

激光探测能见度的实验研究

吕达仁 魏 重 张健国

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

利用红宝石激光雷达初步实验对比表明,利用激光雷达可以定量求得各种能见度下的水平能见度值,只是在低能见度情况要采取适当的技术和分析方法。用激光探测目前飞机临界着陆能见度也是可能的,但在更低能见度下大气多次散射起着重要作用,给利用激光探测斜视能见度带来局限。

引 言

能见度是一个直接服务于国防和国民经济的重要气象要素,它对航空、航海、侦察等一系列实际问题具有重要作用。

目前能见度测量大部分情况下还是靠目测,即用目视已知不同距离各目标物的可见性来确定。在具有不同距离目标物的地点,这是一种确定水平能见度的有效方法。但对于缺乏目标物的沙漠、海洋等地区则无法使用此法。再者,对于许多斜视能见度探测则是无法设立目标物的。几十年来这个问题一直受到重视,但至今未获得满意的解决。

激光问世以来,许多人对利用激光束特性来单端测定大气能见度寄以相当的希望。近十年来,特别是七十年代以来,作了不少方案论证和实验研究^[1-3]。但目前并未有成熟的解决。1972年我们^[4]提出了利用激光雷达测定大气水平和斜视能见度的原理方案,根据这一方案设想,几年来,主要是1975年,我们作了一定的实验研究。通过实验对比,一方面证实了我们所提方案的可行性,同时也发现了该方案的局限性,为进一步工作提供了依据。本文对试验结果作初步分析。

一、实验情况

从1972—1975几年间,我们陆续进行了激光探测能见度的原理试验。试验地点在北京北郊本所六楼平台。所用激光雷达为本所I型激光气象探测仪,其特性可见[7]。

试验时,一方面作激光探测,同时以目视周围不同距离的目标的可见性来确定水平能见度。目标物在近处均为建筑物,远处则为山峰。

这里需要说明的是,用目视目标物可见性的方法来确定“气象能见度”本身就存在着相当的误差。除了实验人员的判断经验不足这一主观原因外,在客观上还存在着如下几个因素:1.目标物并非按确定气象能见度所要求的那样是绝对黑体,而是颜色各异,以灰

色和暗红色居多；2. 太阳和目标物与观测点的相对位置以及目标物是否被照射对该目标物(在同样大气状态下)的可见性有相当影响。3. 试验点周围 10 公里以内建筑物较多, 利于判别。10 公里以外地面建筑物目标较少, 一般以远近山峰为目标物, 这些山峰与试验点的距离由 15 公里直至上百公里, 相对高差从 300 米直至 1000 多米。因此对它们的可见性实际上是一个斜视能见度问题, 特别在大气上下层缺乏充分混合时, 这个能见度值显然会不同于真正的水平能见度, 在资料分析时会反映出这一点；4. 最后, 大气在水平方向上的不均匀也可造成误差, 这时各方向上的能见度可能会不相同。

二、结果分析

1. 水平消光系数和水平能见度的关系

水平能见度和大气水平消光系数之间有如下简单关系^[6,5]

