

能见度光学测量方法

王江安 康 圣* 吴荣华 陈 冬 梁善勇

(海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要 在军事领域,能见度是飞机和舰船安全航行、雷达、光电测量装备定标、军事目标打击等军事行动的重要依据之一。从能见度的定义入手,论述了现有的包括光学成像法、气溶胶采样法、光学参数测量法等能见度光学测量方法的原理、特性及适用范围。通过对比各种测量方法的优缺点,指出后向散射能见度测量方法具有仪器收发合一、无须合作目标、采样体积大等优点,特别适合于舰载、机载平台,以及对仪器体积、高能见度测量有要求的场合,因此该种能见度测量方法的研究将是今后研究的重点。

关键词 大气光学;能见度;消光系数;后向散射

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS200929s1.0283

Method for Calculating Visibility Utilizing Optic Ways

Wang Jiang'an Kang Sheng Wu Ronghua Chen Dong Liang Shanyong

(Institute of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract Visibility is one of the most important gists in military area. For example, airplane and ships' safely navigating need this parameter, demarcating radar or photoelectric equipment needs it and all the military strike needs it too. In this paper, the definiens of the visibility was first expatiated, and then the measurements of the visibility detecting and the theory of it were illuminated, including imaging method, aerosol sampling method, optical parameter calculating method and so on. Except that, the character and the applying area were discussed. In the end, a conclusion was pointed that visibility detecting with backscatter signal would become emphases in the future study.

Key words atmospheric optics; visibility; extinction coefficient; backscatter

1 引言

能见度是指人眼观测目标物时,能从背景分辨出目标物的最大距离。能见度是一个重要的气象观测要素,它的测量不仅可用于气象部门的气象分析,更可广泛地用于航空、航海、道路交通等部门^[1]。在军事领域,它是军用飞机和舰船安全航行、光电测量装备定标、军事目标打击等军事行动的重要依据之一。特别是对于军用飞行器材的安全和正常航行来说,能见度对飞行的影响最大:一个机场的起飞和着陆标准就是以能见度和云高的数值来表示的^[2]。

2 能见度测量方法分析比较

2.1 能见度的原始定义

气象能见度(Meteorological visibility)作为专

业术语,世界气象组织(WMO)是这样定义的^[3,4]:正常视力的人,在白天当时的天气条件下,能够从天空背景中看到和辨认出适当大小黑色目标物的最大距离;在夜间则是指假设亮度与白天相同的情况下能够辨认出目标物的最大距离。

白天能见度是指视力正常(对比感阈为 0.02)的人,在当时天气条件下,能够从天空背景中看到和辨认的目标物(黑体、大小适度)的最大距离。

夜间能见度是指:

1) 假定总体照明增加到正常白天水平,适当大小的黑色目标物能被看到和辨认出的最大距离。

2) 中等强度的发光体能被看到和识别的最大距离。

从上述能见度的原始定义来看,虽然目测能见

基金项目: 军内科研基金(HW2006425)资助课题。

作者简介: 王江安(1951—),男,教授,主要从事光电信号检测、激光大气探测等方面的研究。E-mail: gdyfzx@163.com

* **通信联系人.** E-mail: ks.kkk.sss@163.com

度最符合原始定义,但能见度人眼估测的方法受人主观因素的影响太大,容易产生较大的误差。

2.2 能见度测量现状

正是因为目视估测能见度存在上述问题,各国从 18 世纪就开始了能见度测量方法的研究^[5,7]。18 世纪后半期,法国研究者 Bouger 提出了大气透明度的概念,19 世纪, Lord Rayleigh 解决了关于空气和其他小球形粒子散射问题, W. E. Middleton 的专著中包含了关于能见度的理论及相关的研究。1924 年 Koschmieder 在总结 Lambert 和 Haecker 工作的基础上和若干假设条件下,“大气光”亮度的传输公式,目标物对比度传输公式和白天能见度计算公式,其正确性通过大量试验得到了证明,被公认为能见度测量仪器的基本理论。此后 Duntley, Middieton, Cordon 和 Porch, Horvath 等又对 Koschmieder 的理论又作了进一步的充实,从而使之更加完善。由于 Koschmieder 理论仅涉及白天能见度的问题,不能满足夜间能见度的观测需要,因此夜间能见度一般采用 Allard 在 1876 年提出的大气灯光传输公式作为灯光能见度公式。这样由 Koschmieder 理论和 Allard 定律就组成了完整的能见度自动测量设备的理论基础^[8-11]。

