

大气衰减与声雷达探测

薛 岩 周秀骥

(中国科学院大气物理研究所) (气象科学研究院)

提 要

本文计算了北京、武汉、上海和海口等四个地区月平均气候条件下声雷达回波的分子吸收衰减。结果表明,分子吸收衰减与大气环境之间的关系是非线性的,分析回波时不能忽略其衰减,但可用地面气象资料来订正。本文还计算了考虑声波衰减后,由声雷达探测得出的对流条件下的 C_2^2 廓线,与 Kaimal 等实验结果更为接近,从而给出了一个求湍流衰减的近似方法。

一、引 言

由单点声雷达回波强度的定量分析,可推算出温度脉动结构常数 C_2^2 。Haugen(1978)等^[1]与 Neff(1986)等^[2]曾把声雷达探测所得的 C_2^2 与直接测量资料进行比较。结果表明,声雷达测定值总是小于直接探测值,其差别并随高度有明显增大的趋势。如果考虑了分子吸收衰减,则到30米处,声雷达探测的 C_2^2 值与直接测量值几乎相同。但当高度达150米时,即使考虑了分子吸收,直接测量的 C_2^2 仍为声雷达推算值的1.5—3.9倍。此时,还必须考虑湍流散射的衰减效应,DeLoach(1975)^[3]与 Brown, Clifford(1976)^[4]等对此做过一些探讨。周秀骥(1987)^[5]曾普遍地推导过考虑分子吸收与湍流散射等综合衰减效应后的声雷达回波公式。

本文将应用 Sutherland^[6]的经验公式,根据北京、上海、武汉与海口四个地区的月平均气候资料,估算了这些地区分子吸收衰减的规律。并引用周秀骥所推出的声雷达回波方程,重新计算了对流条件下 C_2^2 廓线的四个例子,与 Kaimal(1976)等^[7]的结果相比较。

二、分子吸收衰减的特点

分子吸收对声波的衰减系数可由四个因子线性组合,

$$\alpha_a = \alpha_{c1} + \alpha_{rot} + \alpha_{vib}(O_2) + \alpha_{vib}(N_2) \quad (1)$$

其中右边第一、二项是由于大气分子热运动引起的对声波能量的耗散效应,第三、四项是由于“弛豫过程”,大气中 O_2 与 N_2 分子吸收声能,转化为分子内部振动能。水汽分子与 O_2 、 N_2 分子的三体碰撞对这个过程有强烈影响。根据 Sutherland 的经验公式^[6],得出:

$$\alpha_{c1} + \alpha_{rot} = 5.847 \times 10^{-10} \frac{P_0/P}{T_0/T + 2.654} f^2 (\text{分贝} \cdot \text{米}^{-1}) \quad (2)$$

$$\alpha_{vis}(O_2) + \alpha_{vis}(N_2) = \left\{ \frac{\alpha_{maxO_2}}{f_{rO_2} [1 + (\frac{f}{f_{rO_2}})^2]} + \frac{\alpha_{maxN_2}}{f_{rN_2} [1 + (\frac{f}{f_{rN_2}})^2]} \right\} \frac{2f^2}{c} (\text{分贝} \cdot \text{米}^{-1}) \quad (3)$$

式中 f 为声波频率(赫); P 为大气压强; T 为大气温度; α_{maxO_2} 与 α_{maxN_2} 为分子吸收峰值(只依赖于温度, 与水汽无关, 其值可由 Sutherland 图中读出); f_{rO_2} 与 f_{rN_2} 为吸收峰值处的频率, 它们分别是

$$f_{rO_2} = \left(24 + 44100q \frac{0.05q}{0.391 + q} \right) \frac{P/P_0}{T/T_0} (\text{赫}) \quad (4)$$

$$f_{rN_2} = (9 + 350q) \frac{P/P_0}{T/T_0} (\text{赫}) \quad (5)$$

$$q = 100 \frac{e}{P}, c = 343.15(T/T_0)^{1/2} (\text{米/秒}) \quad (6)$$

其中 q 为比湿。在室温与一个大气压下, $P = P_0 = 1013.25$ 百帕, $T = T_0 = 293K$, 则 $\alpha_{c1} + \alpha_{rot} = 1.6 \times 10^{-7} f^2$ 分贝·公里⁻¹。当频率小于3000赫时, $\alpha_{c1} + \alpha_{rot} \leq 1.44$ 分贝·公里⁻¹。因此, 在边界层探测中, 其衰减的影响可以忽略, 主要是 $\alpha_{vis}(O_2) + \alpha_{vis}(N_2)$ 起作用。

