

## 雾和气溶胶的光学特性对前向散射和总散射能见度仪性能的影响

李浩<sup>1</sup>, 陈晓颖<sup>1,2</sup>, 单陈华<sup>3</sup>, 唐丽萍<sup>1</sup>

(1. 解放军理工大学气象海洋学院, 江苏南京 211101;  
2. 东南大学仪器科学与工程学院, 江苏南京 210096; 3. 解放军第 95871 部队, 湖南衡阳 421002)

**摘要:** 建立了完整的散射式能见度仪(SVM)探测方程, 搜集整理了典型天气条件下雾和气溶胶的观测资料, 在此基础上, 运用米散射理论计算并分析了雾和气溶胶的光散射特性及其对前向散射能见度仪(FSVM)和总散射能见度仪(TSVM)探测性能的影响。结果表明: 大气散射特性显著影响 SVM 的探测误差, 且 FSVM 受影响程度超过 TSVM; 雾天气下 FSVM 与 TSVM 的探测误差基本相当, 而气溶胶天气下 FSVM 探测误差比 TSVM 约大 6%; 相同天气条件下, TSVM 接收的光通量约为 FSVM 的 7 倍, 但 TSVM 泄露的散射光仍不能忽略, 否则将导致较大的系统误差; 若不计光通量测量误差, 雾天气下 FSVM 与 TSVM 的探测误差分别为 4.06%、5.54%, 气溶胶天气下分别为 35.80%、30.33%。所得结果可为 SVM 的光路设计、误差分析和比对试验等提供支持。

**关键词:** 散射; 能见度; 前向散射能见度仪; 总散射能见度仪; 测量误差

**中图分类号:** P412.17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1568-07

## Effect of atmospheric fog and aerosol optical properties on the performance of FSVM and TSVM

Li Hao<sup>1</sup>, Chen Xiaoying<sup>1,2</sup>, Shan Chenhua<sup>3</sup>, Tang Liping<sup>1</sup>

(1. Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;  
2. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;  
3. Unit No.95871 of PLA, Hengyang 421002, China)

**Abstract:** A complete detection model of scattering visibility meter (SVM) was established and the sounding data of fog and aerosol under the typical weather conditions were gathered. On this basis, a calculation of the light scattering characteristics of atmosphere fog and aerosol based on Mie scattering theory was presented. It emphatically analyzed and simulated the light scattering characteristics and its influence on the detection performance of forward scattering visibility meter (FSVM) and total scattering visibility meter (TSVM). The results show that atmospheric scattering characteristics have significant effect on the sounding error of SVM, and FSVM are more affected by them than TSVM; The sounding error of FSVM was similar to TSVM in fog conditions and is approximately 6% bigger than that of TSVM in aerosol conditions; The luminous flux is received from TSVM which is about 7 times more than from FSVM under the same atmosphere conditions, but the scattered light leaking from TSVM must

收稿日期: 2012-10-14; 修订日期: 2012-11-11

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK201122185)

作者简介: 李浩(1973-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事大气探测与大气光学方面的研究。Email: lihao\_pla@163.com

not been still ignored to avoid very large system error; The sounding errors of FSVM and TSVM are approximately 4.06% and 5.54% respectively in fog conditions, and are approximately 35.806% and 30.33% respectively in aerosol conditions if the sounding error of luminous flux is ignored. The results are valuable to optical path design of SVM, error analysis and antitheses tests.

Key words: scattering; visibility; FSVM; TSVM; sounding error

## 0 引言

能见度是重要的气象要素和复杂的心理物理现象,在天气预报、环境监测、交通运输、目标侦察、武器制导等领域有重要的应用<sup>[1-2]</sup>。目前已有多种类型和多种型号的能见度仪,其光学结构和技术参数并不完全相同。在能见度仪研制过程中,由于缺少统一的检定、校准方法,生产厂商都使用各自的相对基准评价能见度仪<sup>[3]</sup>。为了考察能见度仪的性能并保证资料的可比性,常常需开展比对试验<sup>[4]</sup>,但以下情况值得注意:比对试验只能检验测量结果的一致性和设备的稳定性,并不能准确地判定仪器的性能;为了使对比结果具有代表性,必须持续较长时间,使得比对试验的工作量和成本较高;对于未知天气条件下能见度仪的性能,比对试验无法得出结论。可以预期,对能见度仪探测性能作理论研究可以作为比对试验的重要补充。随着计算技术的发展和观测资料的丰富,开展相关理论研究的条件已经成熟。散射式能见度仪(SVM)综合运用了光学散射、光电转换、信号处理和计算机等技术,SVM结构紧凑、使用方便,已成为能见度探测的主要仪器。随着光机电技术的发展,大气光学特性已经成为影响其性能的主要因子<sup>[5]</sup>。

