

近红外辐射在雾中衰减的研究

宋正方 韩守春

(中国科学院安徽光机所)

摘要——本文根据大气实测资料,讨论了 GaAs 近红外辐射在雾中的衰减特性。通过与同时观测的气象能见度比较,证明 GaAs 辐射的衰减与大气的能见度有密切的关系。这个结论得到了理论计算的证实。

一、引 言

砷化镓近红外辐射在大气中,尤其是在雾中的衰减是许多红外工程十分关心的问题,而且有的学者已取得一些研究的结果^[1]。我们在青岛、黄山进行了大量测试,结果表明衰减系数与大气能见度之间存在着密切的关系,可以用 Koschmieder 公式^[2]适当地描述。这个结论为其它地点或相同地点不同时间所作的测量以及根据庐山云雾资料^[3]所作的理论计算结果所证实。

二、测 量

1. 概况

整个测量装置分发射和接收两部分。发射端由发射望远镜、砷化镓发光二极管及调制、稳流电路等组成;接收端由接收望远镜、前置放大级、选频放大级、相敏检波、增益控制以及专用微计算机等组成。发射和接收望远镜为一非球面物镜,孔径 $\phi=116\text{ mm}$, 焦距 $f=177.1\text{ mm}$, 视场约为 14 mrad 。发光管的有效发射功率为 10 mW (包括光学部件的损耗)。接收端可接收到的最大有效功率为 $50\text{ }\mu\text{W}$, 接收系统的动态范围为 80 dB 。如果两端相距 100 m , 本装置可以测量透过率低至 5×10^{-5} 左右的辐射。接收信号经选频解调后送带有 A/D 转换器的专用微机进行采样,以每秒 10 次的速率采 10 秒,最后按下式

$$\mu = -\ln(I/I_0)/L \quad (1)$$

进行计算;式中, L 为两端的距离; I 为实测的信号强度; I_0 为能见度大于 40 km 时信号幅值。计算结果由打印机实时给出。

本文 1986 年 12 月 3 日收到。

测量时每2分钟(或4分钟)采样一次,目测能见度与采样同时进行,均有实验地点的气象站配合。但由于地形条件限制,无法按要求设置作为参考的适当标志,因而目测能见度的误差较大。为此,一般由两人以上来确定能见度。

实验工作先后在青岛(1985年7月),黄山(1985年9~10月)两地进行。青岛实验,主要测量了有海雾时的大气衰减。装置两端相距165m,光路下垫面为海滩。黄山实验场地选在山上的光明顶和山下的辅村。光明顶的实验距离为94m,发射端在炼丹峰顶,接收端在气象站三楼值班室;辅村实验距离为100m,光路沿一条小溪。

2. 测量结果

在青岛实验期间有两次大的海雾,时间为7月6日6:30~16:00和7月9日6:30~13:00。雾由海面飘过光路,主要呈团状,变化比较平缓。衰减系数随时间的变化由图1所示,其中虚线为实测的衰减系数,实线为由改进的 Koschmieder 公式^[2]

$$\mu = 3.912/V_M(\lambda/0.55)^{-0.585V_M^2}; \quad (2)$$

根据目测能见度 V_M (km)推算;式中, λ 为波长(μm)。由图可知,两者变化趋势相当一致,而且定量关系也比较好。

黄山实验的典型测量结果见图2。山上的雾实际为地面见到的云,浓度变化剧烈。图2中12:50~14:30因雾珠过大而形成毛毛细雨,无法测量;15:50~16:40因雾太浓以致信号中断。山下辅村测量的是早晨的辐射雾,比山上稳定得多,其衰减的程度和变化情况与青岛海雾近似。

这两次实验共取得上千个数据,大部分都有目测能见度配合。从图1、图2不难看出衰减系数与能见度的相关性相当好。全部数字的统计表明,相关系数在0.9以上。

图3比较了在不同地点或同一地点不同时间所测量的衰减系数 μ_{exp} 的平均值,其中衰减系数理论值 μ_{cal} 由公式(2)换算而得,可见这些测量结果就平均而言都很符合 Koschmieder 公式。