应用以上计算公式以及《中国高空气候资料1960—1969年压、温、湿》中的资料, 估算了北京、上海、汉口与海口四个地区月平均气候条件下的分子吸收衰减因子值, 其结果分别见图(1a)—(1d)。计算时, 温度剖面采用线性插值求得, 湿度剖面取经验公式 $e = e_0 10^{-z/\beta}$ 来拟合, 其中 β 为可调参数。

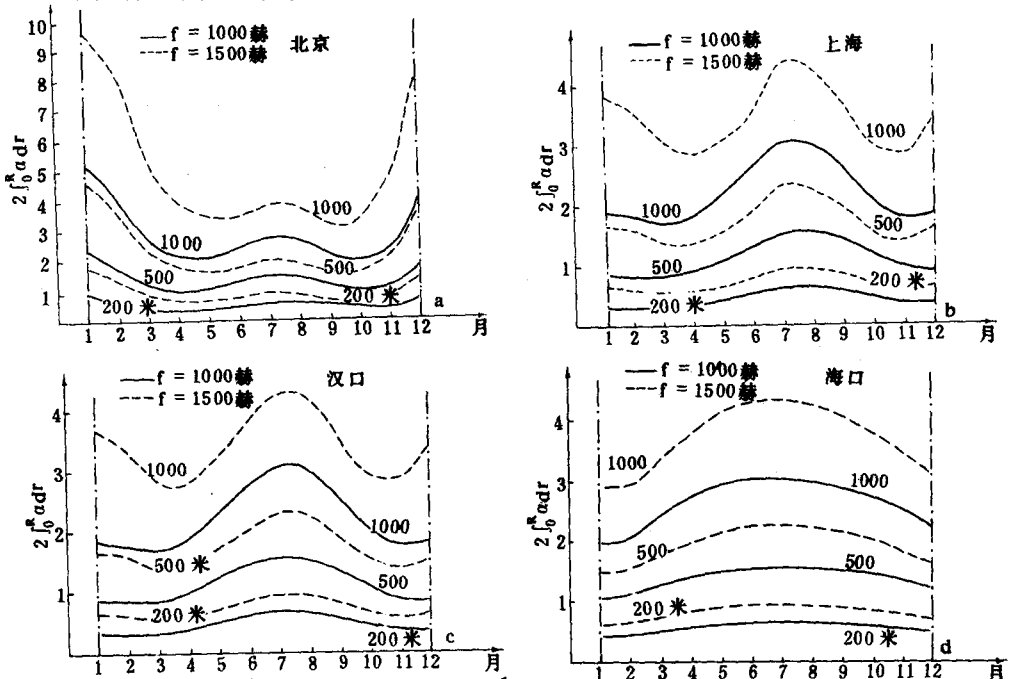


图1 月平均分子吸收衰减因子 ($2 \int_0^R \alpha dr$) (图中曲线上的数值均为 R 的值)

由图可以计算出,北京地区冬季的分子吸收衰减为最大。在1月份,200米时的衰减因子高达2.72。而春、秋季节的衰减为最小。

上海与汉口地区的分子吸收衰减情况非常相似。与北京地区相比,该两地区的分子吸收衰减值要低。冬季北京地区值为该两地区值的两倍多,夏季这三个地区的差别不大。此外,该两地区分子吸收衰减的特点是:在低层,夏季的值最高,冬季时最低,随着频率与高度增加,冬季的衰减值增大。

海口地区分子吸收衰减的情况与上海、汉口地区大致相当,但其四季的变化比较平缓,而夏季的衰减值偏高。

根据上述结果,分子吸收衰减对声雷达信号的影响是不能忽略的,而且与大气温度和湿度的关系是非线性的。且可看出,分子吸收衰减随高度的变化并不显著,可以根据地面的气象资料做出比较好的估算,并对分子吸收衰减效应进行订正。