鉴于上述,文中探讨大气光学特性对前向散射能见度仪(FSVM)和总散射能见度仪(TSVM)性能的影响。首先从理论上阐述散射仪探测原理,进而通过数值模拟,分析雾和气溶胶的光散射特性对这两种仪器性能的影响,试图为散射仪光路设计、误差分析和比对试验提供理论支持。

## 1 散射仪的探测原理

### 1.1 散射光通量的计算

FSVM 和 TSVM 都建立在测量散射光通量的基

础上<sup>[1,6]</sup>,但两者的采样容积与采样角度存在较大差异。SVM 的光路结构如图 1 所示,图中给出了其光路结构在  $x-y$  面内的投影,不失一般性,可以认为  $x-y$  面是水平面。

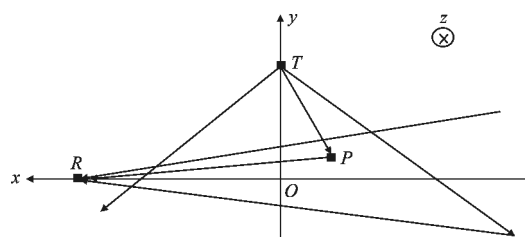


图 1 散射仪的光路

Fig.1 Optical path of SVM

设光源位于  $T(0, Y, 0)$  点,接收机位于  $R(X, 0, 0)$  点。设光源波束和接收视场圆锥的半顶角分别为  $B, A$ , 则光源波束和接收视场的立体角分别为  $\Omega_s = 2\pi(1 - \cos B)$ 、 $\Omega_r = 2\pi(1 - \cos A)$ 。根据圆锥曲面方程和立体几何关系,可知光源波束和接收视场的交汇空间(即采样容积  $V$ )为:

$$V = \left\{ (x, y, z) \mid \begin{cases} \sqrt{x^2 + z^2} \leq (Y - y) \cdot \tan B, y < Y \\ \sqrt{y^2 + z^2} \leq (X - x) \cdot \tan A, x < X \end{cases} \right\} \quad (1)$$

设有以  $R$  点为中心的球坐标系,记  $x$  轴的反方向为天顶方向, $z$  轴方向为方位  $0^\circ$ ,记  $\theta, \phi$  分别为天顶角和方位角)。针对  $(\theta, \phi)$  方向上的  $P(x, y, z)$  点,引入向量  $\vec{T}_r = \vec{PR} = (X - x, -y, -z)$ , 根据向量间的数量积运算,可知  $P$  点位于公式(2)所确定的直线  $L$  上:

$$L = \left\{ (x, y, z) \mid \begin{cases} x = X - |\vec{T}_r| \cdot \cos \theta \\ z = -|\vec{T}_r| \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi \end{cases}, (x, y, z) \in V \right\} \quad (2)$$

设  $P$  点处有大气散射体微元,其径向长度为  $dl$ , 则其体积  $dv$  为:

$$dv = |\vec{T}_r|^2 \cdot \sin \theta d\theta d\phi dl \quad (3)$$

将光源视作朗伯源<sup>[6]</sup>(设发光通量为  $\Phi_e$ ),忽略光传输过程中的衰减,引入向量  $\vec{T}_l = \vec{TP} = (x, y - Y, z)$ , 则到

达  $dv$  上的入射光强  $I_e$  为:

$$I_e = \Phi_e \cdot (Y-y) / |\vec{T}_t|^3 \quad (4)$$

向量  $\vec{T}_t$  与  $\vec{T}_r$  的夹角即为散射角  $\Theta$ , 根据向量几何可知:

$$\Theta = \arccos[(I_r \cdot I_t) / (|\vec{T}_r| \cdot |\vec{T}_t|)] \quad (5)$$

