

基于数字摄像技术测量气象能见度* ——双亮度差方法和试验研究

吕伟涛¹⁾ 陶善昌¹⁾ 刘亦风¹⁾ 谭涌波¹⁾ 王本草²⁾

1) (中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026)

2) (中国民航合肥空管中心, 合肥 230051)

摘要 数字摄像技术在地基、空基定量化大气遥感上的应用是一个方兴未艾的研究领域。作者阐述了基于数字摄像技术, 利用地平线附近两个不同距离的目标物和其对应水平天空背景亮度差的比值计算白天气象能见度的方法(简称双亮度差方法)及其标准观测条件, 该方法能够消除 CCD(电荷耦合器件)数字摄像系统暗电流和背景杂散光的影响, 可以增大数字摄像能见度观测系统(DPVS)的测量范围, 提高测量精度。2002年在合肥骆岗机场进行了 DPVS 同 Väisälä 前向散射仪、透射仪以及目测的对比试验, 大量实测数据表明: DPVS 和 Väisälä 仪器以及目测的一致性相当好, 采用双亮度差方法, 即使能见度达到基线长度的 200 倍, DPVS 也能给出可信的测量结果。

关键词: 数字摄像; 气象能见度; 双亮度差; 对比试验

文章编号 1006-9895 (2004) 04-0559-12 **中图分类号** P412 **文献标识码** A

1 引言

气象能见度是一个在交通、军事、环境和气候变化研究等一系列领域内倍受重视的气象要素, 随着世界科技和经济的高速发展, 迫切需要实时、精确地测量能见度。目前, 业务应用观测气象能见度的仪器主要可以分为两类^[1,2]: (1) 测量一段空气柱的消光系数或透过率(如望远光度计、透射仪等); (2) 测量一个小体积空气对光的散射, 依据所测量的散射角的不同可分为后向散射仪、前向散射仪和总散射仪(积分浊度计)。其中, 散射仪均须假设大气吸收效应可以忽略, 并假定测量得到的散射光强正比于消光系数, 这在一般情况下是可以的, 但在污染严重、气溶胶富含黑碳或其他吸收成分时, 上述假定不成立, 散射仪都必须进行相应的修正; 许多研究人员曾试图找出气象能见度和后向散射系数之间的关系, 但结果都不令人满意^[2]; 积分浊度计难以避免采样时粒子的截断误差和对气体加热引起的误差^[3], 不经常被用来观测能见度, 而是常被用于测量污染物粒子; 望远光度计通过计算地平附近一个已知距离目标物和其附近水平天空背景的视亮度对比的方法直接获得大气消光系数^[4](以下简称亮度对比方法), 适用于白天观测, 但需要额外的机电装置以实现自动测量, 难以保证测量的同时性^[5], 一般不用于能见度的常规观测。当前, 世界上普遍使用的能见度仪是透射仪

和前向散射仪^[6],透射仪在雾滴引起的中低能见度条件下测量结果较为准确,常被用于民航系统,但在有降水(如雨、雪等)或漂尘(如扬沙等)现象发生时,透射仪自身光源引起的前向散射光的影响不容忽视^[7,8];前向散射仪因其体积小、安装简单、容易维护、测量范围广等特点,在航空、码头、高速公路等部门得到了广泛地应用,但在不同类型气溶胶条件下前向散射仪需要不同的修正,且非常小的采样体积的代表性也是需要考虑的问题^[2]。另外在科研领域中,激光雷达可被用于测量水平和倾斜能见度(其他仪器无法观测倾斜能见度),但其反演结果的准确性依赖于消光系数与后向散射系数之间函数关系的假定、或者依赖于气溶胶特性随视程均匀分布的假定,雨、雾和沙尘暴等低能见度条件下的多次散射效应也严重限制其探测的可靠性^[9],加上其成本昂贵、维护费用高、操作较复杂等因素,使其在气象能见度的测量中并没有被广泛应用。总之,上述测量气象能见度的仪器虽然各有自己的优点,但也都存在着各自固有的原理或方法上的局限性或重要缺陷^[10],迄今还没有一种仪器的测量结果可以作为气象能见度观测比对的标准,所以研究气象能见度新的测量原理、方法和技术,提高测量的定量化和自动化水平,仍是当前环境监测和大气遥感领域的一种迫切需求,同时也提出了如何科学、合理地校核和评价气象能见度观测仪器的精确度的问题。

数字摄像技术在空基、地基定量化大气遥感上的应用至今仍是一个方兴未艾的研究领域,其中关键的问题在于如何实现定量化。在测量气象能见度方面数字摄像技术已有应用先例,Doerfel采用了类似于目测的方法^[11],依次判断不同距离的目标物是否可见来估计能见度,其应用范围受可用目标物的距离限制,也没有实现定量化观测;我们曾利用 CCD(电荷耦合器件)数字摄像机采用亮度对比方法来计算白天气象能见度^[12,13],开发了数字摄像能见度观测系统(DPVS),并和激光雷达进行了初步的对比试验,结果表明:若选取足够黑的目标物,采用亮度对比方法的 DPVS 可以在能见度低于基线长度 5 倍时给出可信的测量结果。

