

双亮度差方法测量白天气象能见度时的误差分析*

吕伟涛¹⁾²⁾ 陶善昌²⁾ 谭涌波²⁾

¹⁾(中国气象科学研究院,北京 100081)

²⁾(中国科学技术大学地球和空间科学学院,合肥 230026)

摘 要

对数字摄像能见度观测系统采用双亮度差方法测量白天气象能见度时非标准观测条件引起的误差进行理论分析,并给出了相应的误差控制措施。结果表明:对于正南、正北方地平线附近天空亮度的分布,除了天空布满均匀云层和晴天的中午较为均匀以外,其他时刻垂直相对梯度都较大,通常在 $4\%/^\circ \sim 10\%/^\circ$ 范围内,而水平相对梯度大多较小,低于 $2\%/^\circ$;不同组的目标-背景视线方向不一致是不容忽视的一个误差源,为了限制和最大程度地减小其不利影响,最好选择具有相同视线仰角的目标物和天空背景,且视线方位角的差异越小越好;可对目标物两侧的天空背景的亮度进行测量,内插获得与目标物视线方向一致的天空背景的亮度;视线方向上气柱照明不均匀会导致测量误差且人工无法调控,应尽量选择下垫面特性较为均匀的观测场地,通过多次采样平均在一定程度上能够减小其影响,也可实时监测视野范围内场地和天空的亮度分布,识别较差的照明状况以免获得误差较大的观测记录;利用树木、草丛、山体、墙壁和窗户等暗目标物难以满足双亮度差方法对观测条件的要求,最好采用反射率足够低的人工实用黑体目标物。

关键词: 大气消光系数 双亮度差 非标准观测条件 误差控制 数字摄像

引 言

气象能见度是交通、军事和环境监测等领域所关注的气象要素,提高其测量的精度和自动化水平有着重要的科学价值和迫切的社会需求,数字摄像技术的发展为这一参数的定量化、自动化遥感监测提供了一种新的途径。目前基于数字摄像技术测量白天气象能见度的方法有3种:(1)在数字图像上依次判断不同距离的目标物是否可见来估计能见度,类似于目测,其探测范围和精度受限于视野范围内可选用的目标物的距离和数量^[1];(2)测量地平线附近一个暗目标物和其邻近天空的亮度对比计算能见度(简称亮度对比方法)^[2-3],应用于数字摄像能见度观测系统(DPVS)中时其致命缺陷是计算结果受系统暗电流和背景杂散光的严重影响,只适合能见度小于基线长度约5倍时的观测,局限性很大^[4];(3)利用两组目标-背景亮度差的比值计算气象能见度(简称双亮度差方法)^[2,5-6],该方法能有效地消除系统暗电流和背景杂散光的影响。已有的研究和试验结果展示了数字摄像技术在白天气象能见度监测上的良好应用前景,不过研究仍然需要深入。

所有测量能见度的仪器都会受到非标准(或理想)观测条件的影响,只是由于测量原

* 国家自然科学基金项目(49975005)资助。

2005-04-14 收到,2005-08-11 收到修改稿。

理以及实现的技术手段不同,它们的非标准观测条件是不一样的,相应的误差控制措施也不尽相同,在对仪器进行设计和实现时必须对此加以考虑。例如:光学系统上的污染物对目前广泛应用的前向散射仪和透射仪都有影响,在测量过程中需要监测光学系统的散射光强以判断污染程度,在必要的时候进行清洁^[7-8];前向散射仪的光路范围内不能有反射率较高的地表或障碍物;不同地区不同类型气溶胶粒子散射特性的差异也是影响前向散射仪测量结果精确度的一个因素。无论是望远光度计还是 DPVS,利用亮度对比方法测量气象能见度时也存在非标准观测条件影响测量结果可靠性的问题,对此已有一系列研究^[9-13]。

已有的研究结果具有重要的启发作用,但并不是所有结论都能直接应用于 DPVS 双亮度差方法的测量中。本文将从测量原理出发,通过误差分析,确定影响测量结果的各种非标准观测条件,寻找可行的措施来尽量减小它们的影响,这对于提高仪器测量结果的精确度至关重要。

1 双亮度差方法的误差分析和非标准观测条件

由文献[6]可知,DPVS 采用双亮度差方法计算白天气象能见度的理论公式为:

$$V_d = \frac{3.912 \times (R_2 - R_1)}{\ln[(G_{g1} - G_{t1}) / (G_{g2} - G_{t2})] - \ln[(B_{g1-0} - B_{t1-0}) / (B_{g2-0} - B_{t2-0})]} \quad (1)$$

