

机场斜视视程的数值模拟实验及其 计算公式

邱金桓

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文通过求解辐射传输方程,研究了斜视视程对大气消光系数分布、散射相函数、总光学厚度、太阳的天顶角和方位角以及目标物和背景的反照特性的敏感性。根据数值模拟实验资料,提出了一个简单的斜视视程的近似表达式。

一、引 言

机场的空对地斜视视程的探测,对于保证飞机的安全着陆是极为重要的。许多飞机的失事是在低能见度和低云的气象背景下发生于飞机着陆的瞬间^[1]。然而斜视视程的探测目前还只能根据水平能见度及目视垂直天空的混浊程度加以粗略估计。近二十年来,国内外对激光探测斜视视程的问题作了不少工作^[2-4],但还都处于原理试验阶段。

探测斜视视程的主要困难之一是牵涉到复杂的辐射传输理论。赵燕曾等人建议用低仰角下地对空天空亮度代替难以测量的空对地气柱亮度,并用亮度计测量前者以及背景和目标的真亮度,这对于解决上述困难是有效的^[5]。但在低能见度情形下,亮度计离机场跑道偏远,由于气柱亮度的贡献,所测的跑道的真亮度可能具有较大的误差,探测设备离机场跑道太近,也是现代化机场所不允许的。本文通过计算辐射传输方程,研究了影响斜视视程的主要因子,提出了一个新的计算公式,它避免采用亮度计以测量天空亮度等。

二、敏感性分析

设目标物和背景真亮度分别为 B_T^* 和 B_G^* , R 为斜视视程, ϵ 为对比感阈。就机场情形而言,白漆标志的真亮度一般大于水泥跑道的真亮度,而水泥跑道的真亮度一般大于草地背景真亮度,即 $B_T^* > B_G^*$, 根据能见度定义可推得^[3]

$$\epsilon = \frac{(B_T^* - B_G^*)e^{-\int_0^R \sigma(r)dr}}{B_G^*e^{-\int_0^R \sigma(r)dr} + B(R)} \quad (1)$$

(1)式中, $\sigma(r)$ 为大气消光系数分布, $B(R)$ 是观测者至目标物之间的气柱亮度。

由(1)式可推得

$$\int_0^R \sigma(r) dr = \bar{\sigma} R = \ln \frac{B_T^* - B_G^* - \varepsilon B_G^*}{\varepsilon B(R)} \quad (2)$$

$$\bar{\sigma} = \int_0^R \sigma(r) dr / R \quad (3)$$

$$R = \frac{1}{\bar{\sigma}} \ln \frac{B_T^* - B_G^* - \varepsilon B_G^*}{\varepsilon B(R)} \quad (4)$$

假设背景和目標物均为漫反射体,其反照率分别为 A_G 和 A_T , 则有

$$\begin{cases} B_T^* = A_T(\pi F_0 \cos \theta_0 e^{-\tau_T \sec \theta_0} + F) / \pi = A_T B_0 \\ B_G^* = A_G B_0 \\ B_0 = (\pi F_0 \cos \theta_0 e^{-\tau_T \sec \theta_0} + F) / \pi \end{cases} \quad (5)$$

(5) 式中, τ_T 为大气柱总光学厚度, πF_0 为大气上界太阳辐照度, F 为地面处向下的漫射通量, θ_0 为太阳的天顶角, B_0 等价于地面处向下的平均光强。 $B(R)$ 和 F 可从如下的辐射传输方程求出

$$\begin{aligned} \mu \frac{dB(\tau, \mu, \phi)}{d\tau} = & -B(\tau, \mu, \phi) + \frac{\tilde{\omega}}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 P(\mu, \phi, \mu', \phi') B(\tau, \mu', \phi') d\mu' d\phi' \\ & + \frac{\tilde{\omega} F_0}{4} P(\mu, \phi, \mu_0, \phi_0) e^{-\tau/\mu_0} \end{aligned} \quad (6)$$

方程(6)中, P 为大气散射相函数, $\tilde{\omega}$ 为一次散射反照率, τ 为光学厚度, μ 和 ϕ 为天顶角余弦和方位角, μ_0 和 ϕ_0 分别为太阳天顶角余弦和方位角。 本文采用 Herman 等人提出的一个改进的 Gauss-Seidel 迭代法求解方程(6)^[5], 并取 $\pi F_0 = 1$, $\tilde{\omega} = 0.9-1$ 。

