

文章编号:1001-5078(2007)05-0417-03

激光后向散射式能见度测量仪的理论分析与实现

戴文珺,王江安,蒋冰莉
(海军工程大学光电研究所,湖北 武汉 430033)

摘要:文章采用后向散射能见度测量法,通过测量激光在大气传输过程中产生的后向散射信号,计算大气的消光系数,从而得出大气能见度值,从硬件和软件上设计,并进行了实验。

关键词:后向散射;大气能见度;能见度仪;大气传输

中图分类号:TH765.8⁺³ **文献标识码:**A

Analyse and Realization of Visibility Meter of Laser Backward Scattering

DAI Wen-jun, WANG Jiang-an, JIANG Bing-li

(Institute of Optical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Basing on laser backward scattering method, the backward scattering signal of digital receiver is measured in the laser's transmission. Visibility is calculated with the help of the measurement of atmosphere extinction coefficient. The performance of the method is analyzed using both hardware and software, and also realized through experiments.

Key words:backward scattering; atmosphere visibility; visibility meter; atmospheric transmission

1 激光后向散射法测量能见度

1.1 后向散射法能见度测量原理

激光发射器在大气信道中发送激光信号,由于大气中分子和微粒对光束的散射和吸收作用,接收器接收到的光信号会发生衰减。后向散射式测量法即利用大气信道对接收器接收信号的衰减来测量大气能见度值。

由于激光具有极好的单色性,因此在假定光传输路径上大气均匀分布,能见度测量的基本方程是布格尔-朗伯(Bouguer-Lambert)定律:

$$F = F_0 \exp(-\sigma x) \quad (1)$$

其中, F 为光在大气中 x 处路径的光强; F_0 为激光的初始光强; σ 为消光系数。对式(1)求导可得:

$$\sigma = \frac{-dF}{F} \cdot \frac{1}{dx} \quad (2)$$

透射因子为:

$$T = \frac{F}{F_0} = \exp(-\sigma x) \quad (3)$$

根据一些观测者对有代表性的试验目标的观

测,人眼识别目标的对比阈值为0.02,则由式(2)、式(3)可以推得能见度距离:

$$V_m = \frac{1}{\sigma} \cdot \ln \frac{1}{0.02} \approx \frac{3.912}{\sigma} \quad (4)$$

该方程是针对人眼感觉的光波(白光)而言的,作为近似,可以用人眼最敏感的绿光($\lambda = 0.55\mu m$)的衰减系数来代替白光的衰减系数,对于其他波长应作如下订正:

$$V_m = \frac{3.912}{\mu} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^q \quad (5)$$

其中,波长 λ 以 μm 计。

q 值在不同地区和时间可能不同,最常用的是Kruse等给出的值:

$$q = \begin{cases} 0.585 V_m^{1/3} & V_m < 6 \text{ km} \\ 1.3 & \text{中等能见度} \\ 1.6 & \text{良好能见度} \end{cases} \quad (6)$$

作者简介:戴文珺,女,在读硕士生。E-mail:realzaza@sina.com

收稿日期:2006-09-26;修订日期:2006-11-08

通过以上推导得出的能见度距离 V_m 只与大气的透明度有关,且不随白天或黑夜而变化。而消光系数 σ 是由于光波在大气传输过程中由于各种因素而造成能量衰减。 σ 可表示为:

$$\sigma = \sigma_m + K_m + \sigma_a + K_a \quad (7)$$

其中, σ_m 为分子散射系数; K_m 为分子吸收系数; σ_a 为气溶胶散射系数; K_a 气溶胶吸收系数。吸收系数相比散射系数小很多,可以忽略不计。可见,消光系数是大气分子的散射系数的反映。消光系数与激光回波能量成正比关系。通过对激光回波能量的测量得到大气的消光系数,从而计算出大气能见度。

2 样机的总体设计方案

2.1 能见度测量仪硬件设计

激光后向散射式能见度测量仪的系统结构示意图如图 1 所示。它是由激光发射器、接收望远镜、后继光学部件、信号探测和数据采集部件以及计算机 5 部分组成。除计算机之外,其他 4 个部分全部组装在一起,使得该能见度测量仪整体结构紧凑,携带方便。