式(1)中, V_d 为白天气象能见度; R_i 是第*i*($i=1,2$)个目标物与观测点之间的距离($R_1 < R_2$); G_{ti} 和 G_{gi} 分别是 DPVS 测量所得的目标物和天空背景的灰度; B_{ti-0} 和 B_{gi-0} 分别是目标物的固有亮度和从目标物所在位置观测到的与目标物视线方向一致的天空背景的亮度;采用暗目标物, $B_{ti-0} < B_{gi-0}$, $G_{ti} < G_{gi}$ 。式(1)成立的前提条件是:电荷耦合器件(CCD)面阵光电响应均匀、线性,系统暗电流和背景杂散光的影响均匀;目标物和其天空背景的视线差异可以忽略;大气消光系数均匀分布。文中定义 $r_{dg} = (G_{g1} - G_{t1}) / (G_{g2} - G_{t2})$, $r_{dt} = (B_{g1-0} - B_{t1-0}) / (B_{g2-0} - B_{t2-0})$ 。

显然,DPVS 进行的是相对测量,光学系统上的污染物只会造成整体进光量的变化,对计算结果没有影响,并不是其非标准观测条件。我们研究了 CCD 数字摄像系统光学响应特性的标定方法^[14],一些标定试验表明:CCD 器件面阵各像元的光电响应均匀性和线性特性良好,经适当地挑选器件或标定后给出各像元的校正系数,并采取有效的曝光量控制措施以适应天空亮度在极大范围内变化的情况,能够从感应器件方面保证精度要求。在 DPVS 测量中,选取适当大小的目标物并选择邻近的天空背景,可以保证它们的视线差异很小,并且 CCD 面阵测量的优点使得可以同时测量多个方位的亮度,如果认为天空背景的亮度是连续变化的,可对目标物两侧天空背景的亮度进行测量,内插获得与目标物视线方向一致的天空背景的亮度,所以本文不考虑目标物与其背景的视线差异引起的误差。论述中均假设这些条件满足,并且不考虑目标物距离的测量误差。另外,视线方向上气柱光学特性不均匀会影响计算得到的大气消光系数的代表性,但如果气柱上的源函数 J_v ^[15]和消光系数处处成正比(例如仅仅是由于气溶胶浓度不同引起气柱光学特性不均匀),计算结果仍然能够反映视线方向上大气消光系数的平均状况^[13]。

在 DPVS 的运行中, B_{ti-0} 和 B_{gi-0} 都是非观测测量,实际采用的双亮度差算式忽略了

它们的影响：

$$V_d' = \frac{3.912 \times (R_2 - R_1)}{\ln r_{dg}} \tag{2}$$

这在 $r_{dl} = 1$ 时(例如目标物是理想黑体 $B_{ti-0} = 0$ 、天空背景亮度均匀时)是成立的。但事实上, B_{ti-0} 和 B_{gi-0} 均与太阳高度角、云的分布和地表状况等因素有关, B_{ti-0} 还与目标物自身的反射特性有关,通常都随时间而变化,这会导致 r_{dl} 可能大于或者小于 1,这是 DPVS 采用双亮度差方法计算白天气象能见度时的重要误差源。这里认为由式(1)计算得到的 V_d 为能见度真值,则采用式(2)计算得到的能见度测量值 V_d' 的相对误差为：

$$\frac{\Delta V_d}{V_d} = \frac{V_d' - V_d}{V_d} = - \frac{X \ln r_{dl}}{X \ln r_{dl} + 3.912} \tag{3}$$

式(3)中, $X = \frac{V_d}{R_2 - R_1}$ 。DPVS 在 $V_d \geq R_2$ 时才会利用式(2)计算,否则,将采用亮度对比方法。因此,只有在 $1 < r_{dl} \leq \exp[3.912 \times (R_2 - R_1) / R_2]$ 时,DPVS 才会利用双亮度差方法计算并给出有效结果 V_d' 。下面将讨论能见度的测量值 $V_d' \geq R_2$ 且真值 $V_d > 0$ 时, V_d 的相对误差与 X 以及 r_{dl} 的关系,可得到：

$$X' = \frac{V_d'}{R_2 - R_1} = \frac{1}{1/X + (\ln r_{dl})/3.912} \tag{4}$$

为讨论方便,设两个目标物的距离满足 $R_2 = 2 R_1$ (对其他情况可做类似的分析),则 DPVS 采用双亮度差方法要求 $X' \geq 2$,所以 X 和 r_{dl} 必须符合下面的条件:对于确定的 X ($X > 0$), r_{dl} 须满足 $\exp(-3.912/X) < r_{dl} \leq \exp(1.956 - 3.912/X)$;而对于确定的 r_{dl} ($0 < r_{dl} < r_{dg} \leq \exp 1.956$),分两种情况: $1 \leq r_{dl} < \exp 1.956$ 时, $X \geq 1/[0.5 - (\ln r_{dl})/3.912]$; $0 < r_{dl} < 1$ 时, $1/[0.5 - (\ln r_{dl})/3.912] \leq X < -3.912/\ln r_{dl}$ 。图 1 给出了相对误差 $\Delta V_d/V_d$ 随 r_{dl} 和 X 的变化曲线,可以看到:(1) 在能见度真值恒定时, $r_{dl} < 1$ 时, r_{dl} 越小, $|\Delta V_d/V_d|$ 越大, $r_{dl} > 1$ 时, r_{dl} 越大, $|\Delta V_d/V_d|$ 越大;(2) 在 r_{dl} 恒定($\neq 1$)时, X 越大, $|\Delta V_d/V_d|$ 越大;(3) $r_{dl} < 1$ 时, $\Delta V_d/V_d > 0$ 而 $r_{dl} > 1$ 时, $\Delta V_d/V_d < 0$, $\Delta V_d/V_d$ 随 r_{dl} 和 X 的变化,在 $r_{dl} < 1$ 时相对较快,且 r_{dl} 越小, $\Delta V_d/V_d$ 随 X 增加而增大的速度越快。