这一基于数字摄像技术测量白天气象能见度的方法在原理上与望远光度计相同,直接测量消光系数、没有原则或原理上的缺陷;并且 CCD 器件具有面阵成像的优点,可保证多目标和背景亮度测量的同时性,易于实现自动化观测;DPVS 可以自动保存图片,能够提供直观的描述观测场地状况的信息,可用来分析引起能见度变化的不同因素,这是其他方法所难以实现的。但是,这种基于目标—地平天空亮度对比测量的方法有一个不容忽视的问题,即测量要求在理想或标准观测条件下进行^[14,15]。另外,前面的研究工作还不完善,对比试验数据中没有足够多的低于 3 km 的能见度数据,也没有同当前广泛使用的前向散射仪和透射仪进行比较;在实际应用中,常常无法找到合适的远距离、足够黑的自然目标物用来观测,而尺寸需求随着距离增加而增大使得人工设置远距离目标物不可行,这限制了 DPVS 的测量范围。在试验和理论分析中,我们发现能见度越高,因目标物不是理想黑体引起 DPVS 测量的相对误差越大,且即使采用实用黑体,亮度对比方法在能见度较高时仍然会有较大的误差^[16],这是因为亮度对比方法无法很好地消除 CCD 摄像系统暗电流和背景杂散光的影响。因此,能否通过探测原理和方法的理论分析与试验检验,发展新方法和技术,进一步增大 DPVS 的探测范围、提高其精度是具有重要科学意义的研究课题。

Rühle 提出了测量地平线附近两个不同距离的目标物和其对应水平天空背景亮度的

差值之比计算白天气象能见度的方法^[5], 本文称之为双亮度差方法。该方法应用于望远光度计^[14,17]可以消除杂散光的影响, 并且在一定程度上能够减小目标物自身亮度引起的误差, 在原理和方法上前进了重要的一步, 同积分浊度计和目测的对比试验表明可以得到较好的结果, 但望远光度计自身的缺陷限制了它的应用范围。数字摄像技术的发展为气象能见度和大气光学特性的定量遥感提供了更新、更好的技术平台, 本文将详细阐述 DPVS 测量中双亮度差方法的应用及其标准观测条件, 并给出 DPVS 同 Vaisala 前向散射仪、透射仪以及目测的对比试验结果。

2 理论

2.1 亮度对比方法及其局限性

以 CCD 数字摄像机的位置为原点, 观测到的地平附近距离为 R 的目标物及其背景天空的视亮度^[9]分别为

$$\begin{cases} B_t = B_{t-0} \exp\left[-\int_0^R \sigma(r) dr\right] + D_t(R), \\ B_g = B_{g-0} \exp\left[-\int_0^R \sigma(r) dr\right] + D_g(R), \end{cases} \quad (1)$$

其中, B_{t-0} 是目标物自身的亮度, B_{g-0} 是从目标物所在位置观测到的背景天空的亮度, $\sigma(r)$ 为大气消光系数, $D_t(R)$ 和 $D_g(R)$ 为 $0 \sim R$ 距离之间分别沿着观测点—目标物和观测点—背景视线方向上气柱的亮度, 当选择的目标和背景视线方向非常接近时, $D_t(R) = D_g(R) = D(R)$, 可用下式表示:

$$D(R) = \int_0^R \sigma(r) J_v(r) \exp\left[-\int_0^R \sigma(r) dr\right] dr, \quad (2)$$

式中, $J_v(r)$ 为大气源函数, 它包含了气柱元对太阳直接辐射的一次散射以及对天空散射光、地面反射光的多次散射作用。若假设大气气溶胶水平分布均匀, $\sigma(r)$ 为常数; 照明条件沿视线方向水平均一, $J_v(r)$ 为常数, 可以证明:

$$B_g = B_{g-0} = J_v, \quad (3)$$

并考虑气象能见度和大气消光系数存在下述关系:

$$V = \frac{3.912}{\sigma}. \quad (4)$$

由上述各式可以得到采用亮度对比方法计算白天气象能见度的公式:

$$V_d = \frac{3.912R}{\ln(1 - B_{t-0}/B_{g-0}) - \ln(1 - B_t/B_g)}. \quad (5)$$

一般称 $C_0 = B_{t-0}/B_{g-0} - 1$ 为目标物和背景的自身固有亮度对比, 而 $C = B_t/B_g - 1$ 为相应的视亮度对比^[2]。通常选择亮度较低的物体进行观测, 如人工黑色目标或者树林、山体等自然目标, 有 $B_{t-0} < B_t < B_g$, 本文的讨论均认为此条件成立。

但是, 在 DPVS 中, B_t 和 B_g 是不能直接获得的, 能够测量得到的是从 CCD 数字摄像系统拍摄的数字图像中获取的灰度, 对于 8 位的分辨率, 最小值为 0, 最大值为 255, DPVS 在背景灰度不低于 200 时采用白天的观测模式。设背景的杂散光为 B_{sl} , CCD 数字摄像系统暗电流对应的灰度为 G_{dc} , 如果它们在整个 CCD 感光面阵上分布均

匀, 且 CCD 光电响应线性, 并采用多次采样平均消除随机噪声的影响^[18], 获得的目标物和背景的灰度可以表示为

$$\begin{cases} G_t = K(B_t + B_{s1}) + G_{dc}, \\ G_g = K(B_g + B_{s1}) + G_{dc}, \end{cases} \quad (6)$$

