大, 越接近固定点光源一次光程传输的值。事实上可能存在一个最佳值, 但是由于实验条件所限制, 对此我们没有进一步的研究。
- 3) 聚焦 500 m 时, 漫反射光波到达角起伏方差略大于固定的点信标光波的到达角起伏方差。二者之间存在一个系统偏差, 说明在实际的近距离测量时需要进行必要的统计订正; 聚焦 1 km 时, 漫反射光波和点信标光波的到达角起伏方差的统计相关值近似为 1, 这说明在远距离测量时可能不需要进行方差的订正。
- 4) 由实验结果的对比图中可以看到, x 轴和 y 轴反映出来的统计结果是有区别的, 该现象在近距离 (500 m) 的时候反映尤为明显。可能由于是近地面的水平光路传播, 因此近地面复杂的地形等环境影响使得大气湍流表现出各向异性。

参考文献:

- [1] Weng Ningquan, et al. The theory and experimental verification of 915 M microwave radar [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2001, 18(1): 92-96 (in Chinese).
- [2] Song Zhengfang. *Applied Atmospheric Optics* (应用大气光学基础) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990. 103-112 (in Chinese).
- [3] Song Zhengfang. *Applied Atmospheric Optics* (应用大气光学基础) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990. 92 (in Chinese).

- [10] McClatchey R A, Fenn R W, Selby E A, *et al.* Optical properties of the atmosphere [R]. *Report AFCRL 71-0279, Environmental Research Paper 354, Air Force Research Laboratory, Bedford, Massachusetts (U.S.A.) 1971.*
- [11] Smith G M, Milton E J. The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1999, 20(13): 2653-2662.
- [12] Zagolski F, Gastellu-Etchegorry J P. Atmospheric corrections of AVIRIS images with a procedure based on the inversion of the 5S model [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1995,16(16): 3115-3146.

Zenith observation angle correction in retrieval of surface reflectance basic theory and simulation

YANG Ben-yong, FANG Yong-hua, SUN Gui-ling

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Based on the high resolution imaging spectrometer data of OMIS I we performed a simulative calculation from 6S. Relation between radiance at satellite level and variety of zenith observation angle was discussed and correlative error in the retrieve of surface reflectance was analyzed, simultaneously. The results show that there are spectral properties about this effect, it is sensitive in the strong scattering regions and the major absorption channels by atmosphere; On the other hand, the brightness of targets and the flight elevation decides this effect. Based on this analysis a primary correction strategy was given.

Key words: remote sensing; imaging spectrometer data; simulation; zenith observation angle; retrieval of surface reflectance

作者简介: 杨本永 (1976, 11 -), 男, 中国科学院安徽光机所硕士生, 主要从事光学遥感高光谱信息处理方面的研究。

~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~

(上接 666 页)

Contrastive experiment of back-scattering echo and beacon angle-of-arrival fluctuation

ZHANG Shou-chuan, WU Yi

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The contrastive experiment of back-scattering echo and beacon angle-of-arrival fluctuation was introduced. The experiment was used to validate that whether the back-scattering angle-of-arrival fluctuation can describe the atmosphere structure of refractive index C_n^2 by method of contract. The results prove that the back-scattering angle-of-arrival fluctuation can describe the atmospheric structure of refractive index C_n^2 . And some contrastive parameters were analyzed.

Key words: atmospheric optics; the atmosphere structure of refractive index C_n^2 ; back-scattering echo; angle-of-arrival fluctuation

作者简介: 张守川 (1977, 11 -), 男, 2000 年毕业于西南交通大学光电子技术专业, 现在中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心攻读博士学位。