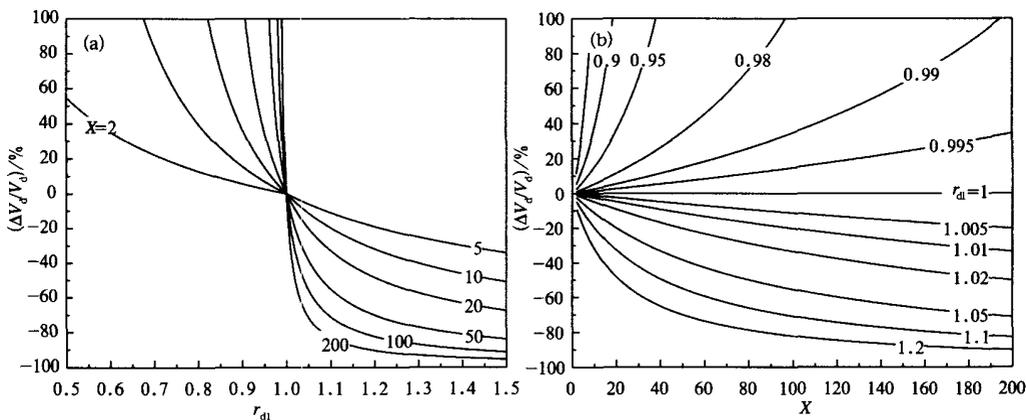


图 1 相对误差 $\Delta V_d/V_d$ 随 r_{dl} 和 X 的变化

若要求即使 X 达到 200 时, $|\Delta V_d / V_d|$ 也不超过 20%, r_{dl} 必须保持在 0.9967 ~ 1.0049 范围内, 这个条件相当苛刻, 那么实际当中有没有可能达到这个要求呢? 哪些条件会造成 r_{dl} 偏离 1? 很容易可以知道影响 r_{dl} 的非标准观测条件主要有 3 个: 两组目标-背景的视线差异、视线方向上气柱照明条件不均匀和目标物为非黑体。下面就分别对上述 3 种非标准观测条件进行分析。

为讨论方便, 首先给出如下定义: 视线方向 $S(\theta, \varphi)$, θ 为视线方向与水平面的夹角, 称之为视线仰角, φ 是从正北方顺时针旋转至视线方向所需的角度, 称之为视线方位角; $S(\theta, \varphi)$ 方向天空亮度的水平和垂直相对梯度(单位: %/°) 分别为:

$$\begin{cases} r_{gh}(\theta, \varphi) = \frac{B_{g-0}(\theta + \delta\theta/2, \varphi) - B_{g-0}(\theta - \delta\theta/2, \varphi)}{B_{g-0}(\theta, \varphi)\delta\theta} \\ r_{gv}(\theta, \varphi) = \frac{B_{g-0}(\theta, \varphi + \delta\varphi/2) - B_{g-0}(\theta, \varphi - \delta\varphi/2)}{B_{g-0}(\theta, \varphi)\delta\varphi} \end{cases} \quad (5)$$

2 两组目标-背景视线方向不一致的影响

为简化分析, 假设气柱照明条件在任一视线方向上均匀分布, 由大气辐射传输理论可以证明^[15]: 在视线方向 $S(\theta, \varphi)$ 上的任一位置观测该方向的天空亮度都相同, 均等于源函数 J_v , 所以, 式(1)中 B_{gi-0} 的观测位置可以从不同的目标物统一移至 DPVS 探头。进一步假设观测的目标物为黑体 ($B_{ti-0} = 0$), 有 $r_{dl} = B_{g1-0} / B_{g2-0} = B_{g-0}(S_1) / B_{g-0}(S_2)$, 如果视线方向的差异足够小, ($r_{dl} - 1$) 可以表示成天空亮度相对梯度与视线差异的乘积 $r_g((S_1 + S_2)/2)(S_2 - S_1)$ 。由前面的分析可知: 如果视线差异为 1°, $|r_g|$ 若超过 0.5 %/°, 则 X 达到 200 时, 能见度测量值的相对误差将超过 $\pm 20\%$ 。显然, 这是一个不容忽视的误差源, 有必要对地平线附近天空背景亮度相对梯度分布状况进行深入的分析。