其中, K 为 CCD 数字摄像系统的亮度灰度转换系数。

另外, B_{t-0} 是一个随着目标物特性、太阳高度角、云的分布等变化的量^[14,19], 因此, C_0 是随时间变化的, 在 DPVS 中以及其他采用亮度对比方法测量能见度的系统中, C_0 难以实时测量, 只能由高能见度时的历史数据统计出一个估计值, 或者在目标物足够黑时简单地假设 C_0 为 -1 。若采用实用黑体技术^[16], 保证目标物足够黑, 可以认为 $C_0 = -1$, 则可以得到 DPVS 中采用实用黑体时亮度对比方法的计算公式:

$$V_d = \frac{-3.912R}{\ln[1 - (G_t - G_{dc} - KB_{s1}) / (G_g - G_{dc} - KB_{s1})]}. \quad (7)$$

尽管 G_{dc} 可以通过标定粗略地估计为一个常数^[20], 但它随着温度变化而变化; B_{s1} 可以通过加遮光罩削弱, 但不可能完全消除, 简单地假设它与背景亮度成正比也不能从根本上解决问题。所以, DPVS 中采用实用黑体的亮度对比方法的主要缺陷是其无法消除 CCD 摄像系统暗电流和背景杂散光的影响, 在低能见度条件下, 它们的影响相对较弱, 随着能见度的升高, 它们引起的误差将越来越明显, 这限制了 DPVS 的测量范围和精度。

2.2 双亮度差方法及其标准观测条件

设置两个人工目标, 分别距观测点 R_1 和 R_2 ($R_2 > R_1$), 如图 1 所示。在 CCD 面阵光电响应特性均匀的条件下, 不难得到目标和其背景的亮度差为

$$G_{ti} - G_{gi} = K(B_{ti} - B_{gi}) = K(B_{ti-0} - B_{gi-0}) \exp(-\sigma R_i), \quad i = 1, 2. \quad (8)$$

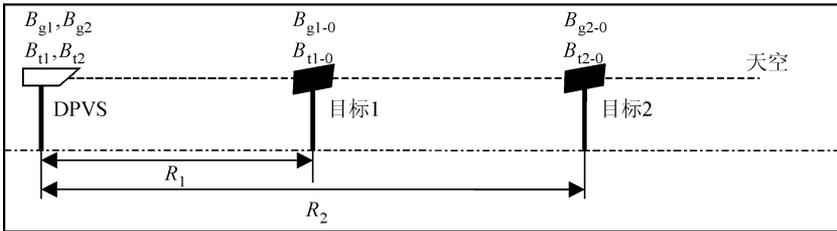


图 1 DPVS 双目标观测示意图

由上述各式可以推出 DPVS 中采用两个亮度差之比计算白天气象能见度的公式:

$$V_d = \frac{3.912(R_2 - R_1)}{\ln[(G_{t1} - G_{g1}) / (G_{t2} - G_{g2})] - \ln[(B_{t1-0} - B_{g1-0}) / (B_{t2-0} - B_{g2-0})]}. \quad (9)$$

若采用实用黑体目标, 而且两个目标—背景视线方向非常接近, 观测场地照明条件足够均匀, 使得 $B_{t1-0} = B_{t2-0} = 0$, $B_{g1-0} = B_{g2-0}$, 有

$$V_d = \frac{3.912(R_2 - R_1)}{\ln[(G_{t1} - G_{g1}) / (G_{t2} - G_{g2})]}. \quad (10)$$

这就是 DPVS 双亮度差方法的计算公式, 基线长度为 $R_2 - R_1$ 。

从式 (9) 可以看出, 若目标物为非黑体, 只要保证两个目标物的自身特性相同, 视线方向尽量接近使得背景亮度可以认为相等, 并假设目标物的环境照明条件相同,

同样可以得到式 (10)，但实际上照明条件很难严格保证一致，若目标本身反射率较高，照明条件的差异容易造成较大的误差，所以最好还是采用实用黑体。

显然，式 (10) 右边的所有参数都可以直接测量得到，双亮度差方法可以很好地消除 CCD 数字摄像系统暗电流和背景杂散光的影响，克服了亮度对比方法固有的这一致命缺陷。但由上面的分析，不难看出 DPVS 双亮度差方法计算公式的导出过程中仍包含了以下条件或假定：

(1) 目标—背景视线方向的一致性，即每组目标—背景视线方向应尽量保持一致，且两组目标—背景的视线方向也要尽可能保持彼此接近；

(2) 视线方向上气柱光学特性和照明条件均一；

(3) 双目标的反射率均可以忽略，即采用实用黑体做目标物。

我们把这些条件称为双亮度差方法的标准（或理想）观测条件。

3 试验

为了检验双亮度差方法在 DPVS 中应用的效果，我们将 1 台 DPVS 架设在合肥骆岗机场，观测场地绝大部分覆盖植被，均匀性良好。机场的能见度观测仪器包括 1 台 Väisälä FD12 前向散射仪和一套 Väisälä MITRAS 机场跑道视程测量系统（含 3 台短基线透射仪），虽然这两种仪器本身都不能作为标准仪器，但它们是世界气象组织（WMO）和国际民航组织（ICAO）认可的，达到了气象能见度业务观测规范要求的仪器，同它们进行对比应该是有价值的。我们进行了两个阶段白天气象能见度的观测对比试验，2002 年 4 月 2 日~5 月 27 日和 11 月 23 日~12 月 23 日，后一阶段机场雾天比较多，取得了较多的中低能见度的对比数据。各仪器位置的示意图见图 2，TR1、TR2 和 TR3 分别代表三台透射仪，FD 代表前向散射仪。