目前,利用仪器测量能见度的方法,粗略的分可分为光学成像法、气溶胶采样法、光学参数测量法等。

其中,光学成像法包括:数字摄像测量法及卫星遥感图像测量法;气溶胶采样法主要是:光学粒子计数器能见度测量法;光学参数测量法主要利用大气消光系数与可见光透过率及能见度之间的关系反演大气能见度,该方法为目前较为流行的计算方法,在工程应用上也广为流行,主要包括:光学透射式测量法、光学侧向散射式测量法、光学前向散射式测量法、光学后向散射式测量法。

2.3 现有能见度测量方法及其原理

2.3.1 数字摄像测量法基本原理

数字摄像法^[12]是利用数字摄像机摄得既定目标物及其背景和图像,然后,由计算机对图像作分析处理,获得能见度数值。

由于人眼在观察极限能见距离目标物时,起着决定作用的是亮度差异,所以,利用数字摄像法测量能见度时,也必须从亮度对比定义开始。

以观察者为基点,设目标物视亮度为 B_t ,背景的视亮度为 B_g ,则它们之间的亮度对比 K 定义为:

$$K = |(B_t - B_g)/B_g|. \quad (1)$$

随着距离加大, K 值逐渐减小,目标物将逐渐变模糊;当 K 小于某一临界值 0.02 时,人眼将无法把目标物从背景中分辨出来。

在一定距离以外的物体所发的或所反射的光,在进入人眼前要经历从所在位置到观察者之间的一段空气柱的辐射传输,通过求解辐射传输方程^[13],不难写出离观察者距离 R 处目标物和背景的视亮度表示式:

$$B_t(R_t) = B_t^* \exp\left[-\int_0^R \delta(r) dr\right] + B(R), \quad (2)$$

$$B_g(R_g) = B_g^* \exp\left[-\int_0^R \delta(r) dr\right] + B(R), \quad (3)$$

(2)式、(3)两式中,每式的前一项均可看作是目标物或背景的固有亮度(即 B_t^* , 或 B_g^*),经厚度为 R 的空气柱消光后对视亮度的贡献, $\delta(r)$ 为大气消光系数;后一项 $B(R)$ 是空气柱本身的附加亮度对视亮度的贡献,若假设大气中自然照明强度为 J_v ,则厚度为 R 的空气柱亮度可表示为:

$$D(R) = \int_0^R \delta(r) \cdot J_v \cdot \exp\left[-\int_0^R \delta(r) \cdot dr\right] \cdot dr. \quad (4)$$

若仅考虑观察点与目标物处在同一高度的水平能见度问题,同时假设大气消光系数不随距离变化,气柱受到的自然照明强度也不随距离变化,并令 R_t 为目标物离观察者的距离;在以天空为背景,取 K 为 ϵ 时,从(1)式 ~ (4)式推导可得到白天的水平能见度(5)式。

$$V = \frac{\ln(1 - B_t^*/B_g) + \ln(1/\epsilon)}{\ln(1 - B_t^*/B_g) - \ln(1 - B_t/B_g)} \cdot R_t, \quad (5)$$

若假设目标物为绝对黑体,即 $B_t^* = 0$,并取 ϵ 值为 0.02,可得到

$$V = \frac{-3.912}{\ln(1 - B_t/B_g)} \cdot R_t. \quad (6)$$

(6)式便是摄像法测量能见度的基本公式。由该式可知,在符合目标物为黑体的条件下,只要知道目标物与观测者之间的距离 R_t ,并测得目标物的视亮度 $B_t(R_t)$ 与天空背景的视亮度 B_g 比值,即可计算出水平气象能见度 V 。而(5)式则可用于分析目标物为非黑体时,忽略目标物固有亮度 B_t^* ,会对结果带来多大的影响。

这种方法近似于用人眼看目标物的方式,成本低、设备简单,但对目标物要求高,对低能见度测量的误差大,在如何实现取图等检测全过程的自动化上也还需作进一步研究。

2.3.2 卫星遥感图像测量法^[14,15]

