

文章编号 1004-924X(2006)05-0802-05

基于光纤的能见度测量方法

肖韶荣, 冒晓莉

(南京信息工程大学 电子工程系, 江苏 南京 210044)

摘要:提出了一种利用前向散射光束和透射光束测量近地大气横向能见度的方法。以阶跃折射率光纤作为空间滤波器限制散射光束和透射光束接收的视场角以及前向散射测量光束和大气散射辐射的背景干扰;采用相关检测法,排除测量通道视场角内的大气背景干扰,提高洁净大气条件下散射光强度信号测量的信噪比;对测量装置结构进行优化设计,减小热形变的影响;另一方面引入阶跃折射率光纤,使投射到光电探测器接收表面的光束光斑位置保持不变,进一步减弱形变对测量精度的影响。能见度的值用散射光强度和透射光强度之比表示,光源强度的变化和光学元件的污染对测量的影响可不考虑。用此方法测得的能见度与按严格定义的透射法所测能见度的相关系数约为 98.2%。

关键词:光电探测;能见度;散射系数;时-空滤波法

中图分类号:P427.2 **文献标识码:**A

Measuring method of visibility with optical fiber

XIAO Shao-rong, MAO Xiao-li

(School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 21004, China)

Abstract: A measuring method to terrain atmospheric visibility with forward scattered light and transmitted light was introduced. Visibility is expressed by ratio of the intensity of the scattered light to the intensity of transmitted light. Spatial filters are utilized to limit visual angle of scattered light and transmitted light, and background interferences of measured forward scattered light and atmospheric scattered light. Using the correlation detection, atmospheric background noise is eliminated and signal-to-noise ratio for scattered light to background is enhanced. In order to keep spot of being measured light beam on the photo-detector unchanged, step index optical fiber is used in the set for improving the influence of thermal deformation on measuring error. Another characteristic is that changing in the light source and pollution to the optical elements may be ignored. The correlation coefficient between visibility from proposed method and accurate transmission method is about 98.2%.

Key words: photoelectric detection; visibility; scattering coefficient; time-spatial filtering

1 引 言

长期以来,能见度一直困扰着人类的各种行为活动,在激光通信^[1]、图像传输^[2]和现代交通技术中产生着重要影响。能见度的测量也一直受到人们的关注,随着现代交通网络的应用,大气能见度测量也愈显重要。典型的能见度测量方法是前向散射法^[3-4],即选择大气吸收微弱的近红外光,在与探测光束传播方向成 35°或其他角度方向测量角散射系数,再按一定的大气光学模式计算总散射系数,并根据 Koschmieder 定律^[5]确定能见度,此法的测量误差决定于总散射系数的测量。在现有的装置中,对总散射系数测量误差的主要决定因素如下:光学模式的影响、散射探测光束发散角的影响、背景辐射干扰和散射辐射产生的背景干扰及测试装置结构热形变的影响等。这些装置在测量 35°散射角处的散射系数时,光接收部件收集到的入射光束并非严格定义下的平行光束,而是分布在较大锥角内的光束,由此得到的散射系数比实际该方向的散射系数大。文献[6]提出了一种建立动态光学模式的测量方法,并提出了应用光纤端面限制视场角。本文以半导体激光作为探测光,采用了双光束测量法,在散射光束和透射光束测量部件接收透镜后以阶跃光纤作为空间滤波器使探测光束发散角限定在 2.0 mrad 内,使光电探测器接收到的散射光束接近平行光束,减少了散射探测光束的发散角影响,并用阶跃光纤将测量光束传送到光电探测器;在电信号处理中,用窄带有源滤波器对时间信号进行滤波,再用相关检测法对滤波信号进行处理。根据这些措施构成的实验装置测得的能见度与严格定义下透射法所测能见度具有良好的一致性,它们的相关系数约为 98.2%。

2 能见度测量原理

2.1 能见度的定义

能见度若以气象视距表示时,按国际气象组织的规定,它由 Koschmieder 定律给出

$$R_m = \frac{3.912}{\beta_{\text{sca}}}, \quad (1)$$

其中 β_{sca} 为大气对波长为 550 nm 单色光的总散射

系数。若大气对波长为 550 nm 单色光存在吸收,则应以总消光系数代替总散射系数。在以其他波长的单色光作为探测光时,式(1)应改写为

$$R_m = \frac{3.912}{\beta_{\text{sca}}} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^{0.583 R_m^{1/3}}, \quad (2)$$