三、大气衰减对探测 C_T^2 的影响

我们曾指出过^[5],除了分子吸收以外,湍流散射也引起明显的衰减效应,其衰减系数 α_s 是

$$\alpha_s = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sigma_s \sin\theta d\theta d\varphi \quad (7)$$

式中 σ_s 是散射角 θ 处的散射系数。取湍流谱为

$$\Phi_m(K) = \begin{cases} \xi K^n & K \leq K_0 = \frac{2\pi}{L_0} \\ 0.033C_m^2 (K^2 + \frac{1}{L_0^2})^{-11/6} e^{-K^2/K_m^2} & K \geq K_0 = \frac{2\pi}{L_0} \end{cases} \quad (8)$$

其中 L_0 为湍流外尺度,要使(7)式积分有限必须有 $n > -2$ 。不难推得,

$$\alpha_s = 0.066\pi k^{1/2} M \frac{C_V^2}{c^2} + 2\pi N \sigma_n \quad (9)$$

而

$$M = \int_0^\delta \cos^2 \frac{\theta}{2} \cos^2 \theta \left(\sin^2 \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4k^2 L_0^2} \right)^{-11/6} e^{-4k^2/K_m^2 \sin^2 \theta/2} \sin\theta d\theta \\ + \int_\delta^\pi \cos^2 \frac{\theta}{2} \cos^2 \theta \left(\sin^2 \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4k^2 L_0^2} \right)^{-11/6} e^{-4k^2/K_m^2 \sin^2 \theta/2} \sin\theta d\theta \quad (10)$$

$$N = \int_0^\delta \cos^2 \theta \left[\sin^2 \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4k^2 L_0^2} \right]^{-11/6} e^{-4k^2/K_m^2 \sin^2 \theta/2} \sin\theta d\theta \\ + \int_\delta^\pi \cos^2 \theta \left[\sin^2 \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4k^2 L_0^2} \right]^{-11/6} e^{-4k^2/K_m^2 \sin^2 \theta/2} \sin\theta d\theta \quad (11)$$

式中 $\delta = 2\sin^{-1} \frac{\pi}{kL_0}$ 。可以证明,(10)与(11)式右边第一项值很小,可以忽略不计。此外,在声波范围, $e^{-4k^2/K_m^2 \sin^2 \theta/2} \approx 1$ 。因此,(10)和(11)可近似为

$$M \approx N \approx 0.35(kL_0)^{5/6} \quad (12)$$

则

$$\alpha_s = 1.546k^2 K_0^{-3/2} \left(\frac{C_T^2}{c^2} + 0.13 \frac{C_T^2}{T^2} \right) \quad (13)$$

由此,完整的声雷达方程是

$$P(R) = \frac{\eta}{R^2} e^{-2 \int_R^0 [\alpha_s + \alpha_{su} + 2\pi N \sigma_\pi] dr} \sigma_\pi(R) \quad (14)$$

其中 η 为声雷达系统常数。从上式不难解得声波后向散射截面为

$$\sigma_\pi(R) = \frac{R^2 P(R) e^{2 \int_R^0 [\alpha_s + \alpha_{su}] dr}}{\eta - 4\pi N \int_0^R r^2 P(r) e^{2 \int_0^r [\alpha_s + \alpha_{su}] dr} dr} \quad (15)$$

式中 $\alpha_{su} = 0.066\pi k^2 M \frac{C_T^2}{c^2}$ 是由风速脉动引起的声波衰减, C_T^2 是风速脉动结构常数。

如果不考虑任何衰减,由声回波得到的后向散射截面则为

$$\sigma'_\pi(R) = \frac{R^2 P(R)}{\eta} \quad (16)$$

其各自对应的温度结构常数 C_T^2 与 $C_T'^2$ 有下列关系,

$$C_T^2 = \frac{e^{2\alpha_s R} e^{2 \int_0^R \alpha_{su} dr}}{1 - 4\pi A_0 \int_0^R N C_T'^2 e^{2\alpha_s r} e^{2 \int_0^r \alpha_{su} dr} dr} C_T'^2 \quad (17)$$