运用卫星遥感资料对雾与能见度进行监测是近年来开展能见度研究的重要光学方法之一,测量手段主要以 GMS(Geostationary meteorological satellite)和 NOAA(National ocean-atmosphere administration) 卫星遥感资料为主。由于研究开展的比较晚,因此许多研究尚处于探索分析阶段。

目前国内主要利用 MODIS(Moderate resolution imagin spectroradiometer)中分辨率成像光谱数据及海域能见度的连续观测资料,从海上卫星观测资料及同步能见度数据着手,遵照能见度相关最大和通道间相关性最小原则,采用统计回归方法,得到通道组合能见度拟合关系,拟合不同条件下的能见度遥感反演的经验公式。

试验证明该方法在大气状况较为理想的情况下(晴空、积雨云)精度较高,相关系数大于 0.6 和 0.9,置信度在 95% 以上,对于复杂大气条件下计算精度还存在一定问题。虽然利用卫星遥感图像测量能见度目前还不成熟,但该方法可以有效弥补现有海上能见度观测资料不足的缺憾,可为进一步的遥感业务化服务提供思路。

2.3.3 光学粒子计数器能见度测量法^[16]

该方法直接抽取环境空气,利用光学粒子计数器对不同尺寸大气气溶胶粒子的粒子数密度谱进行测量,然后使用多元线性回归分析的方法,给出大气能见度的经验计算公式。该测量方法由于没有良好的理论模型,因此在使用范围上尚存在一定的局限性。

2.3.4 光学透射式测量方法^[17]

利用光学透射式测量能见度的仪器一般称为透射仪,透射仪是出现最早的一种能见度测量仪。最早研制出的是单端透射仪,由于其结构庞大,使用安装不便、仪器采用的反射器加工难度大,且误差很难克服,这种透射仪已经被淘汰。继单端透射仪之后出现了双端透射仪,这种透射仪克服了单端透射仪的缺点,经过不断完善,一直在应用中,测量理论也比较成熟。其原理见图 1。目前各大型机场使用较多的是

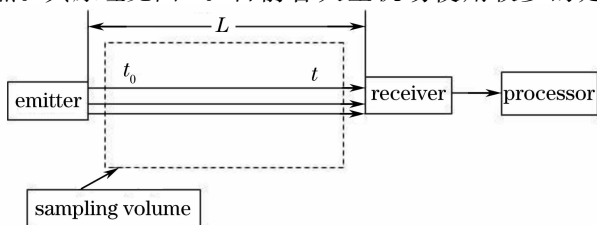


图 1 透射式能见度仪原理示意图

Fig. 1 Theoretic sketch of transmission meter

芬兰 VAISALA 公司的 MITRAS 透射仪,见图 2。



图 2 芬兰 VAISALA 公司的 MITRAS 透射仪

Fig. 2 VAISALA MITRAS transmission meter

在使用时,发射器发出的一束光强为 I_0 的平行光束,通过厚度为 L 的大气衰减后,光束到达接收器时光强变为 I ,定义 $I/I_0 = T$ 为这段大气的透过率,设这段水平大气为均匀的,大气消光系数为 σ ,则由 Lambert-Bouguer 定律:

$$I = I_0 \exp\left[-\int_0^L \sigma(r) dr\right], \quad (7)$$

可得:

$$I = I_0 \exp(-\sigma L), \quad (8)$$

即

$$\sigma = -\ln T/L. \quad (9)$$

求出消光系数 σ ,就可以由 Koschmieder 定律计算出能见度值。由(9)式可以看出,透射仪测量所需的长度即基线长 L 是测定 σ 值的关键因素。 L 值一般由当地能见度情况确定, L 应小于盛行能见度,若 L 大于能见度值会造成接收机因为无接收信号或接收信号过小而无法工作。

2.3.5 光学侧向散射式测量方法

光通过大气时,产生的消光效应主要由吸收和散射引起的,而吸收系数一般比散射系数小一个数量级。所以,相对于散射效应,吸收效应可以忽略。基于这一点,如果能测出散射引起的消光效应,便可以确定能见度值。随着散射理论的出现,散射仪很快便发展起来,人们首先研究的是能见度侧向散射仪。侧向散射仪测量基本原理如图 3。