我们采用美国 California 大学的 SBDART (Santa Barbara DISTORT Atmospheric Radiative Transfer) 程序^[16] 计算了平面平行大气, 不同时刻, 正南和正北方 (在 DPVS 观测中, 为了避免可能出现的太阳直射镜头或目标物内部的情况, 选择正南或正北方观测是合适的) 合肥地区地平线附近天空亮度的水平和垂直相对梯度分布, 输入的参数如下: 波长 550 nm; 中纬度冬季大气模式; 复合地面反射率 (10% 的水, 20% 的沙和 70% 的植被); 城市型气溶胶; 地面能见度范围 1 ~ 50 km, 对应的整层大气光学厚度的范围约为 4.11 ~ 0.12; 晴空和满天有云的情况等。结果表明: (1) $|r_{gh}|$ 和 $|r_{gv}|$ 随能见度增加而增大; (2) $|r_{gv}|$ 比 $|r_{gh}|$ 大很多, $|r_{gv}|$ 都明显大于 1 %/°, 通常在 4 %/° ~ 10 %/° 范围内, 而 $|r_{gh}|$ 大多比较小, 低于 2 %/°; (3) $|r_{gh}|$ 和 $|r_{gv}|$ 的大小与太阳所在位置有关, 一般中午达到最小, 正北方的比正南方的小; (4) 相对于晴空, 天空布满均匀云层时的 $|r_{gh}|$ 明显减小, 而 $|r_{gv}|$ 变化不大。

图 2 给出了利用 SBDART 计算得到的 $|r_{gh}|$ 和 $|r_{gv}|$ 分布的两个典型结果。这里需要指出的是: SBDART 是被设计用于计算平面平行大气辐射传输问题的, 其计算结果可能会与实际地球大气的情况有差异, 但在 SBDART 中已经进行了一级修正, 考虑了球形几何对直射光束衰减的影响, 可以较好地给出太阳入射到低层大气的光强分布, 因此上述计算结果可用来较好地估计天空亮度分布的不均匀性。显然, 要想保证 r_{dl} 与 1 的差异足够

小,最好选择视线仰角相同的目标和背景,并采用合适大小的目标物使得不同目标物视线方位角的差异尽量小。

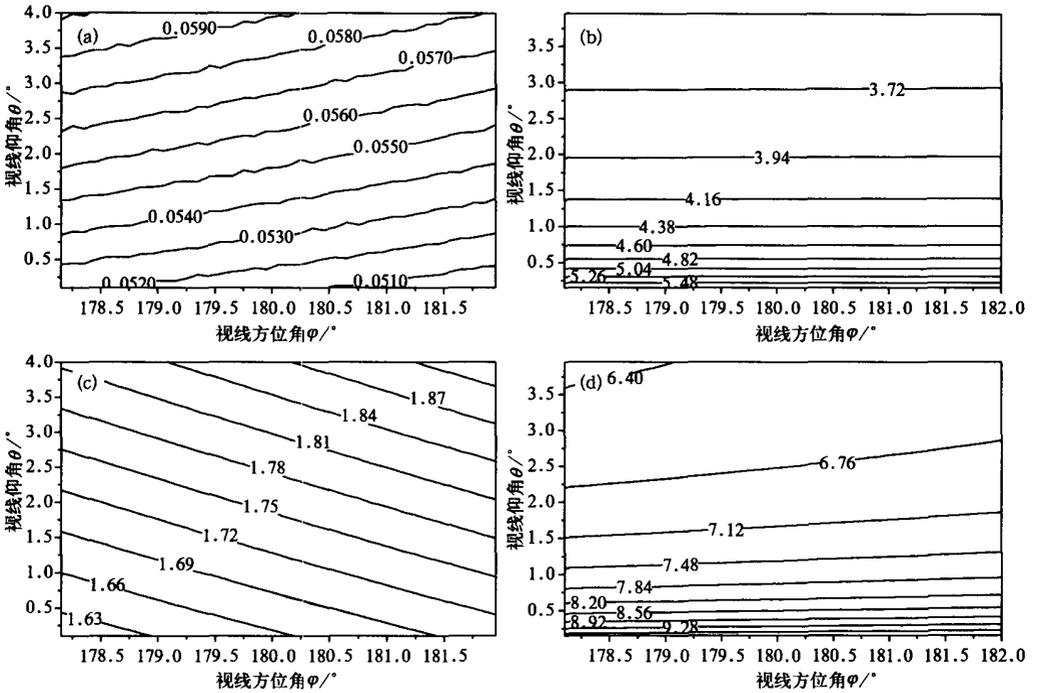


图 2 SBDART 计算得到的 12 月 5 日 16:00(北京时,下同)合肥地区正南方地平线附近(31.5°N,117.15°E)天空亮度相对梯度分布(单位:%/°)