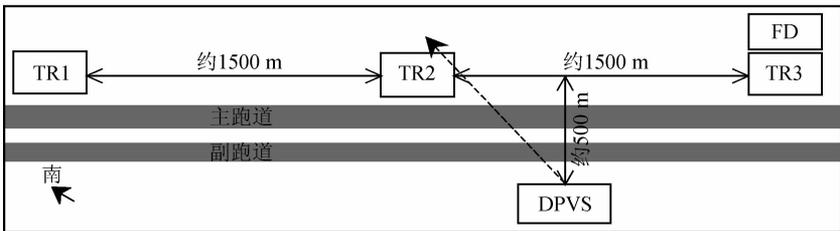


图 2 仪器位置示意图

透射仪的基线长度均为 75 m，它们的观测方向与跑道平行。透射仪通过测量光束从发射端到接收端的透过率来计算消光系数，而 FD12 前向散射仪则忽略吸收效应，测量 33° 倾角的散射光并假定该角度的散射光强正比于消光系数来推算能见度。它们的信号线从探测器连接到骆岗机场的气象台，DPVS 的探头和所有的 Väisälä 数据记录设备都安装在气象台，DPVS 的观测方向正南（图 2 中带箭头的虚线）。三个人工黑体分别设置在离探头 14.54 m、64.60 m 和 115.61 m 处，则双亮度差方法的基线长度分别为 50.06 m、51.01 m 和 101.07 m。为了尽可能保证标准观测条件，所有目标物均处于同一水平上，所有天空背景也处于同一水平上，背景和目

差小于 0.5° ，不同目标或不同背景之间水平方向视线角度相差均小于 1.5° 。另外，为了尽量抑制杂散光对测量的影响，摄像机前加了遮光罩和窄带干涉滤光片（中心波长：532 nm，半波带宽：25 nm）。

在对比试验中，Väisälä 仪器的日常维护主要是每周清洁仪器的光学器件外表面，在能见度大于 10 km 的晴空无风天气条件下对仪器进行校准，DPVS 的时间定期和 Väisälä 仪器进行同步。Väisälä 每隔 15 s 测量一次并 10 min 输出一次平均值，DPVS 在 5 月 16 日之前每 5 min 测量一次，之后每 2 min 测量一次，同样也 10 min 输出一次平均值。在 DPVS 的测量中：64.60 m 远的目标物和天空背景的视亮度对比 $C(64.60) < -0.1$ 时，采用双亮度差方法计算；若 $C(64.60) \geq -0.1$ （对应采用亮度对比方法的计算结果低于 110 m），采用亮度对比方法计算；如果三个目标物都无法从背景中分辨出时，DPVS 将给出测量下限 14.54 m，即最近的目标物的距离。Väisälä 仪器均输出大气光学程视 (M_{OR})^[2]，最低输出 50 m，低于 500 m 以 50 m 为间隔，500 m~10 km 以 100 m 为间隔，高于 10 km 以 1 km 为间隔，本文采用的气象能见度与 M_{OR} 的关系为 $V_d = M_{OR} \ln(50) / \ln(20)$ 。

另外，机场气象台的工作人员每天整点目测能见度，本文也将简要给出各仪器输出值和目测结果的对比情况。

4 结果

在整个试验当中，DPVS 一直工作稳定，而 Väisälä 的仪器偶尔会输出错误信息，但 3 台透射仪和 1 台前向散射仪同时工作基本保证了机场能见度的实时监测。在下面的对比中，所有 5 台仪器正常工作时的输出记录都用于比较，即使有时它们的结果有很大差异，同一时间 5 台仪器的输出值构成一组，共取得了 5691 组数据，这里分别用 V_{FD} 、 V_{DPVS} 、 V_{TR1} 、 V_{TR2} 和 V_{TR3} 代表前向散射仪、DPVS 和 3 台透射仪输出的气象能见度数据。

因为没有一台仪器可以作为标准来检验所有其他仪器的性能，目测结果同样不能作为标准，具有代表性的、可以看作标准的能见度值（下面称之为标准能见度）应符合两个条件^[21]：完全客观，是真实能见度的很好的估计值。目测因其无法避免的主观性而不符合要求，在 WMO 组织的首次能见度仪的国际比较中，采用了 21 种设计的 26 个仪器输出值中合理结果的中值作为标准能见度，对各仪器进行了评估^[21]。由于我们进行的对比试验中只有三种类型的 5 台仪器参与了比较，为了合理地评估各仪器的性能，对于每一组数据，本文采用下述过程计算标准能见度：先计算 3 台透射仪输出值的平均值 V_{TRA} ，再计算 V_{TRA} 、 V_{FD} 和 V_{DPVS} 的平均值 V_{ST} ，认为 V_{ST} 最好地代表了该组数据对应时间的真实的气象能见度。即

$$\begin{cases} V_{TRA} = \frac{V_{TR1} + V_{TR2} + V_{TR3}}{3}, \\ V_{ST} = \frac{V_{TRA} + V_{FD} + V_{DPVS}}{3}. \end{cases} \quad (11)$$