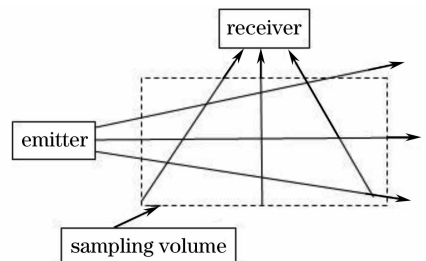


图 3 侧向散射仪原理示意图

Fig. 3 Theoretic sketch of side scatterometer

测量时,发射器发出漫射光照射到采样体积上被散射;接收器侧向接收散射光强。由发射光强和散射光强可以得到总散射系数。该设备实际使用精度很差,反应不灵敏,目前已极少应用。

2.3.6 光学前向散射式测量方法^[4,18]

研究发现利用前向散射光测量能见度的效果更令人满意,各种结构的前向散射仪也因此相继出现。目前使用较多的是芬兰 VAISALA 的 FD-12 散射式能见度仪及。国内也有类似的研仿产品,如上海的 CJY-1 型散射仪(见图 4)。前向散射仪的原理示意图见图 5。



图 4 CJY-1 型散射仪

Fig. 4 CJY-1 forward scatter visibility meter

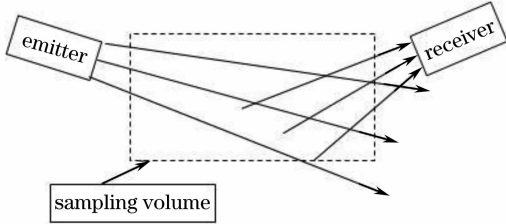


图 5 前向散射仪原理示意图

Fig. 5 Theoretic sketch of forward scatter meter

前向散射仪的散射角一般在 $20^\circ \sim 50^\circ$ 之间。某些前向散射仪的散射角大小可以根据盛行能见度进行调整。前向散射仪的收发两端距离一般为几米到十几米之间。因此前向散射仪的结构较为紧凑,外界干扰的影响很小,安装维护方便。在测量能见度时根据文献^[19],有(10)式成立

$$\phi_2 = 0.45 \times (S_1/S_2) \times (\phi_1/a_2^2) \times (U/V) \times \exp[-3(a_1 + a_2)/V], \quad (10)$$

式中 ϕ_1 为通过发射端透镜的光通量, ϕ_2 为通过接收端透镜的光通量, S_1 为发射端透镜的截面面积, S_2 为接收端透镜的截面面积, a_1 为发射端透镜到取样空间的距离, a_2 为接收端透镜到取样空间的距离, U 为取样空间气体的漫射体积, V 为能见度。

然而,该测量方法存在着以下不足:采样体积小,单台测量仪极难使用,需要组网才能保证精确的测量。此外,该类型的能见度测量仪对于高能能见度天气

的测量效果也不好。

2.3.7 光学后向散射式测量方法

1958 年 Curuio 和 Knestrick 研究了大气消光系数和后向散射系数之间的关系,认为后向散射系数可以用来确定能见度。按照这一理论,德国的 Implusphysik 公司研制出了第一台后向散射仪。目前,利用后向散射信号计算大气能见度的方法主要有 Klett 的分析算法及 Coliss 的斜率算法^[3],由于 Coliss 斜率法较为成熟,因此在工程运用上主要采用该方法测量能见度。其结构原理见图 6, Coliss 斜率法测量能见度基本原理见图 7 及(11)式~(18)式^[20]。