$$R = \frac{3.912}{\sigma_w} \quad (1)$$

式中 R 为水平能见度(公里), σ_w 为白光消光系数(公里⁻¹), 近似等于波长为 0.55 微米的

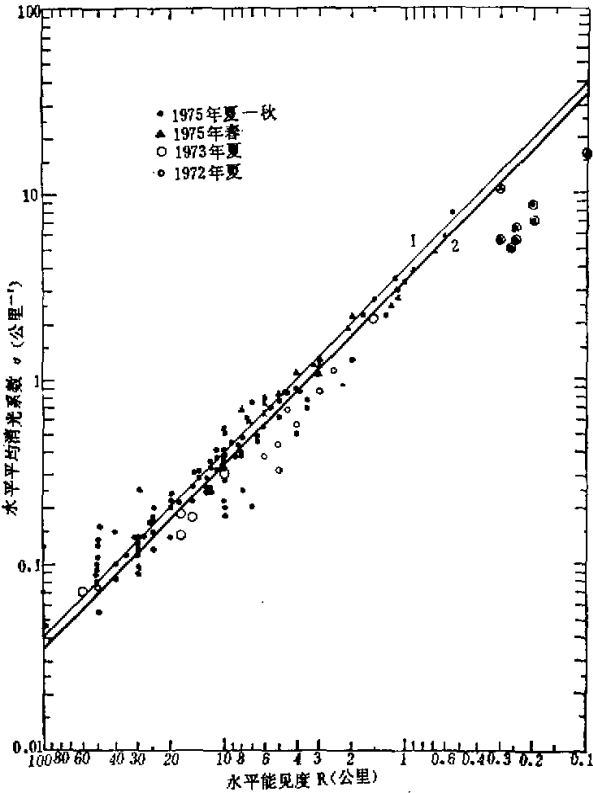


图1 水平能见度和激光探测大气水平平均消光系数对应关系的观测结果

绿光消光系数。我们的探测波长为 0.6943 微米,测得的消光系数 $\sigma_{0.69}$ (以下用 σ_0 表示) 与 $\sigma_{0.55}$ 有一定的定量关系^[6]。我们直接将 σ_0 与 R 作对比,初步看出其间有相当密切的定量关系。图 1 为 150 次观测计算结果,包括了几年来各个季节各种天气条件下的测量结果。图中 1 和 2 分别表示按(1)式和(2)式绘出的直线。

从图 1 可以看出,在不同的能见度范围内 R 和 σ_0 之间有不同的对应统计关系。大致可明显地分为三种情况。

(一) R 为 1—30 公里情况 这时从统计平均看, R 和 σ_0 之间有较好的线性关系,大致可用

$$R = \frac{3.4}{\sigma_0} \quad (2)$$

的关系式表示。其中有些点比较离散,其原因已在前面说明。考虑到这些复杂因素如能作出相应的订正则离散情况一定会有更好的改善。进一步证明(2)式的可适用性。

在计算 σ_0 时我们采用的是[6]中所列的水平均一大气的激光雷达方程

$$\ln r^2 V(r) = \ln C_A \beta_{\pi} - 2\sigma_0 r \quad (3)$$

r 为距离, $V(r)$ 为回波幅度, C_A 为仪器常数, β_{π} 为大气后向散射系数。计算所用距离一般为 2—3 公里,并取 3—5 次观测数据的平均值。但当能见度低于 3 公里时,我们只取 1 公里以内的观测数据求 σ_0 ,原因是避免多次散射影响。在讨论低能见度探测时会详细说明这一点。

我们的观测包括了各种好坏天气如雨雪等,所以对北京地区有一定的代表性,对其他地区估计(2)式的差别不会很大。

(二) $R > 30$ 公里的洁净大气情况 这时激光所测 σ_0 值较(2)式据 R 反推值普遍偏高。从图 1 看,甚至有高出不至一倍的。原因实际上前面已述,即所定 R 值实际为斜视能见度,虽然估计起来仰角仅 1° 左右,似乎与“水平”相差不多,但仔细考察几十公里视程上绝大部分视程在离地百米以上的大气,起主要作用的是上空大气而非贴地大气,而在极晴朗天气,往往贴地几十米大气还稍显浑浊,受地表粒子输送影响,不能代表上空情况。几年来,多次观测都存在这一情况。例如 1975 年 6 月 24 日 17 时能看到近百公里的远山峰,但激光测得 $\sigma_0 = 0.12$ 公里⁻¹,显然地面能见度达不到 100 公里。但若观察这时的消光系数垂直分布(见图 2)则可以看出,虽然 σ_0 偏大,但 σ 值随高度迅速减小,离地不到 100 米 σ 值即降至 0.038 公里⁻¹ 的小值,这种分布可以很好地解释 σ_0 与 R 值之间的矛盾。

高能见度下 σ_0 与 R 的差异反映出水平能见度和斜视能见度的差别。在这一意义上说,激光所测 σ_0 值倒是为真正的水平能见度确定提供了较为科学的依据。

(三) $R \leq 1$ 公里的坏天气情况 在我们观测中即是有雾或雪的天气。从图 1 看,这一段中激光观测推算的 σ_0 远较(1)式或(2)式按 R 值反推 σ 值为小。当能见度大于 500 米时,取离测站 200 米处一段 100 米长度内的测量数据求得的

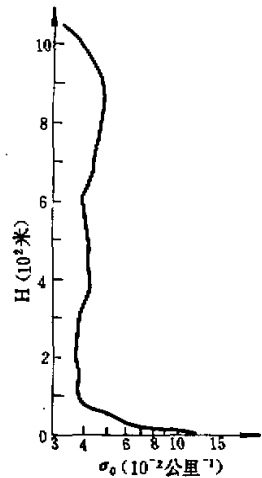


图 2 1975 年 6 月 24 日 17 时的 σ 垂直分布

平均 σ_0 还与 (1) 式推算值接近。而当能见度更低时, 则用任一段观测数据计算得的平均 σ_0 值均大大低于 (1) 式推算值。实际上这时激光观测的计算结果绘于 $\ln r^2 V(r) - r$ 直角坐标内时根本不是一条直线, 而是一条明显的曲线, 而与 (3) 式预计的直线关系不同, 因而难以据此曲线求出 σ_0 值来。