式(2)为超越方程,只能获得数值解。气象视距精度依赖于 β_{sca} 和波长的测量精度,实际测量中波长的测量精度比总散射系数的测量精度高得多。

2.2 总散射系数的测量

如图 1 所示,根据定义,单色平行光束入射情况下,在 θ_0 角方向,单位体积散射强度 $P(\theta_0)$ 与入射光对单位体积的辐照度成正比^[7]

$$P(\theta_0) = \beta(\theta_0) E, \quad (3)$$

其中 $\beta(\theta_0)$ 是 θ_0 角方向上的角散射系数。 P_i 、 P_t 和 P_s 分别为点 A 处的入射光强、点 B 处的透射

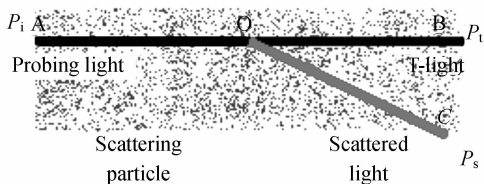


图 1 角散射的几何图形

Fig. 1 Diagram of angular scattering

光强和点 C 处的散射光强。假定 A、B、C 三点共圆,且点 O 为圆心,此圆的半径为 r 。对于截面为 s 的光束,在点 O 处行进单位长度均匀介质时,在 θ_0 角方向上的散射强度 $P'(\theta_0)$ 为

$$P'(\theta_0) = \beta(\theta_0) P_i e^{-\beta_{\text{sca}} r}, \quad (4)$$

点 C 处的散射光强度

$$P_s(\theta_0) = \beta(\theta_0) P_i e^{-\beta_{\text{sca}} 2r}, \quad (5)$$

点 B 处的透射光强度

$$P_t = P_i e^{-\beta_{\text{sca}} 2r}, \quad (6)$$

点 C 处的散射光强度与点 B 处的透射光强度之比即为 θ_0 角方向上的角散射系数,即 $\beta(\theta_0)$ 可由下式表示

$$\beta(\theta_0) = P_s / P_t, \quad (7)$$

在能见度测量区域内可认为大气是均匀介质,故总散射系数可表达为

$$\beta_{\text{sca}} = 2\pi \int_0^\pi \beta(\theta) \sin \theta d\theta, \quad (8)$$

角散射系数分布函数由所测 $\beta(\theta_0)$ 按相应光学模式决定。因此,总散射系数的测量归结为透射光强度和散射光强度的测量。

3 测量装置与信号处理

3.1 散射系数的测量装置

图 2 是角散射系数 $\beta(\theta_0)$ 的测量装置示意图。装置中,探测光束直径为 10 mm,透射光束和散射光束接收器入射孔径为 20 mm。选择波长 $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$ 的半导体激光作为探测光,半导体激光器发出的光束被调制成 $f_0 = 1\,000 \text{ Hz}$ 的方波,经准直器后形成平行光束;进入探测区域的初始光强为 P_i ,经大气散射后到达透射光接收器的透射光强为 P_t ,在满足式(5)的几何结构条件下,散射光接收器接收到的散射光强为 P_s ;光纤 1 和光纤 2 分别将装置上散射光和透射光传送到光电探测器 1 和光电探测器 2,并被转变为随时间变化的电信号,分别经前置放大后,由信号处理系统对它们进行处理,给出测试结果。在散射光和透射光接收器中,各放置了一个孔径光阑,阶跃光纤的接收端面置于接收透镜的焦点处。在光接收器上安放温度控制部件,以使形变达最小。

图 2 所用阶跃光纤的数值孔径约为 0.28,对应临界入射角约为 16.26° ,利用相对孔径 $D/f = 0.60$ 的透镜,将测量光束聚焦在光纤端面上,调节置于透镜与光纤端面间的孔径光阑大小和位置,使投射到光纤端面上的光束角半径恰好为光纤的临界入射角,并使有效孔径大小与测量光束截面相同,从而保证测量到的散射光束或透射光束符合散射系数和消光系数的定义。

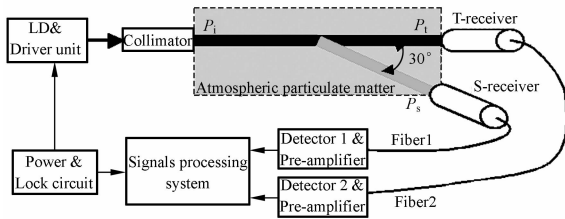


图 2 角散射系数测量装置

Fig. 2 Measuring set for angular scattering coefficient

3.2 信号处理系统及方法

图 3 是光电信号处理系统原理框图。散射光和透射光被光电探测器 1、2 分别转换为电流信号 $I_s(t)$ 和 $I_t(t)$,前置放大器将它们分别变换为电压信号 $U_s(t)$ 和 $U_t(t)$ 。用 Si-PIN 光电二极管作为