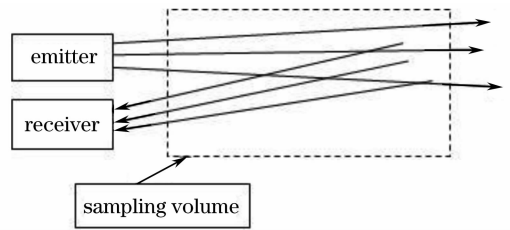


图 6 后向散射仪结构原理示意图

Fig. 6 Theoretic sketch of backward scatterometer

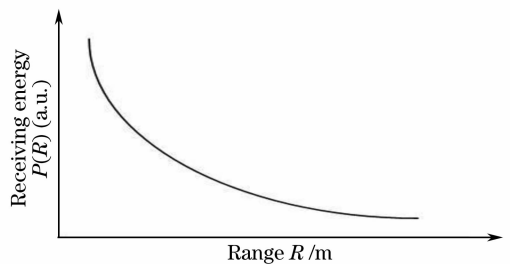


图 7 激光回波信号幅度随距离的变化关系

Fig. 7 Relation between range of laser backward signals

$P(R)$ and distance R

一个激光脉冲内激光回波的幅度 $P(R)$ 随距离 R 的变化曲线见图 7,若 R_1 、 R_2 是 $P(R) \sim R$ 图中两点,则根据激光传输方程可得:

$$P(R_1) = \frac{CE\beta(R_1)}{R_1^2} \cdot \exp\left[-2 \int_0^{R_1} \sigma(R) dR\right], \quad (11)$$

$$P(R_2) = \frac{CE\beta(R_2)}{R_2^2} \cdot \exp\left[-2 \int_0^{R_2} \sigma(R) dR\right], \quad (12)$$

式中 C 为系统常数, β 为大气后向散射系数, σ 为消光系数, E 为激光系统常数,它由激光发射功率,激光脉冲宽度,望远镜的有效接收面积共同决定。

假设大气均匀则存在关系式(13)

$$\beta(R_1) = \beta(R_2), \quad (13)$$

$$\int_0^R \sigma(R) dR = \bar{\sigma} R, \quad (14)$$

由(10)式~(13)式可以推导出

$$\frac{P(R_1)}{P(R_2)} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 \cdot \exp[-2\bar{\sigma}(R_1 - R_2)], \quad (15)$$

式中 $\bar{\sigma}$ 即为消光系数。最终可推得：

$$\bar{\sigma} = -\frac{1}{2(R_1 - R_2)} \ln \frac{P(R_1)R_1^2}{P(R_2)R_2^2}, \quad (16)$$

根据人眼识别目标的对比阈值为 0.02, 可以推得能见度距离 V_m 为：

$$V_m = \frac{3.912}{\bar{\sigma}} \left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^{-q}, \quad (17)$$

式中波长 λ 以 μm 计。 q 值在不同地区和时间可能不同, 最常用的是 Kruse^[21] 等给出的值：

$$q = \begin{cases} 0.585V_m^{1/3}, & V_m < 6 \text{ km} \\ 1.3, & \text{中等能见度} \\ 1.6, & \text{良好能见度} \end{cases} \quad (18)$$

采用后向散射测量方法测量大气能见度, 具有如下优点：

1) 系统上发射端与接收端一体化设计, 体积小, 具有便携型。

2) 无需测量发射光信号的绝对光强, 避免了绝对光强测量不准引入的误差。

3) 无须合作目标, 采样空间大, 通过提高发射端能量能够较为精确的遥感测量高能能见度值。

正是由于具有以上特点, 后向散射式能见度测量仪特别适合舰船、无人机等移动及空间受限平台使用, 具有极高的军事及经济价值。

然而, 传统的能见度后向散射测量方法主要采用两点采样计算, 而且受大气散射和吸收作用影响回波信号微弱, 因此该测量方法主要面对下述困难：

- 1) 后向散射信号微弱, 信噪比低, 采样距离短；
- 2) 两点式测量假设条件为大气均匀, 在不均匀大气环境下无法使用。

其中, 该方法最致命的弱点就是消光系数是一个非线性函数, 传统的两点采样测量假设大气均匀将其线性处理, 丢失了大量的中间信息, 随机性大、受环境影响高、测量精度低。

针对传统两点式测量误差大这一问题, 海军工程大学的王江安、康圣、蒋冰莉等人提出一种激光大气能见度断层测量数据融合的算法^[22,23]并于 2006 年在国内首次研发出便携式激光后向散射式大气能见度测量仪原理样机(图 8)。