由方程(4)和(5)进一步推得

$$R = \frac{1}{\bar{\sigma}} \ln \frac{(A_T - A_G - \varepsilon A_G) B_0}{\varepsilon B(R)} \quad (7)$$

$B(R)$ 和 B_0 依赖于太阳天顶角和方位角、散射相函数和大气柱光学厚度, 所以从(7)式看, 斜视视程也依赖于这些参数, 而且还与消光系数分布之均值 $\bar{\sigma}$, 对比感阈 ε , 目标物和背景的反照率 A_T 和 A_G 有关。 为了着重研究飞机着陆时的斜视视程, 根据国际民航对水平视程的规定, 取 $\varepsilon = 0.05$, 并侧重考虑飞机着陆下滑角为 $\alpha = 2^\circ 40'$ 的情形。 考虑到眼睛最敏感的色光波长为 $0.55 \mu\text{m}$, 本文只求解该波长的辐射传输方程。 Duggin 等人^[6]和 Kondratyev^[7] 的研究结果表明, 在 $0.55 \mu\text{m}$ 波长, 各种植被地表(包括草地)反照率约在 0.05 至 0.1 之间变化, 本文取机场草地背景反照率为 0.08, 取水泥跑道反照率为 0.3。 消光系数分布采用如下四个模式:

1. 北京夏季消光系数分布平均结果^[8], $\tau_T = 0.3$ 。
2. 北京 1972 年 8 月 22 日上午消光系数分布^[8], $\tau_T = 0.3$ 。
3. 北京 1975 年 11 月 3 日 9 点至 10 点雾中消光系数分布^[9], $\tau_T = 1.1$ 。
4. 北京 1975 年 11 月 3 日 9 点至 10 点雾中消光系数分布, $\tau_T = 10$ 。

图 1 中的曲线 1, 2 和 3 分别对应上述消光系数分布 1, 2 和 3。 上述分布, 只有地面至某一高度的资料, 但在该高度以上不管消光系数分布如何, 只要散射相函数不随高度改变, 总光学厚度 τ_T 满足所列的数值, 就不会影响后面的结论。 τ_T 中包含分子光学厚度,

其值取 $0.0926^{[20]}$ 。根据 Pahor 等人的研究,雾谱相函数的不对称因子为 0.7104 , 本文采用不对称因子为 0.7104 的 Henyey-Greenstein 相函数,即

$$P(\theta) = (1 - g^2) / (1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}, \quad g = 0.7104,$$

以及 Junge 谱参数 $\nu^* = 2$ 和 $3(n(r) = cr^{-(\nu^*+2)})$ 的两种气溶胶谱相函数以求解方程 (6)。

图 2 表示在四个消光系数分布下,斜视视程随太阳方位角的变化(机场跑道的方位角定为零度)。图中, $R^{(0)}$ 表示水平视程,从该图可以看出:

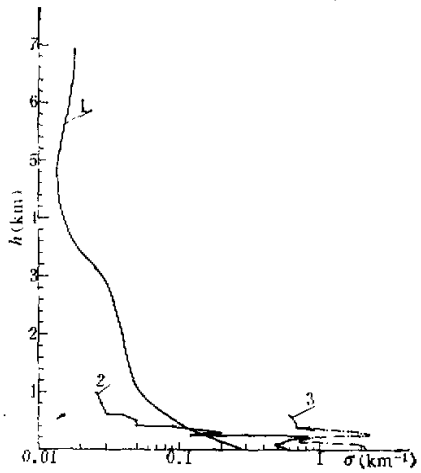


图 1 消光系数垂直分布

1. 当总光学厚度较小,即在晴天或轻雾天气下,机场的斜视视程强烈依赖于太阳的方位角。当太阳处于跑道方位角附近时,由于较强的气柱亮度 $B(R)$,斜视视程较坏,可比水平视程偏小 2 至 3 倍。当 $\phi_0 > 90^\circ$ 后, R 基本上不随 ϕ_0 改变。 $180^\circ \leq \phi_0 \leq 360^\circ$ 的 R 值与 $0^\circ \leq \phi_0 \leq 180^\circ$ 的 R 值是对称的,图中没有画出前者。当光学厚度较大时,如 $\tau_T = 10$ 模式,对应于浓雾或云天的情形, $B(R)$ 与太阳的方位角无关,所以 R 与太阳方位角无关。