(a) $r_{gh}(V_d=1\text{ km})$, (b) $r_{gv}(V_d=1\text{ km})$, (c) $r_{gh}(V_d=10\text{ km})$, (d) $r_{gv}(V_d=10\text{ km})$

3 视线方向上气柱照明条件不均匀的影响

当天空有不均匀云层遮挡太阳光,观测视线的一部分处在阴影之中,或者地表反射特性显著不均一(如视线穿过裸露土壤和植被或水面等不同类型的下垫面),或者视线附近有光源或较强的反射体等,都会产生非常复杂的气柱照明条件。本文考虑下面的简化模型:不考虑两组目标-背景视线的差异,采用黑体目标物,大气消光系数 σ_e 均匀分布,假定气柱照明条件分段均匀,气柱的一段($R = R_{cs} \sim R_{cs} + a, a > 0$)因云层的遮挡使得辐射传输源函数为 bJ_v , J_v 为视线方向上其余部分气柱的源函数, $0 < b < 1$,由辐射传输理论可以推出下面的公式:

$$r_{dl} = \frac{B_{g1-0}}{B_{g2-0}} = \begin{cases} 1 - (1 - b)(1 - e^{-\sigma_e a})e^{-\sigma_e(R_{cs} - R_1)}, (R_1 \leq R_{cs} \leq R_2, R_{cs} + a \leq R_2) & (6a) \\ \frac{1 - (1 - b)(1 - e^{-\sigma_e a})e^{-\sigma_e(R_{cs} - R_1)}}{b + (1 - b)e^{-\sigma_e(R_{cs} + a - R_2)}}, (R_1 \leq R_{cs} \leq R_2, R_{cs} + a > R_2) & (6b) \\ \frac{1 - (1 - b)(1 - e^{-\sigma_e a})e^{-\sigma_e(R_{cs} - R_1)}}{1 - (1 - b)(1 - e^{-\sigma_e a})e^{-\sigma_e(R_{cs} - R_2)}}, (R_{cs} \geq R_2) & (6c) \end{cases}$$

不难证明,视线方向上 R_1 前面的气柱不会影响测量结果,所以这里只讨论 $R_{cs} \geq R_1$ 的情况,若 a, b 的大小确定:对于式(6a), $r_{dl} < 1$, $R_{cs} = R_1$ 时, $|r_{dl} - 1|$ 最大;对于式(6b), $R_{cs} = R_1$ 时, $r_{dl} < 1$, $R_{cs} = R_2$ 时, $r_{dl} > 1$, r_{dl} 随 R_{cs} 的增加而单调递增,因此,当 $R_{cs} = R_1$ 或 $R_{cs} = R_2$ 时 $|r_{dl} - 1|$ 最大;而对于式(6c), $r_{dl} > 1$, $R_{cs} = R_2$ 时, $|r_{dl} - 1|$ 最大。

图3给出了在不同的 R_{cs}, a 和 b 时能见度测量值的相对误差 $\Delta V_d / V_d$ 随 X 变化的一些典型的计算结果,其中假设了 $R_2 = 2R_1$ 并要求 $V_d \geq R_{cs} + a$ 。结合前面的分析可以知道:(1) 视线方向上照明条件不均匀造成的能见度测量值的相对误差在较大范围内变化,不同位置的云块造成的误差不同,可正可负;(2) b 越小 $|\Delta V_d / V_d|$ 越大,如 $b < 0.5$ 时, $|\Delta V_d / V_d|$ 很容易超过 50%,而 $b = 0.9$ 时, $|\Delta V_d / V_d|$ 通常都小于 10%; $R_{cs} \geq R_2$ 时,或 $R_1 \leq R_{cs} \leq R_2$ 且 $(R_{cs} + a) \leq R_2$ 时, a 越大, $|\Delta V_d / V_d|$ 越大,而 $R_{cs} = R_1$ 且 $(R_{cs} + a) \geq R_2$ 时, a 越大, $|\Delta V_d / V_d|$ 越小; $R_1 \leq R_{cs} \leq R_2$ 且 $(R_{cs} + a) \leq R_2$ 时, $|\Delta V_d / V_d|$ 随 X 增加而增大,而 $R_{cs} \geq R_2$ 时,或 $R_{cs} = R_1$ 且 $(R_{cs} + a) \geq R_2$ 时, $|\Delta V_d / V_d|$ 随 X 增加而减小;(3) 因为 R_1 和 R_2 相对于云体尺度来说都较小,所以实际中出现几率比较高的应该是 $R_{cs} \geq R_2$ 的情况,这种情况的影响相对来说较小,且云体离目标物越远,其影响会越小。