该系统利用高分辨率多点断层技术, 通过高速采样将非线性函数细分成多个线性区间, 通过数据相关及融合处理, 完成消光系数的逼近计算。使该



图 8 能见度测量系统外观图

Fig. 8 Appearance of visibility meter

算法最大限度的增加了采样空间, 提高了数据的精确度。针对后向散射回波信号弱, 信噪比低这一缺点, 该课题小组提出了多增益多时序数据融合算法及同步选通技术予以解决。其中, 多增益多时序数据融合算法利用不同时序高、中、低三增益数据融合, 从而多次累积提高了整个系统的信噪比。此外, 在技术上该系统利用声光调制器件高速控制选通门关闭, 大大减小了背景噪声信号, 提高了远距离回波信号的信噪比, 加大了系统的采样空间。

该样机用 $1.06 \mu\text{m}$ 红外激光作为探测源, 先后经过武汉气象台、孝感空军气象台和北京空军气象台的实际试用并与当地目测值及芬兰 Vaisala 测量值进行了 1681 组数据的比对, 整体数据合格率平均达到 90%。目前, 该课题组又对样机进行了改进, 设计出第二代激光后向散射式能见度测量仪, 该仪器进一步提高了设备的自动化程度、采样距离及测量精度(见图 9)。

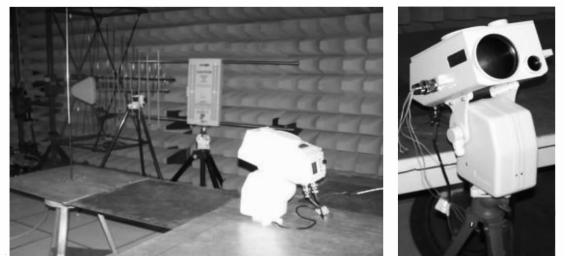


图 9 激光后向散射式能见度测量仪 II 进行 EMC 试验图

Fig. 9 Laser backward scattering meter II was tested in EMC examination

2.4 国内外能见度测量方法及仪器比较

目前可直接用于试验室或工程上的能见度测量方法主要有: 数字摄像测量法、光学粒子计数器测量法、透射式测量法、双光路前向散射、后向散射式等方法, 其精度、所用设备、设置参数比较分析见表 1^[24,25]。

表 1 能见度测量方法及仪器对比表
Table 1 Contrast of visibility measurement and the apparatus

Measure method	Utilizing instrument	Country	Precision	Aiming target/base line/scattering angle/sampling space
Digital photograph	Digital photograph visibility system	China	$\leq 13\%$	Needing aiming target
Optical particle counter	Utilizing OPC multilinearity regression	China	$\leq 25.9\%$	1 cm^3
Transmission method	MITRAS transmission meter	Finland	$\leq 16\%$	Base line 35~200 m
Dual dypass forward scatter	VS8364	American	$\leq 15\%$	Scattering angle 35°
Single dypass forward scatter	FD12P	Finland	$\leq 10\%$	Scattering angle 33°
Back scatter	Laser back scatter visibility meter II	China	$\leq 13\%$	Sampling distance $\geq 3000 \text{ m}$

通过对比我们可以看出,能见度后向散射测量法在应用前景及精度上是有一定优势的。

3 各种测量方法优缺点分析

目前,卫星遥感图像及光学粒子计数器能见度测量法均处于理论研究阶段,能见度计算值一般多采用实测数据多元线型回归分析的方法,给出大气能见度的经验公式。用上述方法测量大气能见度的理论模型仍处于探索阶段,因而在工程上上述两种方法仍不多见,所以在这里我们主要叙述其他四种能见度测量法的优缺点。

3.1 数字摄像测量法优缺点分析

数字摄像测量法是最接近人眼目测的能见度测量法,在目标物为黑体的情况下精度较高,但该方法在工程上使用主要存在以下问题^[24]:

- 1) 需要多处设置目标靶,固定使用,无法用于移动平台;
 - 2) 目标靶要求为黑体这一要求很难实现,容易造成误差;
 - 3) 需要根据能见度的好坏选取适当远处的目标,难以实现自动测量;
 - 4) 测量受基线长度的影响大;
- 考虑到上述问题,目前该种能见度测量法多用于科研院所,工程化使用的难度较大。

3.2 透射式能见度测量法的优缺点分析

透射式能见度测量法的优点:

- 1) 光线所遵循的光路是对应于实时条件的典型光路;
 - 2) 可同时测定被吸收光线和被散射光线。
- 缺点主要为:

- 1) 购置和安装价格昂贵(例:芬兰 MITRAS 透射仪系统价格为数百万元);
- 2) 预防性保养频繁;
- 3) 校准和标定困难;
- 4) 对光学污染很敏感。

3.3 前向散射式能见度测量法优缺点分析

其优点包括:

- 1) 外形小巧易安装;
- 2) 易校准、标定;
- 3) 不需要太频繁的保养;
- 4) 是得到 FAA、NWS 和世界气象组织认可的全球通用技术。

这类仪器的缺点是采样空间小,在大气不均匀条件下无法使用,因此需要多台组网使用。

3.4 后向散射式能见度测试法优缺点分析

该测量法优点:

- 1) 仪器外形小巧易安装
- 2) 校准和标定简易
- 3) 不需要频繁的保养
- 4) 发射接收同端,可广泛用于移动平台(机载、舰载)能见度的测量

缺点主要是后向散射回波信噪比低,因此传统两点式测量方法精度低,但采用上述的激光大气能见度断层测量数据融合算法能够较好地解决上述问题。目前,通过大量外场试验已证明该方法的计算精度已经十分接近通用的能见度测量仪。

4 结 论

通过比较,可看出透射式能见度测量方法具有测量直接、方法简单、易于实现的优点,且经过大量的实验证明该测量方法及相应仪器对于低能见度环境下还是较适用的。因此在对低能见度要求比较高且对仪器体积要求不高的固定方向测量场合(如机场)就可利用该设备进行能见度的测量。而前向散射式能见度测量设备具有结构紧凑、体积小的优点,但采样计算的体积小,对高能见度及大气分布不均匀的情况计算误差大,因此可在高速公路等场合组网使用。对于后向散射式能见度测量仪,具有体积小、无须合作目标、采样体积大等优点特别适合于移动平台、对仪器体积有要求的场合、对高能见度测量