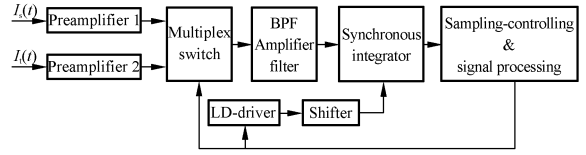


图 3 光电信号处理系统框图

Fig. 3 Block of photo-electronic signals processing

探测器, $U_s(t)$ 和 $U_t(t)$ 分别可由如下二式表示

$$U_s(t) = -\rho_1 R_1 P_s(\theta_0), \quad (9)$$

$$U_t(t) = -\rho_2 R_2 P_t. \quad (10)$$

其中 ρ_1, ρ_2 分别为光电探测器 1、2 的响应率, R_1 和 R_2 分别是前置放大器 1、2 的转移电阻。电压信号 $U_s(t)$ 和 $U_t(t)$ 通过多路开关分时进入具有一定增益的窄带滤波器,滤波器通带的中心频率为 $\omega_0 = 2\pi f_0$ 。考虑到,散射系数随时间的变化较为缓慢,整个测试过程可视为准静态过程。根据信号处理理论,对于散射光信号, BPF 的输出信号可表示^[8]为

$$u_s(\theta_0) = -R_1 \rho_1 \beta(\theta_0) P_{\text{im}} \frac{\tau}{T_0} S_a\left(\frac{\omega_0 \tau}{2}\right) A(\omega_0) e^{-\beta_{\text{scn}} 2r} e^{j[\omega_0 t - \Phi_A(\omega_0)]}, \quad (11)$$

透射光信号为

$$u_t = -R_2 \rho_2 P_{\text{im}} \frac{\tau}{T_0} S_a\left(\frac{\omega_0 \tau}{2}\right) A(\omega_0) e^{-\beta_{\text{scn}} 2r} e^{j[\omega_0 t - \Phi_A(\omega_0)]}, \quad (12)$$

$A(\omega_0)$ 为带通滤波器的增益, $\Phi_A(\omega_0)$ 为 BPF 引入的相移, P_{im} 为探测光脉冲的幅度, T_0 为光脉冲周期, τ 为探测光脉冲的宽度, 此处, $\tau = T_0/2$ 。

同步积分器对滤波器的输出信号与参考信号作相关运算^[6,8], 对于散射光信号输出为

$$U_s(\theta_0) = -R_1 \rho_1 \beta(\theta_0) \frac{2U_r P_{\text{im}}}{\pi^2} A(\omega_0) e^{-\beta_{\text{scn}} 2r} \cos[\Phi_A(\omega_0) + \Phi_r(\omega_0)], \quad (13)$$

透射光信号输出为

$$U_t = -R_2 \rho_2 \frac{2U_r P_{\text{im}}}{\pi^2} A(\omega_0) e^{-\beta_{\text{scn}} 2r} \cos[\Phi_A(\omega_0) + \Phi_r(\omega_0)], \quad (14)$$

式中 $U_r, \Phi_r(\omega_0)$ 分别是参考信号的幅度和初相位。调整参考信号相移器,使 $\cos[\Phi_A(\omega_0) + \Phi_r(\omega_0)]$ 为最大,以便充分利用光电探测器的灵敏度。考虑到实际测试中并非是单位体积的散射光

信号,由式(13)、(14)将待测散射系数表达为

$$\beta(\theta_0) = K \frac{U_s(\theta_0)}{U_t}, \quad (15)$$

K 为仪器标定常数,式(15)表明角散射系数可由对应角度散射光的电压信号和透射光的电压信号确定。角散射系数的测量精度决定于对应光的电压信号的测量精度。

4 测量结果与讨论

为了标定仪器常数,用稳光强电路使激光器的输出光功率稳定在 2.0 mW,测量透射光功率,并按 Lambert 定律计算总散射系数 β_{sca} 。为简便起见,采用近似比例法^[9],即视 $\beta_{\text{sca}} = C\beta(\theta_0)$,由式(15)得

$$\beta_{\text{sca}} = K_0 \frac{U_s(\theta_0)}{U_t}, \quad (16)$$

调节前放电路 1 中的电阻 R_1 或前放电路 2 中的电阻 R_2 ,根据所测的电压信号和透射法所得总散射系数,并考虑到电路的动态范围,确定实验装置的仪器常数 K_0 为 0.1。