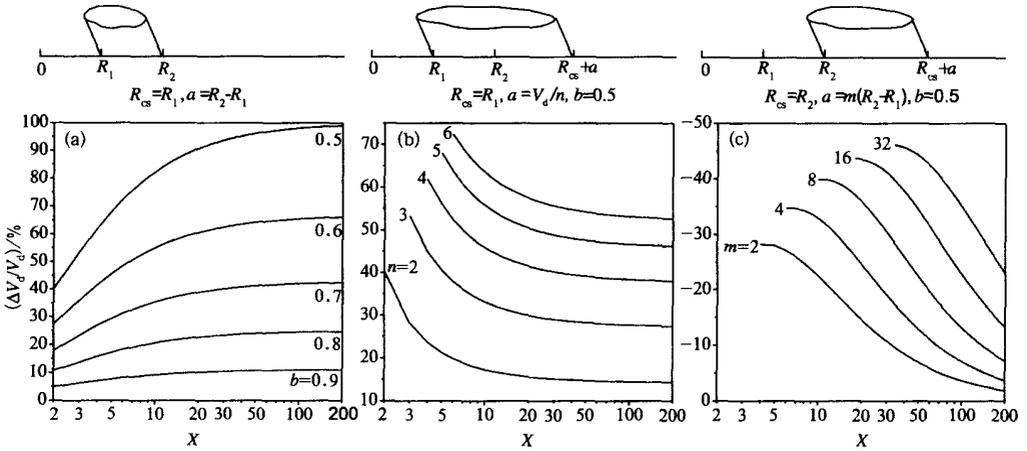


图3 气柱照明条件不均匀造成的能见度测量值的相对误差

对于因地面反射特性不均匀(如地表植被覆盖比例不同或地面高度起伏不平等)等因素引起气柱照明条件不均匀而造成的影响也可做类似的分析,这里不再赘述。需要提到的是,植被、土壤等多种下垫面在 $400 \sim 600 \text{ nm}$ 波段有较低的反射率,约为 $5\% \sim 20\%$ ^[17],通过选择下垫面较为均匀的观测场地,并采用该波段范围内的窄带滤光片,可减弱地面反射不均匀对测量结果的影响。

云体通常都在快速移动,场地的照明状况随时间快速变化,通过多次采样平均可在一定程度上减小由视线方向上气柱照明条件不均匀造成的测量结果的不确定性。另外,DPVS 面阵测量的优点使得可以实时监测视野范围内天空和场地的亮度分布及其变化,采取一定的方法有可能识别和标记出某些不理想的观测条件,从而避免获得误差较大的观测结果。

4 非黑体目标物导致测量结果的不确定性

由于目标物的固有亮度

$$B_{ti-0} = \overline{B_{ini-0} r_{ti}} \tag{7}$$

式(7)中, r_{ti} 是第 i 个目标物的半球-方向反射率, $\overline{B_{ini-0} r_{ti}}$ 是来自太阳直射、天空散射和地面反射的半球空间平均入射光亮度。显然,只要 $r_{ti} \neq 0$, 目标物固有亮度 B_{ti-0} 和目标物与天空背景的固有亮度对比 $C_{i-0} = (B_{ti-0} - B_{gi-0}) / B_{gi-0}$ 就不仅取决于目标物反射率 r_{ti} 的大小, 还随平均入射光亮度 $\overline{B_{ini-0}}$ 的变化而变化。

考虑一种简单情况: 天空背景亮度 B_{g-0} 均匀分布, 有

$$r_{di} = \frac{B_{g-0} - \overline{B_{inl-0} r_{t1}}}{B_{g-0} - \overline{B_{inl-0} r_{t2}}} = \frac{C_{1-0}}{C_{2-0}} \tag{8}$$

与目标物的反射特性、环境光的强度和分布等因素均有关系。首先考虑平均入射光 $\overline{B_{ini-0}}$ 相同时目标物反射率 r_{ti} 不同造成的影响, 比如观测场地下垫面均匀、环境光均匀、观测树木、草丛、山体、墙壁和窗户等自然或人工非黑体目标物, 不妨假设 $\overline{B_{ini-0}} / B_{g-0} = 70\%$, $r_{t2} = 10\%$, r_{t1} 在 $0 \sim 20\%$ 之间变化, 则 r_{di} 的变化范围是 $0.92 \sim 1.07$, 由图 1 可知, 忽略 r_{di} 容易引起较大的计算误差。那么, 如果选择反射率比较接近的目标物时能否获得准确的结果? 比如观测同一种植被的山体、相同涂料的墙壁等, 设计、制造两个反射率非常一致的人工目标物也是可以办到的, 但两个目标物的入射光 $\overline{B_{ini-0}}$ 会因为复杂的实际照明状况而有所差异。假设 $r_{t1} = r_{t2} = r_t$, $\overline{B_{inl-0}} / B_{g-0} = 70\%$, $\overline{B_{ini-0}} / B_{g-0}$ 在 $60\% \sim 80\%$ 范围内变化, 图 4 给出了不同 r_t 时 r_{di} 随 $\overline{B_{ini-0}} / B_{g-0}$ 变化的曲线。结合图 1 可知: 如果要求能见度达到基线长度的 200 倍时, 即使两个目标物的入射光约有 10% 的差异, 忽略 r_{di} 造成的测量误差也不能超过 $\pm 20\%$, 则目标物的反射率 r_t 不能超过约 5%, 自然目标物是难以达到这个要求的, 这个误差也是难以订正的; 并且, 考虑到其他因素的综合影响, 应该尽量减小目标物非黑体特性的影响, 实际观测中最好还是采用反射率可以忽略的实用黑体目标物^[14], 这样即使两个目标物的入射光亮度差异较大, 也不会对测量结果造成较大误差。