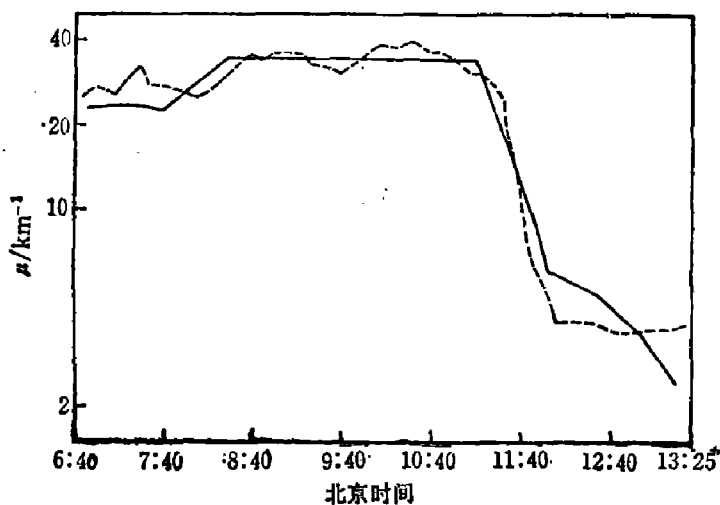


图1 青岛海雾衰减系数随时间的变化(1985年7月9日)

Fig. 1 The attenuation coefficient of sea fog as a function of time (July 9, 1985, Qingdao).

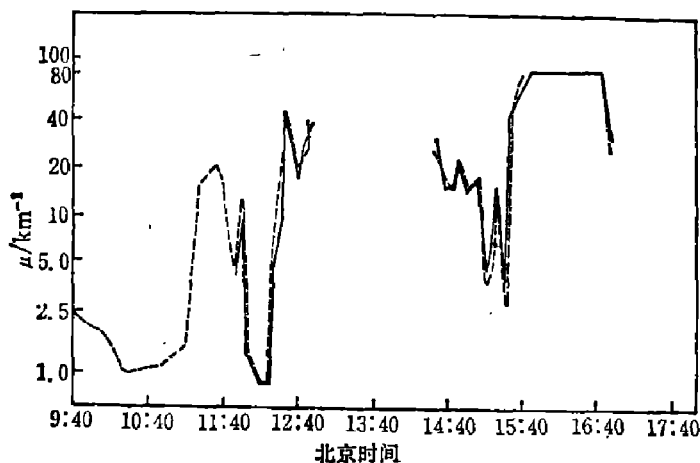


图2 黄山云雾衰减系数随时间的变化
(1985年9月27日)

Fig. 2 The attenuation coefficient of Mount Huang Shan fog as a function of time (Sept. 27, 1985)

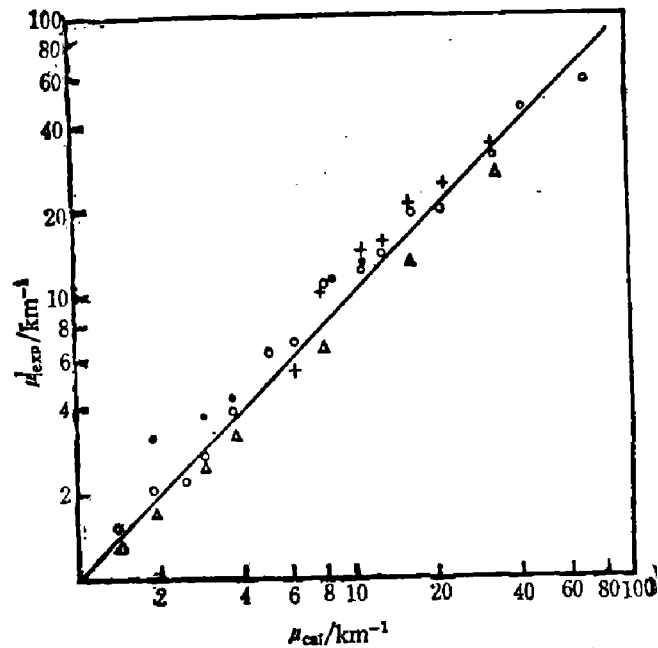


图3 衰减系数的理论与实验的比较

○—本次测量 △—Grimm^[3] ●—邓仁达等测量(1968年北京) +—王定华等测量(1975年青岛)

Fig. 3 Comparison of theoretical and experimental attenuation coefficient.