这样使得不同方法器测值在标准能见度中所占的比重相同。

我们分别计算了不同仪器之间以及每个仪器的输出值与标准能见度之间的相关系数 r_{cc} 和均方根相对偏差 σ_{rd} 的指标，其中：

$$\sigma_{rd} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(X_i - Z_i)/Z_i]^2}{N}} \times 100\%, \quad (12)$$

式中， i 为数据组的序号， N 为数据组的总数。若比较的是两个不同仪器 X 和 Y 的测量结果，则 Z_i 为 X_i 和 Y_i 的平均值；若比较的是某个仪器 X 和标准能见度，则 Z_i 采用第 i 组数据对应的 V_{ST} 。

表 1 给出了不同仪器之间以及各仪器输出值与标准能见度之间相互比较的结果，图 3~5 分别显示了 V_{DPVS} 、 V_{FD} 和 V_{TRA} 与 V_{ST} 在 25 km 以下的对比情况，图中的直线是对所有数据组进行最小二乘法拟合所得。可以看出：各个仪器输出值之间的相关系数均在 0.8 以上，均方根相对偏差均低于 15%；同标准能见度比较， V_{FD} 的相关性最好， V_{TRA} 的相对偏差最小，但 V_{FD} 、 V_{TRA} 和 V_{DPVS} 三者的表现相差无几，均可以在一定的相对误差范围内（如 15%）较好的代表标准能见度；看单台仪器输出值同 V_{ST} 的比较， V_{DPVS} 的相对偏差最小，而 V_{FD} 的相关系数最高，拟合直线的斜率最接近 1，FD 和 DPVS 均优于任意一台透射仪，TR1 在三台透射仪中表现最好，TR2 最差。上述结果仅仅给出了各仪器的整体表现，为了更仔细地探讨采用双亮度差方法的 DPVS 观测白天气象能见度的性能，本文给出 V_{DPVS} 和 V_{ST} 分布的对比情况，如表 2 所示。

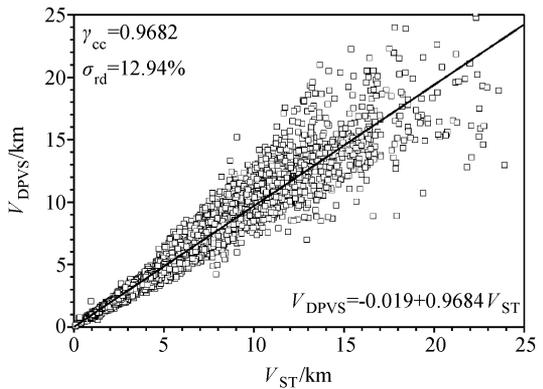


图 3 V_{DPVS} 和 V_{ST} 的对比

表 1 相互比较的相关系数（右上方）和均方根相对偏差（左下方）

	V_{TR1}	V_{TR2}	V_{TR3}	V_{FD}	V_{DPVS}	V_{ST}
V_{TR1}		0.882 2	0.921 6	0.924 8	0.887 8	0.956 2
V_{TR2}	11.33%		0.871 3	0.828 4	0.821 7	0.896 4
V_{TR3}	11.40%	11.77%		0.922 6	0.901 2	0.955 8
V_{FD}	11.17%	14.15%	12.81%		0.924 5	0.976 6
V_{DPVS}	11.49%	14.05%	11.95%	11.19%		0.968 2
V_{ST}	15.76%	22.05%	16.58%	13.36%	12.94%	

V_{ST} 的最小值为 60 m，最大值达 35 km， V_{DPVS} 最小值为 52 m，最大值为 34 km，它们绝大多数分布在 500 m~20 km 之间，在各个能见度范围内它们的分布都比较一致。图 6 给出了不同标准能见度范围时 DPVS 测量值同标准能见度的对比图，图中左边标识了不同 V_{ST} 间隔，右边相应位置给出了 V_{ST} 符合该间隔的 V_{DPVS}/V_{ST} 数据的个数和平均值。从图 6 的统计结果可以看出：总体上看， V_{DPVS} 偏低约 3.4%，近 50% 的情况 V_{DPVS}/V_{ST} 处于 0.9~1.0 之间，近 90% 处于 0.8~1.2 之间，只有少数（低于 3%）情况 DPVS 测量值的相对偏差超过 30%；在能见度低于 500 m 时， V_{DPVS} 偏高 17.68%，其