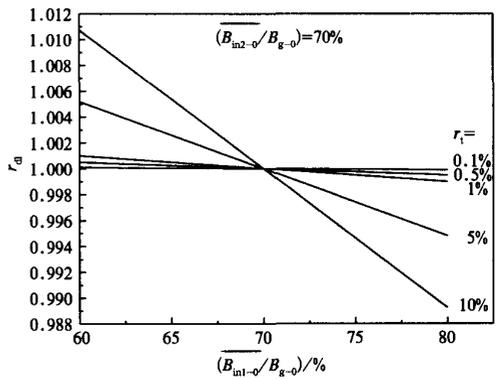


图 4 r_{di} 随 $\overline{B_{ini-0}} / B_{g-0}$ 的变化

5 结论和讨论

由前面的分析可知, 各种非标准观测条件对测量结果的影响都是有正有负。在

DPVS 的实际观测中,它们的影响是综合的,有可能相互叠加而增大误差,也有可能在一定程度上相互抵消而减小误差,很难将其一一区分,只能在系统的设计和安装时采取一定的措施尽量减弱每一项非标准观测条件的影响。

通过误差分析,本文探讨了 DPVS 采用双亮度差方法进行计算时非标准观测条件产生测量结果不确定性的原因,估计了其影响的大小,并提出了减小或避免这些影响的措施:

(1) 除了天空布满均匀云层和晴天中午以外,其他时刻正南、正北方地平线附近天空亮度的垂直相对梯度都较大,通常在 $4\%/^{\circ} \sim 10\%/^{\circ}$ 范围内,而水平相对梯度大多较小,低于 $2\%/^{\circ}$;两组目标-背景视线方向不一致是一个不容忽视的,可能产生显著测量误差的原因,为了限制和最大程度地减小其不利影响,目标物的布置和天空背景的选择最好满足下面的条件:设置具有相同视线仰角的目标物,不同目标物视线方位角的差异在保证目标物的大小符合观测需求的前提下越小越好;可选择目标物两侧天空背景进行测量,通过内插获得与目标物视线方向一致的天空背景亮度。

(2) 视线方向上气柱照明条件不均匀会导致人工无法进行调控的测量误差,应尽量选择下垫面较为均匀的观测场地,通过多次采样平均在一定程度上能够减小其影响。DPVS 可以实时监测视野范围内场地和天空的亮度分布,通过一定的技术手段识别较差的照明状况以免获得误差较大的观测记录也是有望实现的。

(3) 采用树木、草丛、山体、墙壁和窗户等暗目标物不仅会因为反射率的差异引起较大的测量误差,而且即使采用反射率一致的目标物,也会因为可能出现的具体照明条件不均匀而造成能见度测量结果的误差。最好是观测反射率低得可以忽略的人工实用黑体目标物,即使不同目标物的照明条件不一致,也不会引起较大的误差。

依据上述分析结果,我们在合肥骆岗机场进行的对比观测试验中^[6]:设置的3个目标物具有相同的视线仰角,两两之间视线方位角的差异分别为 0.44° 、 0.64° 和 1.07° ,选取的所有背景也都具有相同的视线仰角;观测场地下垫面具有较为均匀的植被;采用了实用黑体目标物^[18];每次测量都进行100次采样平均。结果表明:在进行了有效的误差控制措施之后,DPVS 的测量结果能够较好的代表真实能见度,能够达到能见度业务观测应用的要求。

总之,基于数字摄像技术,采用双亮度差方法测量气象能见度或大气消光系数,在原理上没有透射仪测量受光源前向散射影响和前向散射仪忽略气溶胶吸收效应等固有的缺陷,也解决了观测单目标物-天空背景的亮度对比法受系统暗电流和背景杂散光影响的问题,因而在理想或标准观测条件下可得到高精度的结果,在实际观测中可通过各种误差控制措施减小非标准观测条件的影响,也能够得到可信、可靠的测量结果,在气象能见度或大气消光系数的测量上有重要的应用前景。毫无疑问,在完善仪器系统设计、标定 CCD 器件、检验运行稳定性、识别非标准观测条件诸方面还有许多工作要做,利用 DPVS 测量夜间气象能见度的方案已进行了初步的试验,还需进一步的研究。