保持激光器输出光功率稳定,在利用式(16)测定总散射系数的同时直接用透射光信号计算出总散射系数,分别由式(2)确定能见度。图 4 给出了在不同气象条件下用两种方式获得的结果,其中,测试点横坐标为散射法测得的能见度值,纵坐标是透射法测得的能见度值。由图可以看出,两种方法测得的能见度相关系数约 98.2%,一致性良好。在较为清洁透明的气象条件下,散射法测得的能见度值均略小于透射法的测量值,说明清洁大气的光学模式比较简单,以 Rayleigh 散射为主;在较低能见度情况下,大气结构较复杂,所得

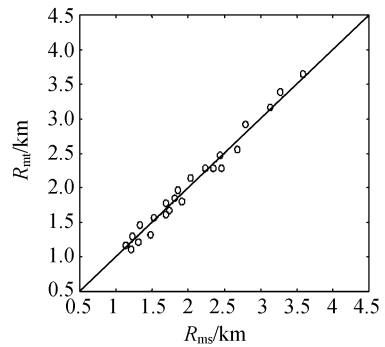


图 4 散射法与透射法测量能见度结果的比较

Fig. 4 Comparison of visibility measured in scattering and transmission

结果反映了大气光学常数的随机变化。

图 3 中透射法测得的能见度是使用 EG-1A 型光功率计,按严格定义测得的总消光系数,它包含大气散射和吸收作用,再根据 Koschmieder 定律计算获得。因此,此处透射法所测的能见度是有较高准确度的数据,根据两种方法所得结果的相关系数,可以看出利用图 2 所示装置测得的能见度具有较高的准确度。

5 结 论

基于光纤的能见度测量系统能有效抑制测量光中的旁路光束、限制测量光束为符合基本定义的散射光束和透射光束。因此,此系统测量的角散射系数接近真实的角散射系数,从而可提高能见度的测量准确度。用该系统测量的能见度值与直接消光系数测量法所得结果相关系数约 98.2%,结果的一致性良好。

参考文献:

- [1] 徐晓静,元秀华,黄德修. 影响激光大气通信距离的诸因素分析[J]. 光学精密工程,2002,10(5):493-496.
XU X J, YUAN X H, HUANG D X. Analysis of the parameters influencing the distance of freespace laser communication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(5): 493-496. (in Chinese)
- [2] 林玉池,崔彦平,黄银国. 复杂背景下边缘提取与目标识别方法研究[J]. 光学精密工程,2006,14(3):509-512.
LIN Y C, CUI Y P, HUANG Y G. Study on edge detection and target recognition in complex background[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(3): 509-512. (in Chinese)
- [3] CRAIG F B, DONALD R H. *Absorption and scattering of light by small particles*[M]. John Wiley & Sons, Inc, New York, 1983.
- [4] 曾书儿,王政利. 能见度的观测及其仪器[J]. 应用气象学报,1999,10(2):207-212.

- ZENG S E, WANG G L. Observation and instrument of visibility[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 10 (2): 207-212. (in Chinese)
- [5] MICHAEL E T, DONALD D D. *Atmospheric transmission in atmospheric propagation of radiation*[M]. The Infrared & Electro-optical Systems Handbook, 1993.
- [6] XIAO S R, CHEN J B, WANG Z H, *et al.* A new set of measuring terrain atmospheric visibility with optical fiber [J]. *SPIE*, 2002, 4920: 187-192.
- [7] E. J. 麦卡特尼(潘乃先等译). 大气光学-分子与粒子散射[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
EARL J M(Translated by PAN N X). *Optics of the atmosphere scattering by molecules and particles*[M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese)
- [8] 肖韶荣, 陈进榜, 严婕. 基于开放式气室的光纤气体传感器的信号分析[J]. 量子电子学报, 2002, 19(6): 531-535.
XIAO S R, CHEN J B, YAN J. Analysis of signals in fiber optic gas sensor based on opening cell[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2002, 19(6): 531-535. (in Chinese)
- [9] BURNHAM D C, SPITZER E A. United states experience using forward scattermeters for runway visual range[Z]. DOT/FAA/AND-97/1, DOT-VNTSC-FAA-97-1, March, 1997, 3-8.

作者简介:肖韶荣(1958—),男,博士,教授,中国光学学会光电技术专业委员会委员,中国仪器仪表学会光电技术与系统集成分会理事。主要从事光电技术与信号处理,在“中国激光”、“光学精密工程”等核心刊物发表论文近 30 篇。E-mail: sr. xiao@163. com