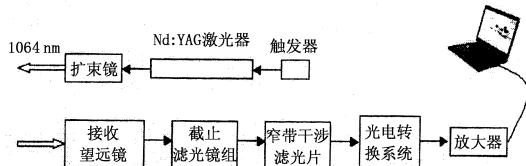


图 1 激光后向散射式能见度测量仪结构方框图

Fig. 1 schematic diagram of visibility meter

激光器是 Nd:YAG 激光器,激光的发射有单独的触发器控制。接收望远镜的直径为 48mm,用于接收发射激光的后向散射的能量。后继光学部件主要由截止滤光片组及窄带干涉滤光片组构成。信号探测和数据采集部件由雪崩二极管和放大器组成,用 RS232 串口与计算机相连。

仪器工作时,由触发器控制 YAG 激光器产生的脉冲激光束,经扩束镜扩束后发射出去。光学接收镜头接收到的后向散射激光能量,经截止滤光片及窄带干涉滤光片由雪崩光电二极管组成的光电转换系统转换成电信号。此信号经小信号放大电路进行线性放大后送入 A/D 转换电路进行转换,最后送至计算机中按编定的软件进行有关计算,以求出瞬间水平能见度。

2.2 信号校准

激光后向散射式能见度测量仪接收的信号需要

经过一系列的校准,才能用于进一步的数据处理。

2.2.1 背景噪声 n_b 校准

背景噪声由周围的杂散光产生,对于一个激光脉冲,它等于无穷远处接收到的信号光子数。无穷远处,激光能量已衰减至零,接收到的信号其实就是背景噪声。本系统的有效探测距离为 1000m,采样间距是 3.78m,取 1000m 至 1300m 区间的信号平均值作为背景噪声。区间 1000m 至 1300m 对应的采样通道区间为 266 ~ 350,所以背景噪声可以表示为:

$$n_b = \frac{1}{350 - 266 + 1} \sum_{i=266}^{350} N(r_i) = \frac{1}{85} \sum_{i=266}^{350} N(r_i) \quad (8)$$

其中, i 表示采样通道序数, $N(r_i)$ 为采样信号。

2.2.2 几何重叠因子校准

激光后向散射式能见度测量仪是一个双轴系统,发射的激光光束是逐步进入能见度测量仪的接收视场,近距离大气后向散射光并不是完全被接收,所以需要通过几何因子来修正近距离的大气后向散射光。通过实验可获得几何因子。

具体的作法是:为了减少背景噪音的干扰,要选择能见度高、大气干净且水平均匀的夜晚,激光雷达呈水平指向,发射 50 发中增益激光脉冲,对采集的大气回波信号进行处理后得到该激光雷达的几何因子。我们于 2004 年 10 月 28 日晚在孝感进行了该实验,当时能见度为 20km,实验得到的该激光雷达的几何因子如图 2 所示。图中信号不平滑是由于该水平层信号是在城市中心得到的,受到市内各种建筑的影响,水平层内大气气溶胶的分布会局部不均匀。

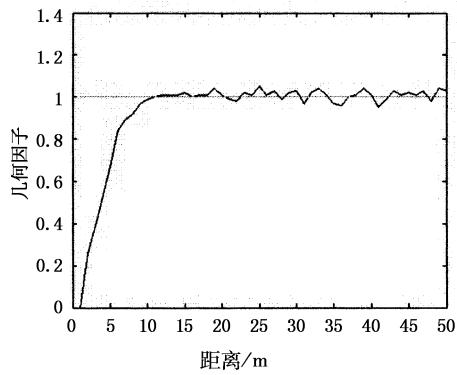


图 2 几何重叠因子

Fig. 2 overlap function of the visibility meter

2.3 能见度测量仪软件设计

2.3.1 基本实现流程图

后向散射法计算能见度是基于大气均匀、各向同性吸收为零、多次散射忽略不计的假设条件,进行

激光后向散射式能见度测量仪的软件设计,主要对样机接收的回波信号进行处理,涉及能见度算法及软件实现。系统的基本流程图如图3所示。

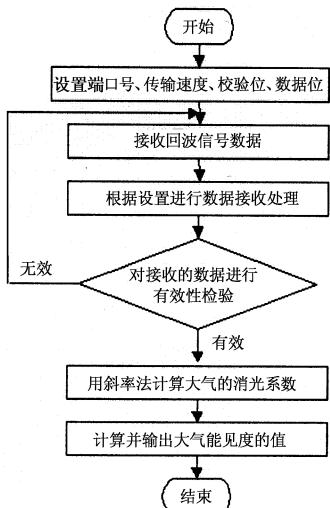


图3 系统基本流程图

Fig. 3 program flow chart

2.3.2 计算能见度的基本算法

我们研制的激光后向散射式能见度测量仪接收到的是激光回波的幅度,本算法是在斜率法的基础上进行推导而来的。在探测水平能见度时,可以认为大气是均匀的,或在距离间隔 $\Delta z = z_i - z_{i-1}$ 内大气衰减系数 μ 和后向散射系数 $\beta(\pi)$ 是常数,因此激光雷达方程的对数形式为:

$$\ln[P_r(z)z^2] = \ln[C\beta(\pi)] - 2\mu z \quad (9)$$

取距离差分,求得雷达信号在距离间距 Δz 上的斜率:

$$S(z) = \frac{\Delta \ln[P_r(z)z^2]}{\Delta z} = -2\mu \quad (10)$$

将式(10)代入能见度方程式(4),最后得到:

$$V_m = -\frac{7.824}{S(z)} \quad (11)$$

在探测斜程(或分布不均匀的水平路程)能见度时,激光雷达应测量衰减系数随路程的分布,因此在距离间隔 $(z_2 - z_1)$ 内的平均能见度为:

$$V_m = \frac{3.912(z_2 - z_1)}{\int_{z_1}^{z_2} \mu(z) dz} \quad (12)$$

在此算法的基础上,采用数据融合算法、视程障碍法数据修正等数学算法进一步对数据进行处理。

3 实验结果

从2005年10月开始,我们在武汉气象台东西湖区观测站进行了为期一月的观测实验。将该能见

度仪放在观测场,与武汉气象台观测能见度同步,每天数次进行能见度测量操作,保存每次发射后接收到的后向散射信号并记录每次测量的结果,同时记录下气象台观测的能见度值。对数据结果分析整理,如图4所示。

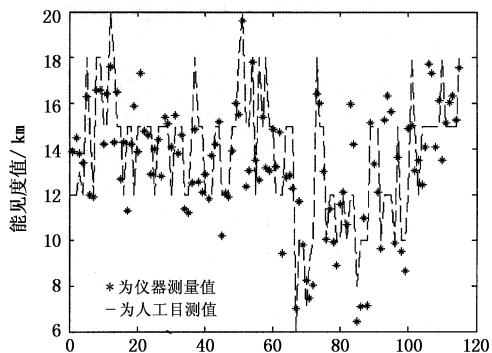


图4 外场试验结果对比图

Fig. 4 contrast figure of testing results

对数据进行处理后可知,试验数据的相对误差的均值为9.69%。当目测能见度在15~20km时,该仪器测量能见度的相对误差范围为±16.6%;当目测能见度的范围在10~15km时,仪器的测量能见度的相对误差范围为±15.6%;当目测能见度在6~10km时,仪器的测量能见度的相对误差范围为±12.7%。在试验期间没有遇到能见度小于6km的情况。

由以上图表和数据可知:(1)实验测量数据与参考数据总体符合较好,进一步验证了激光后向散射式能见度测量法的可行性与性能。(2)在高能见度(>15km)时,测量值与标定理论值的差距较低能见度时为大,低能见度时测量值与参考值的符合度相对较好。由于高能见度天气对生产与生活的影响并不显著,所以,精确测量高能见度天气下的能见度值,意义并不明显。目前已有的能见度测量仪器都是在低能见度情况下的测量精度远远高于高能见度情况。本方法也有这样的特点。(3)由于能见度目测的主观性比较大,而且在时间上也存在差异,所以实测的数据并没有用一个很客观的标准来验证。但是通过误差分析,可以获得对系统性能比较全面的了解,激光后向散射式能见度测量法的误差主要来源于大气气溶胶的衰减、大气湍流对激光大气传输的影响。(4)误差的另一个来源是该样机采用的是1.06μm的激光,不属于人眼可见光范围,在用其计算能见度时需要进行转换,由于转化时使用的是经验公式,故也会带来一定的误差。