有要求的场合进行能见度的测量,因此是各国发展的重点。当务之急就是对计算模型进行优化,使之能够在各种条件下都能获得稳定的解,而将其推广使用。

参 考 文 献

- 1 Wang Qiwan. The design of the transmit and incept devices of the forward scattering visibility meter [J]. *Meteorological Hydrological and Marine Instrument*, 2005, (2): 1~16
王启万. 前向散射式能见度仪的发射和接收装置设计[J]. 气象水文海洋仪器, 2005, (2): 1~16
- 2 Su Jianzeng. The otherness of visibility in flight with different media[J]. *J. Flying College Caac.*, 2005, **16**(3): 29~31
苏建增. 不同介质下的能见度在飞行中表现的差异性[J]. 中国民航飞行学院学报, 2005, **16**(3): 29~31
- 3 Liu Hongxun, Li Taiyu. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation[M]. Beijing: Weather Press, 1983. 236~251
刘宏勋,李太宇. 气象仪器观测方法指南[M]. 第8版,北京:气象出版社,1983. 236~251
- 4 Chen Anjun. A laser detection system for visibility using forward scattering method[J]. *Henan Science*, 2001, **19**(6): 56~58
陈安军. 基于前向散射的能见度激光测量系统[J]. 河南科学, 2001, **19**(6): 56~58
- 5 I. I. Kim, E. L. Woodbridge, V. J. Chan *et al.*. Scintillation measurements performed during the limited-visibility lasercom experiment[C]. *SPIE*, 1998, **3266**: 209~220
- 6 P. Polak-Dingels, P. R. Barbier, D. W. Rush *et al.*. Long-term fading statistics measurements of an atmospheric optical communication channel[C]. *SPIE*, 1999, **3850**: 40~48
- 7 I. I. Kim, P. Adhikari, M. Cheritaresse *et al.*. Quantifying the effects of weather and scintillation on the network performance of the San Diego LaserNet[C]. *SPIE*, 1999, **3532**: 6~15
- 8 W. C. Malm, K. A. Gebhart, J. F. Sisler. Introduction to Visibility[M]. Fort Collins: Colorado State University Press, 1999. 87~95
- 9 W. C. Brown. Optimum thresholds for optical on-off keying receivers operating in the turbulent atmosphere [C]. *SPIE*, 1997, **2990**: 254~261
- 10 J. E. Kaufmann. Performance limits of high-rate space-to-ground optical communications through the turbulent atmospheric channel[C]. *SPIE*, 1995, **2381**: 171~182
- 11 A. K. Majumdar. Atmospheric turbulence effects on the performance of multi-gigabit downlink PPM laser communications [C]. *SPIE*, 1990, **1218**: 568~584
- 12 Xie Xingsheng, Tao Shanchang. Calculating visibility using digital photography[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, (1): 97~100
谢兴生,陶善昌. 数字摄像法测量气象能见度[J]. 科学通报, 1999, (1): 97~100
- 13 Zhou Xiujie. High School Atmospheric Physics [M]. Beijing: Weather Press, 1992. 19~27
周秀骥. 高等大气物理学[M]. 北京:气象出版社, 1992. 19~27
- 14 Qian Junping, Huang Fei, Wang Guofu *et al.*. Empirical models for retrieval of atmospheric horizontal visibility over the sea based on MODIS data[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, **5**(3): 355~360
钱峻屏,黄菲,王国复等. 基于MODIS资料反演海上能见度的经验模型[J]. 中国海洋大学学报, 2006, **5**(3): 355~360
- 15 Qian Junping, Huang Fei. Calculation of atmospheric transmissibility of MODIS data under different levels of meteorological visibilities [J]. *J. Image and Graphics*, 2006, **4**(4): 575~579
钱峻屏,黄菲. 基于MODIS数据的典型能见度条件下大气透过率计算[J]. 中国图象图形学报, 2006, **4**(4): 575~579
- 16 Yan Fengqi, Hu Huanling, Yu Tong. Measurement of particulate mass concentrations and atmospheric visibility with an optical particle counter [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2004, **21**(1): 98~102
阎逢旗,胡庆陵,虞统. 用光学粒子计数器测量颗粒物质量浓度和能见度[J]. 量子电子学报, 2004, **21**(1): 98~102
- 17 Lin Ye, Wang Qing'an, Gu songshan *et al.*. Tutorial for Atmospheric Sounding[M]. Beijing: Weather Press, 1995. 96~97
林晔,王庆安,顾松山等. 大气探测学教程[M]. 北京:气象出版社,1995. 96~97
- 18 Vaisala Company. MITRAS Transmission meter User's Guide [A]. 1995. 11
- 19 Vaisala Company. FD12P Visibility Meter Specifications [A]. Edition FD12PTS0. 2, 1991. 10~24
- 20 Jiang Bingli, Wang Jiang'an, Zong Siguang. Study of atmospheric transmission and back scattering laser detection [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, **12**: 17~19
蒋冰莉,王江安,宗思光. 大气传输对激光后向散射式能见度测试的影响及其理论研究[J]. 光学与光电技术, 2004, **12**: 17~19
- 21 R. W. Kruse, L. D. McGlauchlin, R. B. McQuistan. Elements of Infrared Technology: Generation, Transmission and Detection [M]. John Wiley and Sons Inc, 1962. 179~180
- 22 J. D. Klett. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2): 211~220
- 23 Jiang Bingli, Wang Jiangan, Zong Siguang. Principle and experimental research of carrier lidar for detecting visibility [J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(8): 548~550
蒋冰莉,王江安,宗思光. 舰用探测大气能见度激光雷达样机的试验研究[J]. 激光与红外, 2005, **35**(8): 548~550
- 24 Pu Jiangping, Hu Zonggang, Wei Yangchun *et al.*. Comparison and analysis of property of visibility automatic observation instruments [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2002, **22**(1): 60~71
濮江平,胡宗刚,魏阳春等. 能见度自动观测系统性能对比及分析[J]. 气象科学, 2002, **22**(1): 60~71
- 25 Lü Weitao, Tao Shanchang, Tan Yongbo *et al.*. Application of practical blackbody technique to digital photography visiometer system [J]. *Quarterly J. Applied Meteorology*, 2003, **14**(6): 691~699
吕伟涛,陶善昌,谭涌波等. 数字摄像能见度观测系统中实用黑体技术的应用[J]. 应用气象学报, 2003, **14**(6): 691~699