○—present measurement △—Grimm^[3] ●—Deng Renda et al., 1968, Beijing

+—Wang Dinghua et al., 1975, Qingdao

三、讨 论

为进一步说明问题,我们从理论上进行讨论。

雾对各种辐射的衰减,原则上可以根据 Mie 散射理论对一定的雾滴谱来计算,衰减系数的一般表达式为

$$\mu = \pi \times 10^{-8} \int_0^{\infty} Q_{\mu}(m, r, \lambda) n(r) r^2 dr; \quad (3)$$

式中, $Q_{\mu}(m, r, \lambda)$ 为衰减效率因子, 是复折射指数 m 、粒子半径 $r(\mu\text{m})$ 和辐射波长 $\lambda(\mu\text{m})$ 的函数; $n(r)$ 为单位体积中半径在 $r \pm \frac{1}{2} dr$ 之间的粒子数 ($\text{cm}^{-3} \mu\text{m}^{-1}$); 衰减效率因子的严格公式已由 Mie 给出, 但由于雾滴的半径一般在 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间, 其尺度系数 $x = \frac{2\pi r}{\lambda} \geq 1$, $Q_{\mu}(m, r, \lambda)$ 通常可采用 Deirmendjian^[4] 所提供的近似方法进行计算。

雾滴的尺度分布模型最常用的是 F 分布:

$$n(r) = ar^b \exp(-cr); \quad (4)$$

式中, a 、 b 和 c 为拟合参数。实际观测表明, 式(4)可以获得较好的拟合效果^[5]。在此模型下各个拟合参数能从容易测量的宏观物理量, 例如众数半径 $r_m(\mu\text{m})$ 、粒子数浓度 $N(\text{cm}^{-3})$ 和单位体积中的含水量 $W(\text{g}/\text{cm}^3)$ 等推算出来。根据这些物理量的定义和式(4)可以证明:

$$a = Ne^{(b+1)}/\Gamma(b+1); \quad (5)$$

$$c = b/r_m; \quad (6)$$

而 b 的值由下列方程给出

$$f(b) = \left(\frac{3W}{4\pi N \rho r_m^3} - 1 \right) b^3 - 6b^2 - 11b - 6; \quad (7)$$

式中, $\Gamma(x)$ 为伽马函数; ρ 为水的密度 ($1\text{g}/\text{cm}^3$)。

文献[3]非常详细地提供了庐山云雾的资料, 我们据此作了计算。计算中取 $\lambda_1 = 0.55$

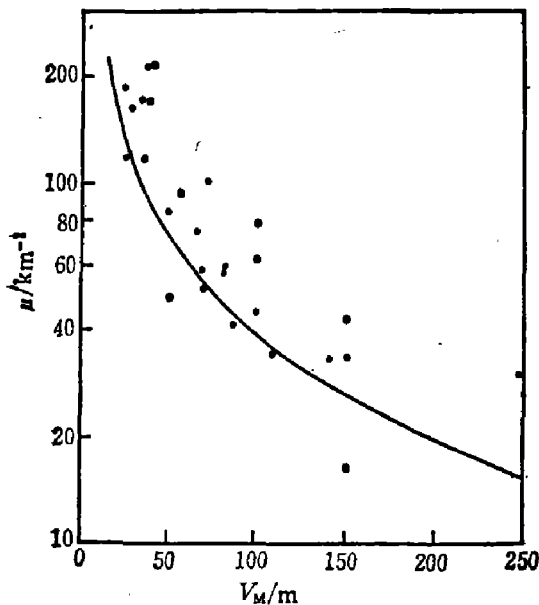


图4 衰减系数与气象能见度的关系

Fig. 4 The attenuation coefficient as a function of meteorological visibility.