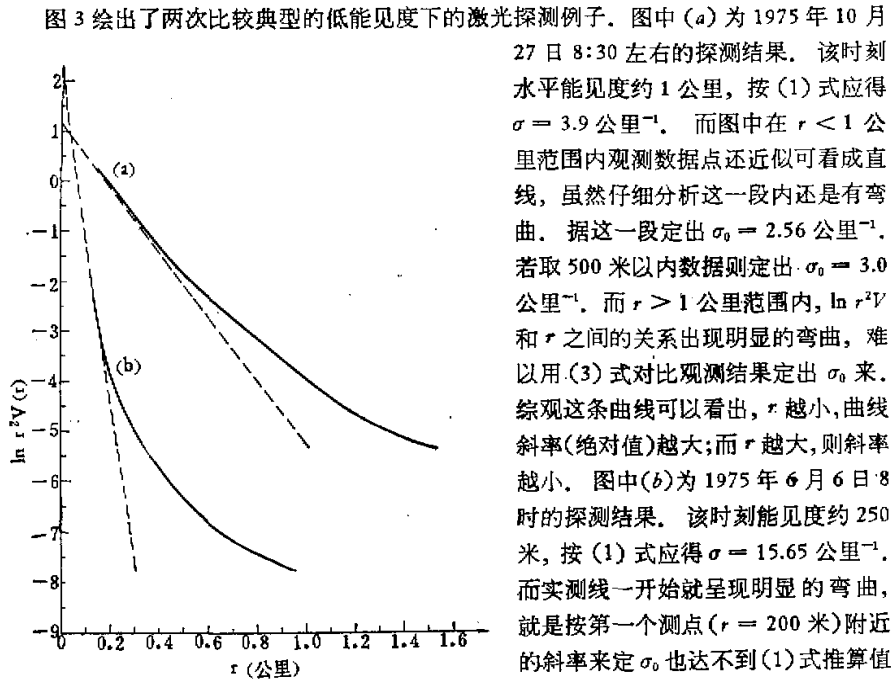


图3 低能见度下的激光回波反映出大气多次散射的严重影响。本图给出二例表明实测计算所得 $\ln r^2 V(r) - r$ 曲线与 (3) 式的偏离。

图3 绘出了两次比较典型的低能见度下的激光探测例子。图中 (a) 为 1975 年 10 月 27 日 8:30 左右的探测结果。该时刻水平能见度约 1 公里, 按 (1) 式应得 $\sigma = 3.9$ 公里⁻¹。而图中在 $r < 1$ 公里范围内观测数据点还近似可看成直线, 虽然仔细分析这一段内还是有弯曲。据这一段定出 $\sigma_0 = 2.56$ 公里⁻¹。若取 500 米以内数据则定出 $\sigma_0 = 3.0$ 公里⁻¹。而 $r > 1$ 公里范围内, $\ln r^2 V$ 和 r 之间的关系出现明显的弯曲, 难以用 (3) 式对比观测结果定出 σ_0 来。综观这条曲线可以看出, r 越小, 曲线斜率 (绝对值) 越大; 而 r 越大, 则斜率越小。图中 (b) 为 1975 年 6 月 6 日 8 时的探测结果。该时刻能见度约 250 米, 按 (1) 式应得 $\sigma = 15.65$ 公里⁻¹。而实测线一开始就呈现明显的弯曲, 就是按第一个测点 ($r = 200$ 米) 附近的斜率来定 σ_0 也达不到 (1) 式推算值的一半, r 越大, 斜率越小。若在这种情况下硬性套用 (3) 式定 σ_0 , 则所定值会严重偏离实际值。而按 (3) 式定

出的 σ_0 反推的能见度一定会大大偏大, 造成严重错误, 以至完全不可相信。

产生问题的根本原因在于, 在低能见度 (亦即实际 σ 值很大) 情况下激光回波中来自大气多次散射的贡献会远超过单次散射贡献, 因而造成 (激光脉冲发射后) 某一时刻接收到的回波强度主要 (甚至完全) 不是来自与该时刻对应的距离 (沿发射方向 $r = 1/2 ct$, c 为光速, t 为激光脉冲发射起算时间) 上的大气后向散射强度。