其中 $A_0 = 0.0043k^2/T^2$ 。

四、对流条件下的 C_T^2 廓线

在自由对流条件下,层结不稳定,湍流发展比较充分,局地均匀各向同性的假设成立。因此,下面选取四个在对流条件下声雷达探测的例子来讨论湍流衰减的影响。

在自由对流条件下, C_T^2 随高度以负 $3/2$ 次幂规律衰减, Wyngaard^[8] 得出公式是

$$C_T^2 = 2.66(T/g)^{3/2} Q_0^2 Z^{-3/2} \quad (18)$$

式中 Q_0 为地面感热流,应用 C_T^2 廓线,可以从上式中推算出 Q_0 。

此外, Kaimal 等在明尼苏达观测试验中,得出陆上自由对流条件下的公式^[7]是,

$$\frac{C_T^2}{\theta_*^2 Z_i^{3/2}} = \begin{cases} 2.66(Z/Z_i)^{-3/2} & Z \leq 0.5Z_i \\ 6.72 & 0.5Z_i < Z \leq 0.7Z_i \\ 19.52(Z/Z_i)^3 & 0.7Z_i < Z \leq Z_i \end{cases} \quad (19)$$

$$\frac{C_T^2}{W_*^2 Z_i^{-3/2}} = \begin{cases} 1.3 + 0.1(Z/Z_i)^{-3/2} & 0.01Z_i \leq Z \leq 0.1Z_i \\ 1.5 & Z \geq 0.1Z_i \end{cases} \quad (20)$$

式中 W_* 与 θ_* 分别是混合层速度和温度尺度标量

$$W_* = \left(\frac{g}{T} Q_0 Z_i \right)^{1/2} \quad (21)$$

$$\theta_* = Q_0 / W_* \quad (22)$$

Z_i 是混合层深度,一般取最低的逆温层底部的高度为 Z_i 。

图2a中实线是陈炎涓等^[9]在1984年北京地区根据声雷达资料估算出来的 C_T^2 廓线,他们没有考虑大气的衰减效应。由于近地面资料不足,对 $Z < 100$ 米的 C_T^2 廓线,我们取 $Z = 100$ 米和 $Z = 48$ 米两点的线性插值代表,如图2a中虚线所示。图中实点是考虑大气分子吸

收影响订正以后的结果 $C_T^2(Z)$ 。可以看出, $Z < 100$ 米时, C_T^2 廓线更符合理论的 $Z^{-1.73}$ 幂规律。图2b是将图2a进行归一化后的结果, 取 $Z_i = 200$ 米。由此可见, $Z < 0.5Z_i$ 时, C_T^2 廓线更符合 Kaimal 的结果。

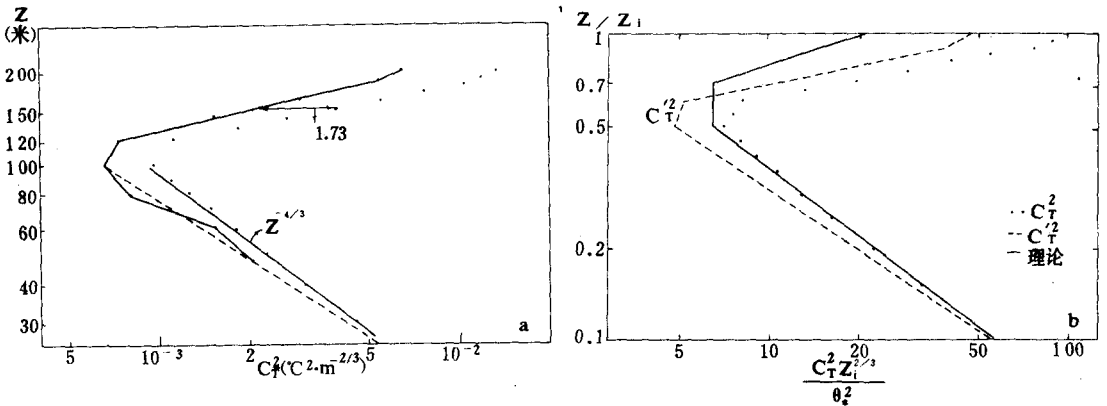


图2 (a)对陈炎涓等观测结果的修正 (b)对陈炎涓等观测结果的修正并与理论值比较

我们又取了 Neff 的观测分析结果^[10]来做比较。Neff 在分析其声雷达回波资料时, 只对大气分子吸收作了订正, 没有考虑湍流散射衰减的影响。图3a中的虚线是 Neff 在 09:00—09:50时的观测结果 C_T^2 , 实点是考虑湍流衰减订正后的 C_T^2 , 其值由下式确定,

$$C_T^2 = \frac{e^2 \int_0^R c_0 N c_v^2 dr}{1 - 4\pi A_0 \int_0^R N C_T^2 e^2 \int_0^r c_0 N c_v^2 dr} C_T^2 \quad (23)$$