2. 斜视视程密切依赖于消光系数分布。对消光系数分布 1,在 1km 以下, $\sigma(r)$ 随 r 的增大而迅速递减(见图 1), σ 较小,斜视视程可比水平视程偏大 8km 以上。对消光系数分布 2,情形相反,在 200m 高度附近存在一个明显的消光系数极大峰(见图 1),斜视视程远比水平视程偏小,如在 $\phi_0 = 0^\circ$ 时,前者偏小 2.5 倍。对于消光系数分布 3,水平视程为 1km,在近地表消光系数变化很小,当 $\phi_0 \approx 0^\circ$ 时,斜视视程约为 400m,这时若根据水平视程指挥飞机的降落,就不可能保证安全。

图 3 表明,当总光学厚度很大时,斜视视程与太阳高度角无关。而当 τ_T 较小时, R 密切依赖于太阳高度角, R 一般随太阳高度角增大而变大,变化可达 3 倍左右。

表 1 表示斜视视程对散射相函数的依赖关系。表中 g 为不对称因子, ΔR 为不同相函数下 R 的最大相对偏差。斜视视程对相函数的敏感性是较弱的。当 $\phi_0 \geq 45^\circ$ 时,不同

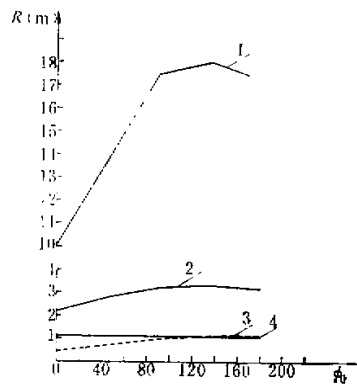


图2 不同消光系数分布下斜视视程随太阳方位角 ϕ_0 的变化, $\mu_0 = 0.4374$, $A_T = 0.3$, $A_G = 0.08$

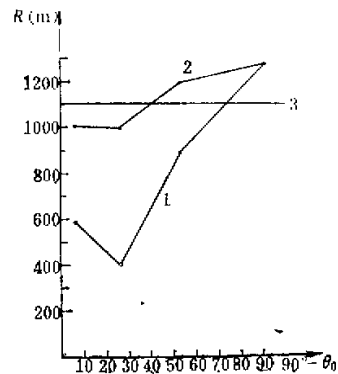


图3 斜视视程随太阳高度角的变化。

- (1) 消光系数分布 3, $\phi_0 = 0^\circ$;
(2) 消光系数分布 3, $\phi_0 = 90^\circ$;
(3) 消光系数分布 4, $\phi_0 = 0^\circ - 360^\circ$

相函数引起的 R 的相对偏差不超过 5.3%, 但在 $\phi_0 = 0^\circ$ 附近, 偏差稍大, 可达 24%。

表1 R 对相函数的敏感性, $\mu_0 = 0.4374$, 消光系数分布 3

$R(\text{km})$ ϕ_0	g	$\nu^* = 3$ $g = 0.598$	$\nu^* = 2$ $g = 0.700$	雾谱相函数 $g = 0.7104$	$\Delta R(\%)$
0°		2.09	2.20	1.78	24.0
45°		2.74	2.79	2.76	1.8
90°		3.33	3.22	3.22	3.2
180°		2.34	3.23	3.40	5.3

表2 $B(R)$ 随 α 的变化, $\mu_0 = 0.4374$

$B(R)$ ϕ_0	α	$2^\circ 40'$		$6^\circ 36'$		$11^\circ 54'$	
		3	4	3	4	3	4
0°		0.1281	0.01194	0.1395	0.01357	0.1520	0.01445
45°		0.07254	0.01194	0.08192	0.01357	0.09246	0.01445
90°		0.04054	0.01194	0.04616	0.01357	0.05236	0.01445
135°		0.03127	0.01194	0.03589	0.01357	0.04111	0.01445
180°		0.02968	0.01194	0.03434	0.01357	0.03958	0.01445

从图4可以看出 R 对目标物反照率的敏感性, 对 $A_G = 0.08$ 以及消光系数分布 4, 当 $A_T = 0.1032$ 时, 斜视视程为零, 当 $A_T > 0.5$ 时, 斜视视程大于水平视程。当 A_T 在 0.2 至