激光雷达采用窄波束窄脉冲发射, 一般说来, 大气对它的多次散射作用较之对宽波束甚至连续光的多次散射作用弱得多, 因而在一般场合均采用以大气单次散射为基础的激光雷达方程⁽⁶⁾

$$r^2 V(r) = C_A \beta_{\pi}(r) e^{-2 \int_0^r \sigma(r') dr'}, \quad r = \frac{1}{2} ct \quad (4)$$

并据此作各种推导运算。Zuev 等⁽²⁰⁾在室内实验中得出结果说在光学厚度达 23 时激光束状波的后向散射仍然符合单次散射规律。若按此值考虑, 则当能见度为 200 米时来自 500 米以外的大气回波仍能符合光雷达方程 (因为此时 $2\tau_0^{0.5} = 19.6$)。但我们用激光雷达探

测实际大气的结果表明,当能见度为 1 公里时对来自 500 米外的回波就完全不能忽略多次散射(此时 $2\tau_0^3 \approx 4$)。能见度越差则多次散射起作用的起始距离就愈近;亦即来自相应距离越远的回波(实际是 t 大)多次散射贡献就越大。这是因为对于窄脉冲束状波的后向散射而言,随着脉冲的向前传输有更多的大气空间和更多的时间参与多次散射过程,因而多次散射贡献就越大。这就完全可以理解在水平均匀大气中的激光回波值的运算 $\ln r^2 V(r)$ 与 r 的对应关系中出现弯曲,而且与(3)式所定直线偏离愈来愈大的现象。

低能见度下激光回波中多次散射的严重影响问题在国外的能见度激光探测试验中亦已遇到,并试图去解决^[11,12,13]。事实上,完全的激光雷达方程就是辐射传输方程,只是在右端的辐射源作用项中列出散射作用。若以 $I(\mathbf{R}, \omega, t)$ 代表 $\mathbf{R}$ 空间点、 ω 方向、 t 时刻的光强,则方程可表为

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} + \omega \cdot \nabla I + \sigma I = \oint I \beta(\omega, \omega') d\omega'$$

式中 σ 和 β 分别为消光系数和方向散射系数。取 $I(0, \pi, t)$ 即为回波强度。目前还得不到该方程的解析解。该方程的单次散射近似就是通常的光雷达方程。对于束状脉冲激光,很容易理解在脉冲发射端即 $r \rightarrow 0$ 处总可以满足单次散射原理的(因 $\tau_0^3 \rightarrow 0$, 当 $r \rightarrow 0$ 时)。因此只要有 $r \rightarrow 0$ 近处的回波数据,总可以根据 $\ln [r^2 V(r)]$ 在 $r \rightarrow 0$ 处对 r 的导数来定出真实的 σ_0 值。图 3 中的虚线即为一种示意情况。理论和实验^[14]都证明波束发射角越小则多次散射影响愈小,则可有更长的距离满足(3)式。总之在大气水平均匀的假定下,可以利用近区回波推算的 σ_0 来求得该时刻的水平能见度。当然这样对仪器近区的测量精度要求高一些。

2. 斜视能见度的激光探测

由于我们的观测缺乏用以确定斜视能见度的较近距离高目标和其他直接手段,我们没有能够象对水平能见度那样作直接的实验对比。但根据已有的工作,我们可以对这一问题作一些分析。

(一) 晴天高能能见度情况 这在上一节讨论中已经从经验上说明。从激光探测所得的消光系数垂直分布可以解释远距离高山能见情况。这就说明抓住消光系数垂直分布这个关键因子,问题的解决就有了充分的基础。当然实际问题的确切解决还牵涉到太阳高度角与目标物相对关系这一极复杂的因子,需要进一步专门研究实验。

(二) 坏天气低能见度情况 这是目前航空等实际工作最关心的问题。在[6]中我们已经指出,这时由于无太阳直射光作用,斜视能见度可唯一地由路经大气消光系数分布所决定,因为无太阳直射光作用。这里我们假定目标物及背景特性预先已知。因此只要激光雷达测得路经 σ 分布,就可准确地确定实际斜视能见度。

根据 1 (三) 讨论可知,当能见度近 1 公里时,我们仍可在垂直方向测得 500 米高度上下的消光系数分布,只要 $\tau_0^3 < 2$ 即可。根据这一分布我们可自然地确定某一高度范围内的实际斜视能见度。目前民航机的临界着陆条件约在离地 100—200 米斜视能见度 1—2 公里范围内,因此可以预料用激光探测斜视能见度可能起到重要的作用。

国内外经验和我们的探测都表明,坏天气下近地大气的分层变化是很复杂的,难以用简单的模式概括,也难以用水平能见度来加以推算斜视能见度。这时实时探测就具有关键的作用。这里举两个例子加以说明。图 4 为 1975 年 11 月 3、4 日连续二天地面雾情