设采样容积内大气均匀, 则体散射函数  $\beta(\Theta)$  与位置无关, 若忽略多次散射, 则由  $dv$  散射的到达接收机处的散射光强  $dl_s(\theta, \phi)$  为:

$$dl_s(\theta, \phi) = (I_e \cdot \beta(\Theta) / |\vec{T}_r|^2) dv \quad (6)$$

对公式(6)沿空间直线  $L$  作曲线积分, 则可得到来自  $(\theta, \phi)$  方向所有散射体微元散射的到达接收机的散射光强  $I_s(\theta, \phi)$ :

$$I_s(\theta, \phi) = \int_L dl_s(\theta, \phi) \quad (7)$$

于是, 接收机实测到的总散射光通量  $\Phi_s$  为:

$$\Phi_s = \int_0^{2\pi} \int_0^A I_s(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \quad (8)$$

综上所述, 若已知  $X, Y, A, B, \Phi_e$  和  $\beta(\Theta)$ , 由公式(1)-(8)就可计算出  $\Phi_s$ 。

### 1.2 散射仪的探测方程

若接收视场较窄, 则近似认为所有体微元均位于  $x$  轴上, 从而可对 1.1 节作简化处理。对于  $x$  轴上坐标为  $(x, 0, 0)$  点处散射体微元, 由公式(2)-(8), 可得:

$$\begin{cases} -Y \cdot \tan B < x < Y \cdot \tan B \\ dv = (X-x)^2 \cdot \Omega_s dx \\ I_e = \Phi_e \cdot Y / (\sqrt{x^2 + y^2})^3 \\ \Theta = \arctan(Y/x) \\ dl_s = [I_e \cdot \beta(\Theta) / (X-x)^2] dv \\ \Phi_s = I_s \cdot \Omega_s \end{cases} \quad (9)$$

整理公式(9), 可得:

$$\Phi_s = (\Phi_e \cdot \Omega_s / Y) \cdot \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \beta(\Theta) \cdot \sin\Theta d\Theta \quad (10)$$

式中:  $\Theta_1 = \pi/2 - B$ ;  $\Theta_2 = \pi/2 + B$ 。

根据 Koschmieder 定律和大气散射理论, 可知:

$$\begin{cases} L_M = 3.912/k_t \\ k_s = 2\pi \int_0^\pi \beta(\Theta) \cdot \sin\Theta d\Theta \\ \tilde{\omega} = k_s/k_t \\ P(\Theta) = 4\pi\beta(\Theta)/k_s \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $L_M, k_t, k_s, \tilde{\omega}$  和  $P(\Theta)$  分别为气象能见度、消光系数、散射系数和单散射反照率和相函数。

相函数既是描述大气散射特性的重要参量<sup>[6-7]</sup>, 也是描述散射仪原理和性能的关键量<sup>[1,8-9]</sup>。但需要指出, 相函数不能直观反映特定视场内的散射光通量的大小。为了便于分析散射仪的探测性能, 并统一 FSVM 与 TSVM 的探测方程, 文中把限定方位内的散射光通量与总散射光通量的比值定义为区间通量比  $R(\Theta_1, \Theta_2)$ , 并用该参数来描述大气散射特性:

$$R(\Theta_1, \Theta_2) = 2\pi \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \beta(\Theta) \cdot \sin\Theta d\Theta / k_s \quad (12)$$

为方便分析, 文中还引入累积通量比  $R_0(\Theta)$ :

$$R_0(\Theta) = R(0, \Theta) \quad (13)$$

显然:

$$\begin{cases} R(\Theta_1, \Theta_2) = \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} P(\Theta) \cdot \sin(\Theta) d\Theta / 2 \\ R(\Theta_1, \Theta_2) = R_0(\Theta_2) - R_0(\Theta_1) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $(\Theta_1, \Theta_2)$  为视场;  $\Theta_2 - \Theta_1$  为视场宽度;  $(\Theta_1 + \Theta_2)/2$  为主散射角。由公式(10)-(12), 可得散射仪的探测方程:

$$L_M = \frac{3.912}{2\pi} \cdot \frac{\Omega_s}{Y} \cdot \frac{\Phi_e}{\Phi_s} \cdot \tilde{\omega} \cdot R(\Theta_1, \Theta_2) \quad (15)$$