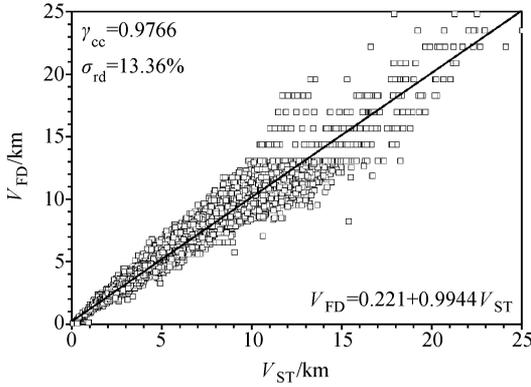


图 4 V_{FD} 和 V_{ST} 的对比

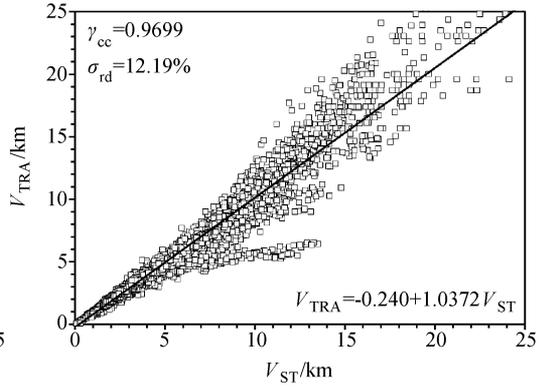


图 5 V_{TRA} 和 V_{ST} 的对比

表 2 V_{DPVS} 和 V_{ST} 分布的对比

V_{ST}/km	V_{DPVS}/km									合计
	<0.1	0.1~0.2	0.2~0.5	0.5~1	1~2	2~5	5~10	10~20	≥ 20	
<0.1	30	20								50
0.1~0.2		8	1							9
0.2~0.5			41	4						45
0.5~1			14	185	6	1				206
1~2				68	579	16				663
2~5					125	1766	40			1931
5~10						128	1638	101		1867
10~20							146	710	18	874
≥ 20								25	21	46
合计	30	28	56	257	710	1911	1824	836	39	5691

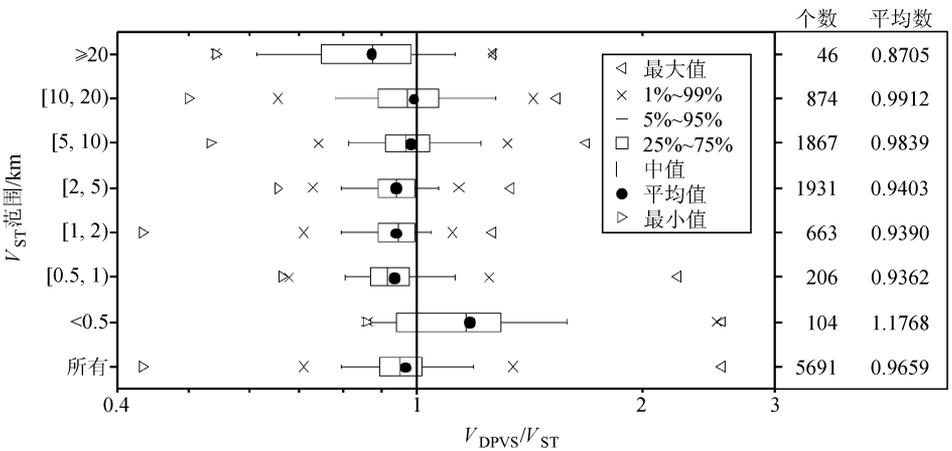


图 6 不同 V_{ST} 范围内 V_{DPVS} 和 V_{ST} 的对比图

余范围 V_{DPVS} 均偏低，在 5 km 以下偏低约 6%，5~20 km 范围内 V_{DPVS} 同 V_{ST} 较接近；20 km 以下，即使对于偏低最大的 500 m~1 km 范围， V_{DPVS} 同 V_{ST} 比值的平均值也在 0.93 以上，90%的情况 V_{DPVS} 的相对偏差小于 20%；20 km 以上的数据个数较少，还有待进一步的试验。500 m 以下 V_{DPVS} 偏高，与 DPVS 的整体表现不一样，这可能由下列

因素引起：实际情况不符合 DPVS 双亮度差方法观测的标准条件；Vaisälä 仪器的输出 M_{OR} 在低于 500 m 时以 50 m 为间隔，很容易造成 V_{DPVS} 偏高很多，尤其是能见度低于 200 m 时；能见度的区域性差异等。

下面给出三个实例，说明采用了双亮度差方法的 DPVS 对能见度变化的响应特性：2002 年 4 月 5 日白天骆岗机场的能见度出现多次起伏，有时变化非常迅速（图 7）；5 月 11 日能见度从开始不到 100 m 逐渐增加到 10 km 以上，变化幅度很大（图 8）；12 月 2 日白天一直有雾，能见度始终不足 1 km（图 9）。可以看出：不管能见度如何变化，升高或降低，快速或缓慢，DPVS 和 Vaisälä 仪器的输出均能一致地响应；雾天低能见度时，DPVS 和透射仪符合较好，它们的输出均低于前向散射仪的测量结果，这有可能是前向散射仪在雾中的修正还不是很合适造成的，这也可以部分解释前面的对比中 V_{DPVS} 在低能见度情况下偏低的原因。对于不同的能见度范围，改变各仪器输出值在标准能见度中所占的比重应该能够更客观地代表真实的能见度^[21]。