μm , $\lambda_2 = 0.9\mu\text{m}$; 复折射率分别为 $m_1 = 1.332 - 1.96 \times 10^{-9}i$, $m_2 = 1.32 - 4.86 \times 10^{-7}i$ [10]。所得的结果见表1(只选择列出一半数据), 并在图4中作了 $\mu(0.55\mu\text{m})$ 计算值与实测能见度的比较, 其中曲线按式(2)计算。由该图可知, 雾滴谱虽然变化较多, 但由其衰减系数平均值说来仍比较符合 Koschmieder 公式的预计。另外, 从表1所列的两个波长上衰减系数的比值 $R = \mu(0.55)/\mu(0.9)$ 绝大部分大于 0.96 这一事实可知, 在 $0.9\mu\text{m}$ 波长上衰减系数也应符合上述结论。但应注意到, 这里的比值是个小于 1 的、变化不大的常数, 而公式(2)所预计的 R 应大于 1, 且随能见度规则变化。这显然反映了只用能见度描述雾的衰减是有其一定的局限性的。

综上所述, 我们可以得出如下的结论:

1. 雾的衰减相当严重, 当能见度小于 100m 时, $0.9\mu\text{m}$ 辐射的衰减系数可以达到 30km^{-1} 以上, 或者 1km 透过率在 10^{-13} 以下;
2. Koschmieder 公式一般说来是正确的, 作为工程应用来说, 不存在明显的问题。

表1 雾滴分布参数与衰减系数

Table 1 The parameters of fog distribution and attenuation coefficients

r_m (μm)	N (cm^{-3})	W (gcm^{-3})	a	b	c	V_M (实测) (m)	$\mu(0.55)$ (km^{-1})	$\frac{\mu(0.55)}{\mu(0.9)}$
1.75	182.9	0.76	25.7865	0.3941	0.2252	70	588.0	0.984
1.75	86.5	0.22	14.4973	0.484	0.2766	260	230.6	0.9805
1.8	686.8	0.07	976.6298	3.1724	1.7625	250	312.9	0.957
3.5	99.7	0.33	8.4924	1.1517	0.3291	110	350.6	0.9862
3.6	507.6	0.15	4.7582	13.387	3.7186	70	527.9	0.9761
3.6	574.3	0.19	11.2577	10.2853	2.857	100	633.0	0.977
3.6	97.1	0.055	6.2483	4.5774	1.2715	>200	142.2	0.9817
3.6	307.9	1.3	24.1379	1.057	0.2936	37	1173.7	0.975
5.25	144.8	0.15	0.0454	10.0836	1.9207	150	337.6	0.985
5.25	236.0	0.45	2.2923	4.1819	0.7965	65	745.2	0.97
5.4	493.2	1.9	10.4958	2.401	0.4446	40	2159.0	0.9812
5.4	492.9	1.3	6.7060	3.2974	0.6106	27	1877.1	0.9957
5.4	332.1	0.35	0.0274	11.6846	2.1638	80	790.6	0.9851
7.2	272.1	1.75	1.1515	3.2132	0.4463	30	1646.4	0.9961

致谢——王绍卿、屠瑞芳、许德政、杨高潮、胡明、闫秀芬、邵石生、刘晓春等同志参加了本文所提及的仪器研制,实验测量和数据处理等工作,致以衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Grimm E., *Feingeratetechnik*, **23**(1974), 860.
- [2] Hinkley E. D., 大气激光监测, 科学出版社, 1984, 105.
- [3] 俞香仁, 气象, (1982), 5: 24.
- [4] Deirmandjian D., *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* **86**(1960), 371.
- [5] 王庚辰, 气象学报, **39**(1981), 4: 452.
- [6] Hale G. M. and Query M. B., *Appl. opt.*, **12**(1973), 555.

ATMOSPHERIC ATTENUATION OF NEAR INFRARED RADIATION PROPAGATING THROUGH FOG

SONG ZHENGFANG HAN SHOUCUN

(*Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

In the light of the measurement data in real atmosphere, the attenuation properties of near infrared radiation of GaAs LED propagating through fog are discussed. Comparisons of the attenuation coefficient with the simultaneously observed meteorological visibility show that there is a close relationship between them. This conclusion is proved by the theoretical calculation.