况下激光探测的消光系数垂直分布。从地面能见度看4日(约1.1公里)比3日(约1.7公里)差。但从垂直分布看到情况就变化很大。4日 σ 值随高度迅速减小,仅在500米高度有一峰值为0.2公里⁻¹的 σ 增长层。而3日直到600米高度 σ 值均大于0.4公里⁻¹,特别是在200—250米范围 $\sigma > 1$ 公里⁻¹,峰值达2.5公里⁻¹。因此,比较这两天的能见度情况可以概括为:地面水平能见度4日比3日差;100米高度对地斜视能见度两天十分接近($\sigma_{0-100} \cong 1.9$ 公里⁻¹,等效水平能见度 ~ 2 公里);150米以上高度对地斜视能见度则4日大大优于3日。在观测时也发现4日天空亮度较3日为强,但不用激光雷达则无法了解浑浊层厚度与分布。值得注意的是,3日在250米高度上的对地斜视能见度会较150—200米高度对地能见度差。在这种复杂情况下,用激光探测确定各高度的实际对地斜视能见度从而抓住飞机着陆的有利条件可能会有相当的意义。

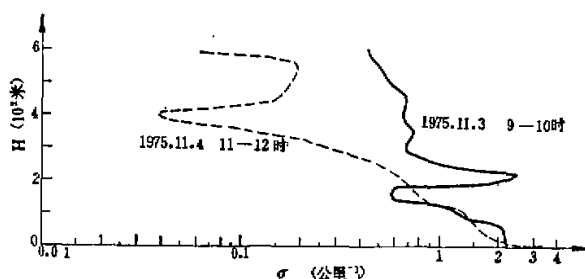


图4 二个雾日的 σ 垂直分布

在更低的水平能见度情况,则根据1(三)讨论可知这时难以得到确切的 σ 路径分布,难以了解雾层厚度。这时近区能见度可用 σ_0 推算的水平能见度值代替。从根本上说要解决这一问题需要采用更长的探测波长,例如红外波段甚至微波波段,如毫米波雷达等,目前在国内外都有所重视。

三、几点看法

1. 几年来的观测对比证明,激光雷达所测地面大气消光系数可以用来定量地推算水平气象能见度。
2. 利用激光雷达观测推算的大气消光系数垂直分布可能可以很好地确定斜视能见度,至少可以作为一个关键性的数据。
3. 在极低能见度下,由于多次散射作用,难以用激光雷达求得较远处的消光系数分布,比如确定雾层厚度等。根本办法是改变探测波长,如使用毫米波雷达等。
4. 对于实用的能见度探测系统来说,可以根据不同的关心范围考虑不同的系统。例如,若重点考察飞机着陆能见度的系统,由于只关心贴地几百米的大气状况,完全可以采用轻便小型的探测系统如砷化镓激光等。

最后应该说明,实际目标物在不同天气和背景条件下的能见问题是一个极为复杂的问题。它牵涉到天空亮度、背景的光特性及人的感觉等理论、实验和经验性的要素。要使激光雷达构成一个实用的能见度探测系统,需要有关各方面的密切配合和努力。我们已

有的工作只是这一途径上迈出的极小的一步,为以后的工作提供参考。

参 考 资 料

- [1] R. T. Jr. Brown, 1968, 13th Radar Met. Conf. Proc.
- [2] M. Bertolotti, et al., *Appl. Opt.*, 1969 8 (1).
- [3] C. Lochkamp et al., 1972, AD 742964.
- [4] J. V. Winstanley et al., 1974, International Laser Radar Conference, 1974 ILRC.
- [5] H. Nojima et al., 1974, 同前文集.
- [6] 激光测定大气消光系数及其在能见度探测上的可能应用. 激光在气象探测中的应用 科学出版社, 1973, 32—42.
- [7] 激光气象探测仪, 同上书, 1—31页.
- [8] B. B. 沙朗诺夫, 观察与能见度, 侯宏森、王本项译, 国防工业出版社, 1956.
- [9] W. E. K. Middleton, *Vision Through the Atmosphere*, 1952.
- [10] V. E. Zuev, et al., *Appl. Opt.*, 1969, 8 (1).
- [11] E. Y. Moroz, W. Viezee, 1974 International Laser Radar Conference, 1974 ILRC.
- [12] H. Herrmann, et al., 1974, 同前文集.
- [13] K. E. Kunkel, et al., 1974, 同前文集.
- [14] Ch. Werner, 1974. 同前文集