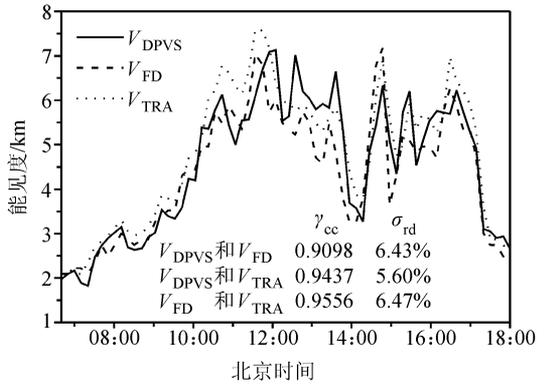


图 7 2002 年 4 月 5 日白天气象能见度的观测对比

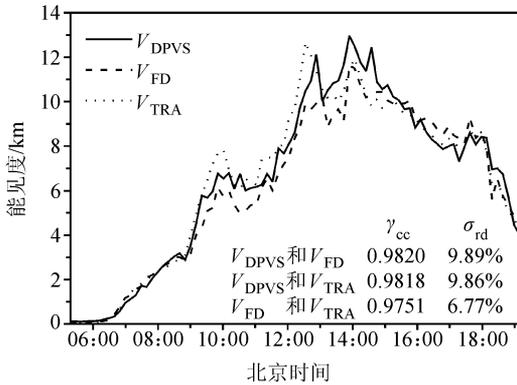


图 8 2002 年 5 月 11 日白天气象能见度的观测对比

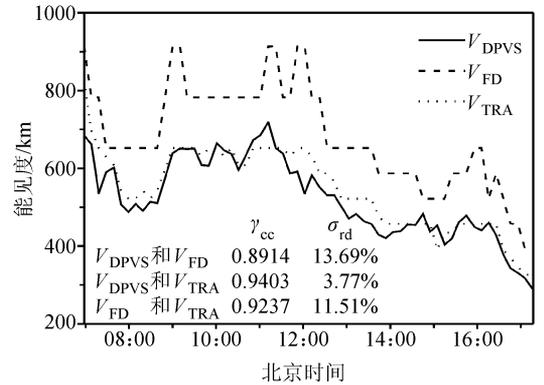


图 9 2002 年 12 月 2 日白天气象能见度的观测对比

试验期间，共取得了 927 组同目测（用 V_{VO} 表示）对比的数据， V_{VO} 最低为 50 m，最高 30km，对比结果如表 3 所示。表 3 表明这与前面各仪器测量值同 V_{ST} 的对比结果相当一致， V_{FD} 和 V_{VO} 相关系数最高， V_{DPVS} 和 V_{VO} 的均方根相对偏差最小，透射仪表现稍差，但各仪器测量结果与目测比较总体上都符合业务观测规范要求。这在一定程度上说明了目前在尚没有能见度标准测量仪器的条件下，采用 WMO 的多种能见度仪器比对试验方法

表 3 各仪器输出值和目测结果的对比

	r_{cc}	σ_{rd}	最小二乘拟合直线	
			斜率	截距/km
V_{TR1}	0.884 5	13.48%	1.231 6	-0.280
V_{TR2}	0.780 6	16.34%	1.056 0	0.639
V_{TR3}	0.896 3	12.34%	0.916 8	0.559
V_{FD}	0.955 0	12.16%	1.117 9	0.279
V_{DPVS}	0.907 8	11.60%	1.026 9	0.409

和标准能见度的概念,是检验和评价能见度仪器性能的一种可行的方法。

5 结论和讨论

本文的理论分析表明:基于数字摄像技术的双亮度差方法克服了寻常采用的亮度对比方法受系统暗电流和背景杂散光影响的固有缺陷,但仍需尽可能保证标准的观测条件。同 Vaisala 前向散射仪和透射仪以及目测近三个月的对比试验结果表明:在基于数字摄像技术的能见度观测系统中采用双亮度差方法是可行的,测量结果是可信的;DPVS 依据不同的能见度状况,自动采用亮度对比方法或双亮度差方法,在白天气象能见度处于最近目标物距离到基线长度 200 倍范围内时均可以给出可靠的结果,基本可以满足业务应用的需求;不管何种天气状况,也不管大气浑浊特性如何改变,即使气象能见度变化幅度非常大或速度非常快,DPVS 都可以正确地响应;在整个试验阶段,DPVS 一直工作稳定,保存了大量的图像,可以为后续的研究和核查提供直观的信息。在试验中,我们也发现 DPVS 相对于 Vaisala 仪器的测量值大都偏低,尤其是在低能见度条件下。许多人的研究表明消光系数同波长之间存在一定的关系,但不同的地区、不同的能见度条件,它们的关系都可能变化^[9],而气象能见度的定义针对的是 550 nm 波长的消光系数。本文中的数据处理没有对 DPVS 采用的滤光片波长引起的偏差进行修正,估计会造成 V_{DPVS} 偏低 1%~3%。从原理上来说双亮度差方法应该在低能见度条件给出更精确的结果,除了前向散射仪和透射仪雾中测量结果偏高的因素外,也可能是由于试验场地条件无法完全满足双亮度差方法的标准观测条件、CCD 光学特性不是很理想等原因造成的,这还需要进一步的研究。

值得指出的是:在上述对比试验中已经采取了一系列措施保证 DPVS 的测量尽可能在标准观测条件下进行,例如使目标和天空背景之间的视线偏差角尽可能小以及采用实用黑体作为目标物等,但限于篇幅,关于 DPVS 应用中可能出现的非标准观测条件和双亮度差方法测量的不确定性以及应当采取的误差控制措施将另文仔细讨论。

双亮度差方法只适用于白天气象能见度的观测,采取别的方法利用 DPVS 测量夜间气象能见度的试验正在进行,希望能够实现 DPVS 日夜不间断自动测量,满足常规观测需求。另外,深入分析雨、雪、雾和沙尘等恶劣天气条件对 DPVS 和 Vaisala 能见度仪器测量结果影响的差异也将在以后的工作中考虑。

致谢:在对比试验中,骆岗机场气象台的工作人员给予了热心的支持和帮助,他们提供了所有 Vaisala 仪器的测量结果和目测数据;北京市气象局为 DPVS 的研制和试验提供了部分经费支持。在此,作者谨向他们一并表示诚挚的谢意。

参 考 文 献

- 1 林晔主编,大气探测学教程,北京:气象出版社,1995,93~97.
- 2 WMO, Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, Sixth edition, Geneva: Secretariat of WMO, 1996, WMO-No. 8, I. 9-1~I. 9-11.
- 3 McMurry, P. H., A review of atmospheric aerosol measurements, *Atmos. Environ.*, 2000, **34**, 1959~1999.