0.5 较宽范围内变化时, R 的相对变化小于 70%。由机场跑道或草地的反照率的变化所引起的斜视视程变化估计不会超过一倍。

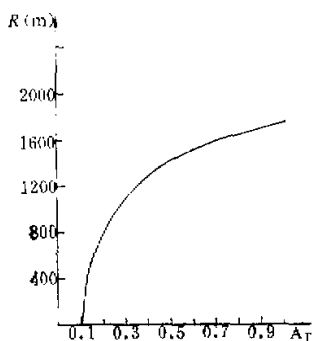


图 4 斜视视程随目标物反照率的变化。

$\mu_0 = 0.4374$, $R^{(0)} = 1.4\text{km}$,
 $A_G = 0.08$, 消光系数分布 4

的变化小于 10%。对于消光系数分布 4, τ_T 较大, $B(R)$ 随 α 的变化较小。

再考察 α 改变时, σ 的变化对斜视视程的影响。设 h 为垂直高度, 则 $h = R \sin \alpha$, 对同一 R 值, α 越大, h 越大, 如果 $\sigma(h)$ 随 h 递减, α 越大, σ 越小, 斜视视程越好。

从表 3 可以进一步看出斜视视程对 τ_T 的敏感性。当 $\tau_T \leq 1.1$ 时, 特别是在 $\phi_0 = 0^\circ$ 附近, R 对 τ_T 的变化较敏感, 但相对变化小于 1 倍。当 $\tau_T > 2.1$ 后, R 与 τ_T 基本无关。

表 3 R 随 τ_T 的变化。 $\mu_0 = 0.115$, $A_T = 0.3$, $\alpha = 2^\circ 40'$

$R \backslash \tau_T$ ϕ_0	0.6	1.1	2.1	5	10	20
0°	0.431	0.750	1.09	1.13	1.15	1.16
90°	0.709	1.00	1.13	1.15	1.15	1.16
180°	1.05	1.16	1.15	1.16	1.15	1.16

三、近似计算公式

探测斜视视程的困难之一在于向上的气柱亮度 $B(R)$ 的直接测量。有效的办法是寻求 $B(R)$ 和地面上可测量的依赖关系。对于机场关心的低俯角和低能见度情形, 视程内的气柱照度近似认为均匀, $B(R)$ 可表为^[3]

$$B(R) = K[1 - e^{-\int_0^R \sigma(r) dr}] \quad (8)$$

综合公式(4),(7)和(8)可推得

$$R = \frac{1}{\bar{\sigma}} \ln \left(\frac{B_T^* - B_G^* - \epsilon B_G^*}{\epsilon K} + 1 \right) \quad (9)$$

以及

$$R = \frac{1}{\sigma} \ln \left[\frac{(A_T - A_G - \varepsilon A_G) B_0}{\varepsilon K} + 1 \right] \quad (10)$$

对于水平的情形, K 可理解为天空背景亮度, 但对向上的斜视亮度则不妥。设 $\tau(h = R \sin \alpha)$ 为垂直光学厚度, 对 $\alpha = 2^\circ 40'$ 情形, 当 $\tau(h) \geq 0.2$ 时, $0.98 < 1 - e^{-\int_0^R \sigma(r) dr} \leq 1$, 公式(8)中的 $B(R)$ 基本上不随 R 的增大而改变。但是实际上, 正如图 5 以及 Herman 的研究结果^[6]所表明, 当 $\tau(h) \geq 0.2$ 后, $B(R)$ 继续随 R 的增大而变大, 甚至可增大一个数量级以上, K 值不可理解为 R 趋无穷处的气柱亮度。图 5 中 θ 表示天顶角, $\theta = 87^\circ 20'$ 表示高度角为 $2^\circ 40'$ 的向上气柱亮度, $\theta = 92^\circ$ 表示高度角为 2° 的向下气柱亮度。从图 5 还可以看出, 当 $\tau(h)$ 由零增大时, $B(R)$ 也由零增大, 因此, 必然存在一个 R 值使得 $B(R)$ 等于向下的天空亮度。根据我们的数值试验, 对于 $\alpha = 2^\circ 40'$, 如果把 K 值理解为

$$\int_0^R \sigma(r) dr = 4$$

的向上气柱亮度, 不仅公式(8)在

$$\int_0^R \sigma(r) dr \leq 4$$

范围内适用, 而且该 K 值近似等于高度角为 2° 的向下天空亮度, 后者记为 S^* , 于是公式(9)化为

$$R = \frac{1}{\sigma} \ln \left(\frac{B_T^* - B_G^* - \varepsilon B_G^*}{\varepsilon S^*} + 1 \right) \quad (11)$$