设  $C = (3.912\Omega_s \cdot \Phi_e) / (2\pi Y)$ , 则公式(15)可写成:

$$L_M = C \cdot \tilde{\omega} \cdot R(\Theta_1, \Theta_2) / \Phi_s \quad (16)$$

式中:  $\beta(\Theta), \tilde{\omega}$  取决于实际大气光散射特性;  $\Phi_s$  为仪器实测的光强;  $C$  为由仪器光机电参数确定, 可视为常数。

## 2 研究方法与所用资料

### 2.1 研究方法

根据误差传递理论, 对公式(16)进行变换, 可求得  $L_M$  的相对标准差  $\sigma_{L_M}/L_M$ , 即:

$$\sigma_{L_M}/L_M = \sqrt{(\sigma_R/R)^2 + (\sigma_{\tilde{\omega}}/\tilde{\omega})^2 + (\sigma_{\Phi_s}/\Phi_s)^2} \quad (17)$$

式中:  $\sigma_{L_M}, \sigma_R, \sigma_{\tilde{\omega}}$  和  $\sigma_{\Phi_s}$  分别表示  $L_M, R, \tilde{\omega}$  和  $\Phi_s$  的标准差。

文中把这些误差用相对标准差的形式表示, 即  $\sigma_R/R, \sigma_{\tilde{\omega}}/\tilde{\omega}, \sigma_{\Phi_s}/\Phi_s$  分别称为散射模型误差、吸收消光误差和通量测量误差,  $\sigma_{L_M}/L_M$  则为能见度探测误差。显然, 散射模型误差和吸收消光误差与大气光散射特性有关。

设散射粒子为球形、均质粒子,若已知粒子大小、复折射指数和波长,可由米散射理论<sup>[6]</sup>计算出  $R(\Theta_1, \Theta_2)$  和  $\tilde{\omega}$ 。采样容积内的大气是多分散粒子系统,其体散射特征量可由单个粒子散射特征量按粒子尺度谱对粒子半径积分<sup>[6]</sup>得到,即:

$$\beta(\Theta) = \int_{r_1}^{r_2} n(r) \cdot \sigma(\Theta; m_c, r) dr \quad (18)$$

式中:  $n(r)$  为粒子尺度谱;  $r$  为粒子半径;  $r_1, r_2$  分别为粒子尺度的下限、上限;  $\sigma(\Theta; m_c, r)$  为单个粒子的散射函数;  $m_c$  是粒子的复折射指数。

## 2.2 所用资料

为了研究典型天气条件下的大气光散射特性,文中搜集了多种大气粒子尺度谱观测资料作为分析样本,粒子类型包括乡村气溶胶、城市气溶胶、海洋气溶胶、沙尘气溶胶、辐射雾、平流雾。其中,乡村气溶胶、城市气溶胶和海洋气溶胶的尺度谱为 D 谱,雾的尺度谱为 Junge 谱、沙尘气溶胶的尺度谱为对数正态分布<sup>[6,10]</sup>,具体的谱参数由观测资料拟合给出。

不同类型粒子的化学成份有较大的区别,因而粒子复折射指数随不同类型粒子而变,且随波长呈现相当复杂的变化。不失一般性,文中研究  $0.55 \mu\text{m}$ 、 $1.06 \mu\text{m}$  两种波长下雾和气溶胶的光散射特性与散射仪的性能,粒子复折射指数的实部和虚部取值<sup>[10]</sup>见表 1。

表 1 雾和气溶胶的复折射指数取值

Tab.1 Value of complex refractive index of fog and aerosol

Wavelength		0.55 $\mu\text{m}$		1.06 $\mu\text{m}$	
Type	Real part	Imaginary part	Real part	Imaginary part	
Fog		1.333	0.000 196	1.326	0.000 005
	Marine	1.418	0.002	1.405	0.004
	Rural	1.530	0.006	1.520	0.014
Aerosol	Dust	1.530	0.008	1.520	0.008
	Urban	1.607	0.158	1.600	0.163