- 4 Horvath, H., and G. Presle, Determination of the atmospheric extinction coefficient by measurement of distant contrasts, *Appl. Opt.*, 1978, **17**, 1303~1304.
- 5 Gazzi, M., V. Vicentini, and U. Bonafé, A field experiment on contrast reduction law, *Atmos. Environ.*, 1994, **28**, 901~907.
- 6 曾书儿、王改利, 能见度的观测及其仪器, *应用气象学报*, 1999, **10**, 207~212.
- 7 Gumprecht, R. O., and C. M. Sliepcevic, Scattering of light by large spherical particles, *J. Phys. Chem.*, 1953, **57**, 90~95.
- 8 Gazzi, M., V. Vicentini, C. Pesci et al., Diagnosis of the causes of systematic errors in atmospheric transparency measurements and some experimental verifications in Po Valley Fogs, *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, 1985, **2**, 201~211.
- 9 周秀骥、陶善昌、姚克亚, 高等大气物理学, 北京: 气象出版社, 1991, 1209~1215, 901~910, 804~806.
- 10 Lenshow, D. H. 主编, 大气边界层探测, 北京: 气象出版社, 1990, 104~122.
- 11 Doerfel, S., Apparatus and method for monitoring and reporting weather conditions, *United States Patent*, 2001, No. US6208938 B1.
- 12 谢兴生、陶善昌、周秀骥, 数字摄像法测量气象能见度, *科学通报*, 1999, **44**, 97~100.
- 13 Xie Xingsheng, Tao Shanchang, and Zhou Xiuji, Comparing experiments of digital photography visimeter, in: *Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds*, Ed. Wang Jinxue, Wu Beiyang, Toshihiro Ogawa et al., Proceedings of SPIE, Beijing, 1998, 150~155.
- 14 Allard, D., and I. Tombach, The effects of non-standard conditions on visibility measurement, *Atmos. Environ.*, 1981, **15**, 1847~1857.
- 15 毛节泰、李建国, 气象能见度与望远光度计, *大气科学*, 1984, **8**, 170~177.
- 16 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, *应用气象学报*, 2003, **14** (6), 691~699.
- 17 Dzubay, T. G., and K. W. Clubb, Comparison of telephotometer measurements of extinction coefficients with scattering and absorption coefficients, *Atmos. Environ.*, 1981, **15**, 2617~2624.
- 18 Gu, Y., J. M. Anderson, and J. G. C. Monk, An approach to the spectral and radiometric calibration of the VIFIS system, *Int. J. Remote Sens.*, 1999, **20**, 535~548.
- 19 Malm, W., M. Pitchford, and A. Pitchford, Site specific factors influencing the visual range calculated from tel-eradiometer measurements, *Atmos. Environ.*, 1982, **16**, 2323~2333.
- 20 吕伟涛、陶善昌, CCD摄像系统光学特性的一种标定方法, *光学技术*, 2001, **27**, 109~112.
- 21 WMO, The First WMO Intercomparison of Visibility Measurements: Final Report (Griggs, D. J., D. W. Jones, M. Ouldrige, and W. R. Sparks), Instrument and Observing Methods Report No. 41, Geneva, 1990, WMO/TD-No. 401.

Measuring Meteorological Visibility Based on Digital Photography—Dual Differential Luminance Method and Experimental Study

Lu Weitao¹⁾, Tao Shanchang¹⁾, Liu Yifeng¹⁾, Tan Yongbo¹⁾, and Wang Bengge²⁾

1) (*School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

2) (*China Civil Aviation Hefei Air Traffic Control Center, Hefei 230051*)

Abstract Researches on ground-based and space-based quantitative meteorological remote sensing using the digital photography have attracted extensive attention. By setting two targets at different distances from observation station near horizon, daytime meteorological visibility can be deduced from the ratio of the two measured luminance differences between target and its horizon sky background (Dual Differential Luminance, DDL). The DDL method and its standard observation conditions are reported in detail. The DDL can eliminate the effects of dark current of CCD camera and stray light of background, improve the precision and enlarge the measuring range of Digital Photography Visiometer System (DPVS). Some experiments have been performed to compare DPVS with Väisälä FD12 visibility meter, one Väisälä MITRAS Runway Visual Range Assessment System and visual observation at Luogang Airport, Hefei, in 2002. Plentiful results showed that DPVS works consistently with other instruments and visual observation in a reasonable precision, and is feasible and reliable even if the visibility is up to 200 times the baseline length.

Key words: digital photography; meteorological visibility; dual differential luminance; comparison experiment