如果必须考虑 15° 以内的俯角变化, 则用如下的近似公式更合适

$$R = \frac{1}{\sigma} \ln \left[\frac{0.955(1 + \sin \alpha)(B_T^* - B_G^* - \varepsilon B_G^*)}{\varepsilon S^*} + 1 \right] \quad (12)$$

表 4 表示在 $2^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$, $0.1 \leq \mu_0 \leq 1$ 和 $0^\circ \leq \phi_0 \leq 360^\circ$ 条件下, 以 $S^*/0.955(1 + \sin \alpha)$ 代公式(9)中的 K 值可能引起的相对误差 ΔE 与总光学厚度 τ_T 的关系。如表所示, 在 $0.3 \leq \tau_T \leq 20$ 范围内, ΔE 最大值为 43%, 在 $0.7 \leq \tau_T \leq 10.0$ 范围内, 误差较小, 不超过 15%, 当 τ_T 很小时, 误差较大。

表 4 ΔE 随 τ_T 的变化

τ_T	0.3	0.5	0.7	1.1	2.1	5	10	15	20
$\Delta E(\%)$	43	24	15	12	10.1	8.2	14	17	23

应用公式(11)或(12)计算斜视能见度必须采用亮度计测量 S^* , B_G^* 和 B_T^* 。若能确定(10)中的 K 和 B_0 的依赖关系, 就无需亮度计, 这对于减少实验上的困难以及实现探测的实时化和自动化都是有意义的。根据数值试验的资料, 本文拟合得到了如下的近似表达

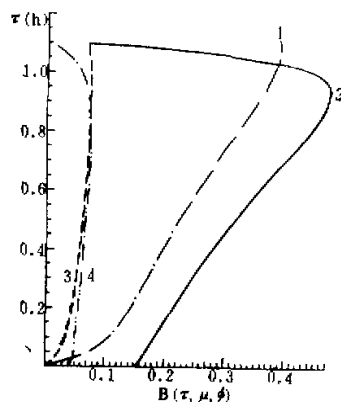


图 5 天空亮度随 $\tau(h)$ 的变化,

$$\mu_0 = 0.4374, \tau_T = 1.1.$$

- (1) $\theta = 87^\circ 20', \phi = 0^\circ$; (2) $\theta = 92^\circ, \phi = 0^\circ$; (3) $\theta = 87^\circ 20', \phi = 90^\circ$; (4) $\theta = 92^\circ, \phi = 90^\circ$

式

$$B_0/K \approx f = f_1/f_2 \quad (13)$$

其中

$$\begin{cases} f_1 = 2.6 + 11(\mu_0^{0.9} - 0.60)[1 + 0.6\exp(-100\tau_T^2\mu_0^2)]\exp[-(\tau_T/\mu_0)^{0.6}] \\ f_2 = 1 + 0.15g(1 + C_1)^6(1 - \mu_0^2)^{0.5}\exp[-(0.04\tau_T^{0.5} + 0.28\tau_T^{1.4})/\mu_0^{0.5}] \\ C_1 = 0.0466\mu_0 + \sqrt{1 - \mu_0^2}\cos\phi_0 \end{cases}$$

考虑到斜视视程随俯角的变化,可采用如下的计算公式:

$$R = \frac{1}{\sigma} \ln \left[\frac{0.955f(1 + \sin\alpha)(A_T - A_G - \varepsilon A_G)}{\varepsilon} + 1 \right] \quad (14)$$

表5表示在 $\alpha = 2^\circ 40'$, $0.1 \leq \mu_0 \leq 1$ 和 $0^\circ \leq \phi_0 \leq 360^\circ$ 的条件下,近似公式(13)的相对误差 ΔE^* 随光学厚度 τ_T 的变化。当 $\tau_T \leq 0.3$ 时,其误差可高达 69%,但当 $\tau_T \geq 1.1$ 时,其误差不超过 14%。当 $\tau_T \geq 5$ 时,公式(14)可比公式(12)具有更高的精度。机场主要关心的是低能见度情形,这时大气柱光学厚度一般比较大,公式(14)是适用的。

表5 公式(13)的相对误差 ΔE^*

τ_T	0.3	0.5	0.7	1.1	2.1	5	10	15	20
$\Delta E^*(\%)$	69	27	18	15	11	6.4	5.1	4.5	11