在能见度仪实际应用中,往往没有条件获取大气气溶胶粒子的详细信息,但可以根据应用地区的实际情况大致判断大气粒子的类型,这样就可以估算大气粒子的复折射指数和尺度谱。

## 3 结果与讨论

### 3.1 雾和气溶胶的光散射特性

#### 3.1.1 累积通量比的分布

图 2 是  $0.55 \mu\text{m}$  波长下样本的累积通量比随累积角的分布曲线,从不同角度处曲线的斜率还可以确定区间通量比的分布。

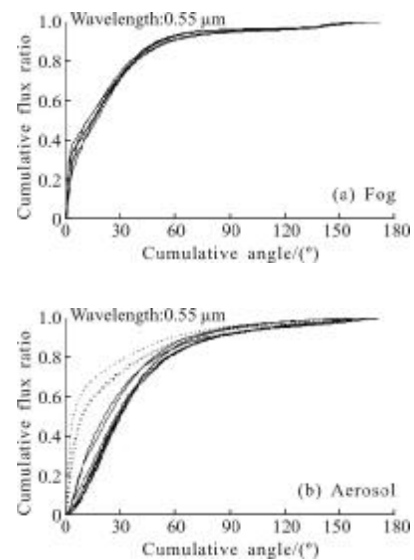


图 2 累积通量比随累积角的分布

Fig.2 Distribution of the cumulative flux ratio with cumulative angle

从图 2 可以看出,雾和气溶胶光散射有以下基本特性:虽然米散射相函数在  $0^\circ$  附近存在极大值(比其他角度大 5 个量级<sup>[7]</sup>),但  $R(0^\circ, 2^\circ) \approx 0$ ,说明前向较窄区间散射光通量很小,这是由于公式(12)中的正弦项所致;  $(0^\circ, 90^\circ)$  内曲线上升很快,  $R(0^\circ, 90^\circ)$  可达 90%,而  $(90^\circ, 180^\circ)$  内曲线比较平坦,  $R(90^\circ, 180^\circ)$  仅为 10%,说明累积通量比可以反映散射不对称因子<sup>[6]</sup>;  $(160^\circ, 180^\circ)$  内曲线几乎水平,  $R(160^\circ, 180^\circ) \approx 0$ ,说明后向散射光通量十分微弱,这是米散射的基本特点<sup>[7]</sup>;粒子尺度越大前向散射越显著,沙漠型气溶胶(图中虚线)的  $R(0^\circ, 10^\circ) \approx 0.45$ ,雾的  $R(0^\circ, 10^\circ) \approx 0.4$ ,其他类型气溶胶的  $R(0^\circ, 10^\circ) \approx 0.2$ ;图 2(a)中曲线比较一致,而图 2(b)中曲线较离散,说明雾与气溶胶光散射特性有明显差异<sup>[7]</sup>,这是由于气溶胶复折射指数虚部大于雾,且不同类型气溶胶复折射指数虚部不同所致。

### 3.1.2 单散射反照率的值

表 2 是 0.55 μm 和 1.06 μm 波长下样本的单散射反照率,给出了对样本进行统计的平均值与离散度,以及平均值和离散度的比值(即吸收消光误差)。显然,FSVM 与 TSVM 的吸收消光误差相同。

表 2 雾和气溶胶的单散射反照率

Tab.2 Single scattering albedo of fog and aerosol

Particle	Wavelength/μm	Mean	Dispersion	Ratio
Fog	0.55	0.961	0.010	1%
	1.06	0.999	0.000	0
Aerosol	0.55	0.789	0.166	21%
	1.06	0.751	0.170	23%

从表 2 可以看出,雾的单散射反照率平均值比较接近 1,气溶胶的单散射反照率平均值明显小于 1,且雾的单散射反照率离散度明显小于气溶胶,具体取值与波长有关。这同样是由于气溶胶的吸收远大于雾,且不同类型气溶胶吸收不同所致<sup>[7]</sup>。

### 3.2 散射仪的散射模型误差分析

#### 3.2.1 前散仪

多数 FSVM 的视场宽度为 10°左右,主散射角为 35°左右<sup>[1]</sup>。不失一般性,文中研究视场宽度为 5°或 10°,而主散射角在较大范围内变化的情况。

根据 3.1.1 节的结果,图 3 给出了波长为 0.55 μm、视场宽度为 5°或 10°情况下样本的区间通量比平均值和离散度随主散射角的分布。可以看出,随着主散射角增大或视场宽度减小,样本的区间通量比离散度和平均值总体上均呈现出减小趋势。