致谢:本文中计算天空亮度采用了美国 California 大学的 SBDART 程序,北京市气象局提供了部分研究经费,周秀骥院士对本工作提出过宝贵建议,作者在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Doerfel S. Apparatus and Method for Monitoring and Reporting Weather Conditions. *United States Patent*, 2001, No. US6208938 B1.
- 2 Middleton W E K. *Vision Through the Atmosphere*. Toronto: University of Toronto Press, 1952. 60 ~ 82.
- 3 Legal T, Legal L, Lehn W. Measuring Visibility Using Digital Remote Video Cameras. The 9th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation. American Meteorological Society, 1994. 87 ~ 89.
- 4 Xie Xingsheng, Tao Shanchang, Zhou Xiuji. Measuring visibility using digital photography. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44**(12): 1130 ~ 1134.
- 5 Gazzi M, Vicentini V, Bonafé U. A field experiment on contrast reduction law. *Atmos Environ*, 1994, **28**(5): 901 ~ 907.
- 6 吕伟涛, 陶善昌, 刘亦风, 等. 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. *大气科学*, 2004, **28**(4): 559 ~ 570.
- 7 VAISALA. Visibility Meter FDI2 User's Guide. 1997. 8 ~ 9.
- 8 曾书儿, 王改利. 能见度的观测及其仪器. *应用气象学报*, 1999, **10**(2): 207 ~ 212.
- 9 Allard D, Tombach I. The effects of non-standard condition on visibility measurement. *Atmos Environ*, 1981, **15**(10/11): 1847 ~ 1857.
- 10 Horvath H. Atmospheric visibility. *Atmos Environ*, 1981, **15**(10/11): 1785 ~ 1796.
- 11 Malm W, Pitchford M, Pitchford A. Site specific factors influencing the visual range calculated from teleradiometer measurements. *Atmos Environ*, 1982, **16**(10): 2323 ~ 2333.
- 12 Gorraiz J, Horvath H. Influence of nonuniform ground reflectance on horizontal visibility. *Appl Opt*, 1983, **22**(23): 3684 ~ 3689.
- 13 毛节泰, 李建国. 气象能见度与望远光度计. *大气科学*, 1984, **8**(2): 170 ~ 177.
- 14 吕伟涛, 陶善昌. CCD 数字摄像系统光学特性的一种标定方法. *光学技术*, 2001, **27**(2): 109 ~ 112.
- 15 周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. *高等大气物理学*. 北京: 气象出版社, 1991. 901 ~ 907.
- 16 Ricchiazzi P, Yang S, Gautier C, et al. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998, **79**(10): 2101 ~ 2114.
- 17 王松皋, 胡筱欣, 王维和, 等译. Elachi C. *遥感的物理学和技术概论*. 北京: 气象出版社, 1995. 49 ~ 56.
- 18 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.

ERROR ANALYSES OF DAYTIME METEOROLOGICAL VISIBILITY MEASUREMENT USING DUAL DIFFERENTIAL LUMINANCE ALGORITHM

Lü Weitao¹⁾²⁾ Tao Shanchang²⁾ Tan Yongbo²⁾

¹⁾ (Chinese Academy of Meteorological Sciences , Beijing 100081)

²⁾ (School of Earth and Space Sciences , University of Science and Technology of China , Hefei 230026)

Abstract

The theoretical analyses of measurement error caused by non-standard viewing conditions, and the corresponding error-control methods through using a Dual Differential Luminance (DDL) algorithm in daytime meteorological visibility measurements are presented based on digital photography. It shows that: (i) the vertical relative gradients of sky luminance near due south and north horizons are mostly in the range of $4\%/^\circ \sim 10\%/^\circ$ bigger than horizontal ones, which are mostly less than $2\%/^\circ$, except at noon in sunny day or when the homogeneous cloud layer spreads over the whole sky. The deviation angles between sight paths of different target-backgrounds can bring much bigger measurement errors and their effects should not be neglected. The best solution is to set targets with same viewing elevation angle and to restrict the viewing azimuth angle deviations as small as possible during the operations of Digital Photography Visiometer System (DPVS). With the important advantage of matrix imaging technique, there is the possibility to further reduce their effects if the sky luminance along the same sight path of a given target is interpolated from the luminance distribution of the sky at both sides of the target. (ii) The nonuniform illumination along the sight path is also a measurement error source, which can't be controlled manually. It is preferred to choose a site field with more uniform surface. And the error can also be reduced to a certain extent through averaging multi-samples. It is feasible to avoid results with much bigger error by monitoring the luminance distributions of site and sky and recognizing worse illumination conditions in real time. (iii) Observing some dark targets, such as trees, grasses, mountains, walls and windows etc., can't satisfy the demand of DDL measurements. It is an optimal solution to adopt artificial black targets which have enough low reflectivity.

Key words: Atmospheric extinction coefficient Dual differential luminance Non-standard viewing conditions Error-control Digital photography