4 总 结

本文发展了大气能见度的测量方法和测量装置, 使用了通过测量激光后向散射信号来测量大气能见度的测量方法, 对于研究与开发新的高精度能见度测量方法与仪器具有重要的意义。主要有以下几点进展:(1) 在国内首次使用了能见度测量的方法——激光后向散射法, 推导了后向散射法的测量原理;(2) 设计并制作了实现激光后向散射法测量能见度的能见度仪样机, 根据激光后向散射法的测量原理, 发射机设计为 YAG 固体激光器, 接收机采用高功率硅雪崩光电探测器和低噪声前置放大器, 采取各种抑制噪声的措施之后, 最后输出高信噪比的激光回波信号;(3) 理论分析并计算了激光后向散射式能见度测量法的测量灵敏度和各种误差源对测量结果的影响;(4) 实验验证了激光后向散射式

(上接第 416 页)

表 1 n 分别为 16、12 和 8 时最小周期的识别概率

i	3	4	5	6	7	8
16	N_i	961	15159	228997	3378783	49724341
	N_i'	472	7772	120004	1774772	26042692
	N_i''	489	7387	108993	1604011	23681649
	P_i'	0.4912	0.5127	0.524	0.5253	0.5237
	P_i	0.4912	0.752	0.882	0.944	0.9733
12	N_i	529	6187	66907	717991	7740259
	N_i'	260	3278	35690	381458	4091810
	N_i''	269	2909	31217	336533	3648449
	P_i'	0.4915	0.5298	0.5334	0.5313	0.5286
	P_i	0.4905	0.7604	0.8882	0.9476	0.9753
8	N_i	225	1755	12015	81135	550575
	N_i'	108	954	6606	44430	299718
	N_i''	117	801	5409	36705	250857
	P_i'	0.48	0.5436	0.5498	0.5476	0.5444
	P_i	0.48	0.7627	0.8932	0.9517	0.978

说明:(1) N_i 为接收 i 个信号时, 需要识别的编码的总数; N_i' 为接收 i 个信号时识别出最小周期的编码数; N_i'' 为接收 i 个信号时没有识别出最小周期的编码数;

(2) 当 $i = 3$ 时, $N_i = (2n - 1) \times (2n - 1)$; 当 $i > 3$ 时, $N_i = N_{i-1}'' \times (2n - 1)$ 。

能见度测量法具有很高的测量重复性。

参考文献:

- [1] 宋正方. 应用大气光学基础 [M]. 北京: 气象出版社, 1990: 14 - 36.
- [2] 戴永江. 激光雷达原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 69 - 72.
- [3] 施德恒, 许启富. 后向散射式路道能见度激光测量仪的研究 [J]. 光学技术, 1999, 5: 78 - 81.
- [4] Jörg Bendix. Determination of fog horizontal visibility by means of NOAA - AVHRR [J]. IEEE, 1995, 3: 1847 - 1849.
- [5] Sarawut Sujitjorn, Pairoj Sookjaras, Wongwit Wainikorn. An expert system to forecast visibility in Don-Muang air force base [J]. IEEE, 1994, 3: 2528 - 2531.
- [6] Abraham Rosin, Myron Hecht, Jady Handal. Analysis of airport-runway availability [J]. IEEE, 1999, 432 - 440.

从表 1 中看到, 只要接收到 8 个信号, 伪随机码的识别概率就超过了 98%。对于使用了 16 位移位寄存器的伪随机码, 其结论与文献 [2] 一致。但应当看到无论移位寄存器的位数 n 是多少, 要想有效识别出制导信号的最小周期, 需要接收的制导信号应在 8 个左右。

4 结 论

本文提出的伪随机码最小周期的识别算法, 实现了接收 8 个左右的制导信号就能有效地识别出伪随机编码制导信号的最小周期。其算法简单, 可以有效地缩短激光告警装置识别制导信号最小周期的时间, 从而为光电对抗系统或装备进行激光角度欺骗干扰, 提供了更多的反应时间, 从而更能有效地对抗激光制导武器。

参考文献:

- [1] 孙晓泉, 吕跃广. 激光对抗原理与技术 [M]. 北京: 解放军出版社, 2000.
- [2] 安化海, 闫秀生, 郑荣山. 激光制导信号的编码分析与识别处理技术 [J]. 光电对抗与无源干扰, 1996, (3): 26 - 30.
- [3] 童忠诚. 激光导引头与激光告警机编码识别技术比较 [C]//光电技术与系统文选. 第十一届全国光电技术与系统学术会议: 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [4] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [5] 陈灿煌, 陈周造. Delphi5 彻底研究 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.