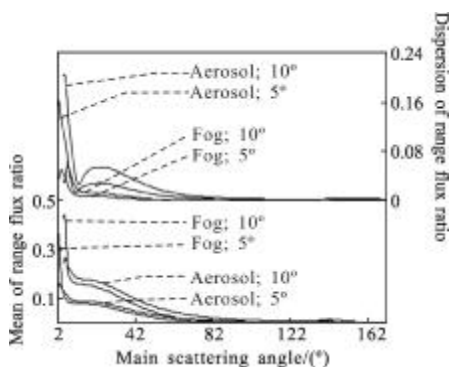


图 3 区间通量比平均值与离散度随主散射角的分布  
Fig.3 Distribution of the mean and dispersion of range flux ratio with the main scattering angle

为了分析 FSVM 的误差,图 4 给出了样本的区间通量比离散度与平均值的比值(即散射模型误差)随主散射角的分布,可以看出:主散射角在(20°,50°)范围内,雾天气散射模型误差取极小值;主散射角在 15°左右时,气溶胶天气散射模型误差取极小值;雾天气下的散射模型误差基本不受波长影响,而气溶胶天气下的散射模型误差受波长影响明显;雾与气溶胶天气下,散射模型误差都基本不受视场宽度的影响。

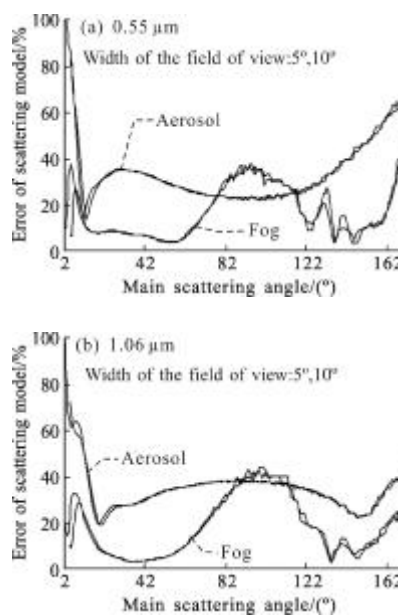


图 4 前散仪的散射模型误差

Fig.4 Error of scattering model of the forward scattering visibility meter

由图 4 可见,当波长为 1.06 μm(多数 FSVM 工作在近红外波段)、主散射角为 35°、视场宽度为 10°时,雾和气溶胶天气下 FSVM 的散射模型误差分别约为 4.06%和 27.44%。

#### 3.2.2 总散仪

TSVM 的视场比 FSVM 宽广得多,但实际上也难以测量到全部散射光,技术指标较高的产品也仅能做到(7°,170°)视场<sup>[1,6]</sup>。不失一般性,文中研究(7°,170°)或(5°,170°)两种视场的情况。

根据 3.1.1 节的结果,图 5 给出了波长为 0.55 μm、视场为(5°,170°)或(7°,170°)情况下样本的区间通量比平均值和离散度随主散射角的分布。可以看出,雾与气溶胶样本的区间通量比平均值分别约取 0.65 和 0.85,两种视场下区间通量比平均值相差约 0.05,气溶胶样本的区间通量比离散度是雾的 3 倍多。

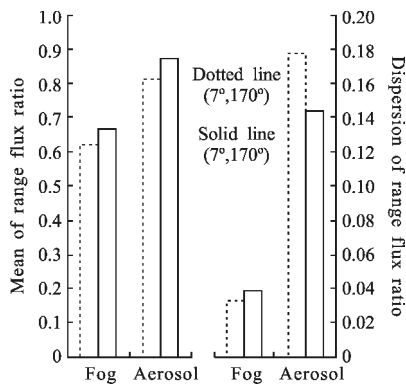


图 5 两种视场下的区间通量比平均值与离散度

Fig.5 Mean and dispersion of range flux ratio in two kinds of view

为了分析 TSVM 的误差,图 6 给出了根据样本得到的散射模型误差,可以看出:散射模型误差受波长影响明显,雾的散射模型误差随波长增大而增大,而气溶胶的情况正好相反;雾的散射模型误差基本不受视场的影响,而气溶胶的散射模型误差随视场增大显著减小。

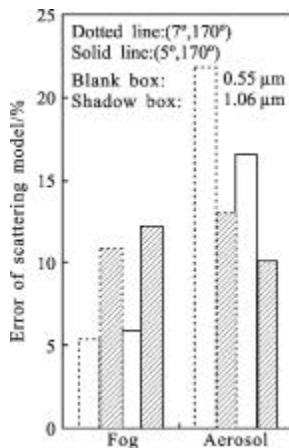


图 6 总散仪的散射模型误差

Fig.6 Error of scattering model of the total scattering visibility meter

由图 6 可见,当波长为  $0.55 \mu\text{m}$ (多数 TSVM 工作在可见光波段)、视场为  $(7^\circ, 170^\circ)$  时,雾和气溶胶天气下 TSVM 的散射模型误差分别约为 5.45% 和 21.89%。