应用公式(14)必须确定光学厚度 τ_T ,但如图6所示,当光学厚度较大时, B_0/K 值基本上不随 τ_T 的改变而改变,约等于 2.6。因此,对于阴天或浓雾的情形下,直接取 B_0/K 为 2.6 是可行的,而无须确定 τ_T 值,这时公式(14)简化为

$$R = \frac{1}{\sigma} \ln \left[\frac{2.48(1 + \sin\alpha)(A_T - A_G - \varepsilon A_G)}{\varepsilon} + 1 \right] \quad (15)$$

对于光学厚度较小情形, τ_T 可考虑通过激光雷达的探测结果加以确定。从图6看,当 $0.5 \leq \tau_T \leq 2$ 时,假设 τ_T 具有 30% 的相对变化,除了 $\phi_0 \approx 0^\circ$ 情形, B_0/K 值的变化小于 8%,可见,公式(13)对 τ_T 的探测精度要求并不高。关于这个问题将在今后的实验中进一步的研究。

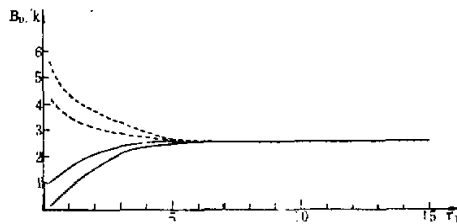


图6 B_0/K 值随 τ_T 的变化, $\mu_0 = 0.4374$ 。

- (1) $\mu = 0.115$, $\phi = 0^\circ$; (2) $\mu = 0.115$, $\phi = 90^\circ$;
(3) $\mu = 0.9908$, $\phi = 0^\circ$; (4) $\mu = 0.9908$, $\phi = 90^\circ$

四、结 束 语

数值模拟试验结果表明,斜视视程密切依赖于消光系数的空间分布、大气柱总光学厚度、太阳的高度角和方位角、目标物和背景的反照特性等。当 τ_r 较小时, R 对太阳高度角和方位角的变化很敏感,随着太阳高度角的增大斜视视程变好,当 $\phi_0 \approx 0^\circ$ 时,斜视视程较坏,当 $90^\circ \leq \phi_0 \leq 270^\circ$ 时, R 对 ϕ_0 的变化不敏感,由太阳的高度角或方位角引起的斜视视程的变化约在 3 倍范围内。当大气柱总光学厚度较大时, R 与太阳的高度角和方位角以及总光学厚度无关, R 对大气散射相函数的变化不敏感。如果消光系数不随高度改变,在 2° 至 15° 的飞机下滑角范围内,由下滑角引起的 R 的变化较小,一般不超过 15%。

根据数值实验资料,本文提出了一个新的计算斜视视程近似公式,即公式(14)。当大气柱光学厚度较大时,该公式具有较高的精度。采用该公式,可以不用亮度计系统,这对于减小实验方面的困难,实现探测的适时化和自动化都是有意义的。采用该公式,用到“朗伯反射体”的假设,且当 τ_r 较小时,必须确定 τ_r , 这些问题有待今后在实验中进一步给予研究。

参 考 文 献

- [1] 徐华刚, 1985, 气象保障与航空安全会议文集, 153—156.
- [2] 伊藤博, 1981, 航空气象, 科学出版社, 刘春达译.
- [3] 赵燕曾等, 1980, 大气科学, 168—175.
- [4] 激光在气象探测中的应用, 1973, 科学出版社.
- [5] Herman, B. M. et al., *J. Atmos. Sci.*, **37**, 1828—1839.
- [6] Duggin, M. J. et al., 1982, *Appl. Opt.*, 2833—2840.
- [7] Kondratyev, K. Ya., 1973, *Radiation Characteristics of the Atmosphere and the Earth's Surface*, Amerind New Delhi.
- [8] 激光在气象探测中的应用, 1973, 科学出版社.
- [9] 吕达仁等, 1976, 大气科学, 55—61.
- [10] Elterman, L., 1964, *Appl. Opt.*, 745—749.
- [11] Pabor, S. and M. Gros, 1970, *Tellus*, 321—326.

NUMERICAL EXPERIMENT ON SLANT VISIBILITY AND ITS CALCULATION FORMULA

Qiu Jinhuan

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

This paper studies the sensitivity of slant visibility to extinction coefficient distribution, scattering phase function, total optical depth, solar zenith and azimuth angles and reflectivity property of target and background by resolving radiative transfer equation, and according to numerical calculation data, confirms a simple approximate expression of slant visibility.