## 4 结论

文中从大气散射理论出发,建立了散射仪的探测方程。以此为基础,使用实际观测资料,分析了散射仪的探测误差,得到以下结论:(1) 气溶胶与雾两

种天气下 SVM 的散射模型误差有差别,对于 FSVM 与 TSVM 而言差值分别约为 23%、16%,即大气光学特性显著影响散射仪的散射模型误差,且 FSVM 受影响更大。(2) 雾天气下 FSVM 与 TSVM 的散射模型误差基本相当,而气溶胶天气下 TSVM 的散射模型误差比 FSVM 的约小 6%。(3) 雾天气下散射仪的吸收消光误差可以忽略,而气溶胶天气下的吸收消光误差约为 20%。(4) 相同天气下 TSVM 接收的光通量约为 FSVM 的 7 倍,因此 TSVM 的通量测量误差远小于 FSVM。(5) 若不计通量测量误差,将散射模型误差和吸收消光误差按公式(17)合成,则雾天气下 FSVM 与 TSVM 的能见度探测误差分别为 4.06%、5.54%,气溶胶天气下分别为 35.80%、30.33%。(6) 为了提高探测精度,需将散射仪与天气现象识别仪结合起来,并考虑观测点的地理位置与季节因素的影响。(7) TSVM 接收机泄露的散射光不能忽略,否则将导致较大的系统误差,目前已有采用积分球技术进一步扩大接收视场的方法。

针对文中分析结果,需要作如下补充说明:(1) 在散射仪研制过程中,通过仪器输出信号与能见度标准值拟合,得出经验公式作为散射仪的探测方程,但很少有具体式子公开<sup>[3]</sup>。(2) 为避免发射光直接进入 FSVM 接收机,其主散射角不能小于发射光发散角和接收视场角之和的一半<sup>[3]</sup>,结合 3.2.1 节分析,FSVM 主散射角应在 范围内。(3) 后向  $150^\circ$  附近也存在散射模型误差极小值,但后向散射能量微弱、信噪比低,因此后向散射能见度仪很少使用<sup>[1]</sup>。(4) 透射式能见度仪是探测能见度的另一类重要仪器,但前向散射光也会进入接收机<sup>[1]</sup>,可根据接收机视张角参考 3.1.1 节结果对其进行修正。(5) 1.1 节中给出的散射光通量的计算方法,对于多基地雷达、光散射通信等与大气散射密切相关的应用也具有参考价值。

## 参考文献:

- [1] Sun Xuejin, Wang Xiaolei, Li Hao. Atmospheric sounding [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009. (in Chinese)
- [2] Rao Ruizhong. Vision through atmosphere and atmospheric visibility [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30 (9): 2486-2492. (in Chinese)
- [3] Li Chunliang, Qu Laishi, Zhang Yong. 100 Questions of Visibility Measure [M]. Beijing: China Meteorological Press,

2009. (in Chinese)
- [4] 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. (in Chinese)
- [5] Li Hao, Sun Xuejin. Theoretical analysis of measurement error of forward scattering visibility meter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 1094-1098. (in Chinese)
- [6] Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. *Atmospheric Physics* [M]. Beijing: Peking University Press, 2003. (in Chinese)
- [7] Li Hao, Sun Xuejin, Tang Liping. Characteristics of atmospheric volume scattering intensity in visible and infrared band [J]. *Journal of Infrared Millim Waves*, 2011, 30(8): 328-332. (in Chinese)
- [8] Winstanley J V, Adams M J. Point visibility meter: a forward scatter instrument for the measurement of aerosol extinction coefficient[J]. *Applied Optics*, 1975, 14(9): 2151-2157.
- [9] Heintzenberg J, Charlson R J. Design and application of the integrating nephelometer: a review [J]. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 1996, 13: 987-1000.
- [10] Zhang Chengchang, Zhou Wenxian. *Atmospheric Aerosol Tutorial* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1995. (in Chinese)