式中 $C_0 = 0.066\pi k^{1/3}/c^2$, $N = 0.35(kL_0)^{2/3}$ 。在 $Z < 30$ 米时, 外尺度为 L_{01} , 而在 $Z > 30$ 米时, 外尺度选为 L_{02} , 其具体数值见图所示。图3b是将图3a归一化后的结果, Z_i 取为400米。由此图可以看出, 经过湍流衰减订正后求出的 $C_T^2(Z)$ 与 Kaimal 理论公式更为一致。但利用 Neff 其它时刻(07:30—08:20和08:25—09:00)的观测结果来比较, 其符合程度在 $Z/Z_i > 0.5$ 时也不太理想(图略)。值得注意的是, 当令 $C_T^2 = 0$ 时, 求得的 C_T^2 与 C_T^2 非常接近, 说明 C_T^2 对湍流衰减的贡献不容忽视。

对 Neff 三个时段(07:30—08:20, 08:25—09:00, 09:00—09:50)观测结果计算得到, 在 $Z = 150$ 米处, 湍流衰减因子值分别为1.38, 1.58与3.34, 这结果与 Haugen 的结论相似。从图2a中可以得出, $Z = 150$ 米处的分子吸收衰减因子为1.73, 与湍流衰减因子数值相当, 这与 Deloach 的结论相吻合。因此, 在用声雷达探测 C_T^2 时, 分子吸收衰减与湍流散射衰减都必须同时予以考虑。

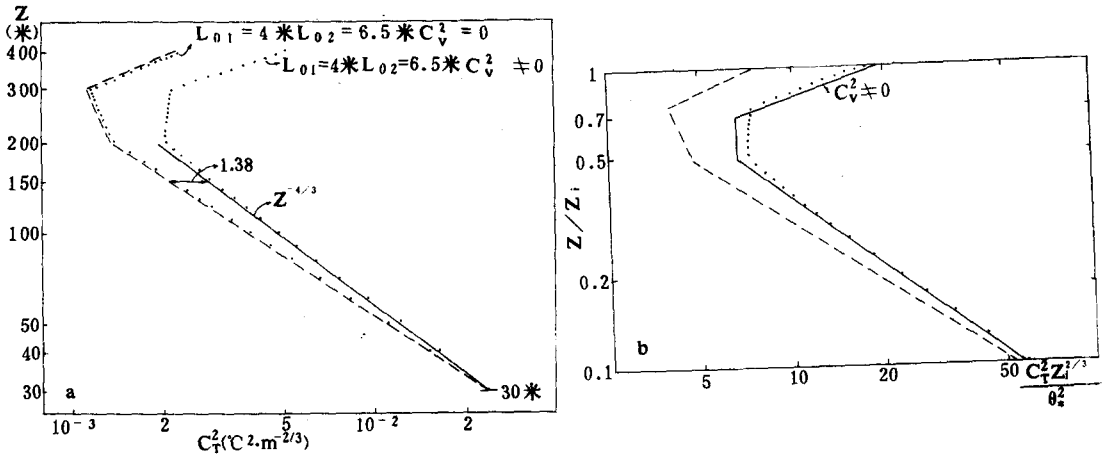


图3 (a)湍流衰减对观测结果的影响
 (b)对图3a进行归一化处理后的结果并与 Kaimal 理论公式比较

五、小 结

通过上述分析讨论,可以得出以下几点初步结论:

- (1)分子吸收衰减和湍流散射衰减对声雷达探测分析有重要影响,必须予以考虑。
- (2)分子吸收衰减与大气温度和湿度之间的关系是非线性的,可以利用地面气象资料对声雷达边界层探测资料中分子衰减做订正。
- (3)推出了完整的声雷达探测方程,其对湍流散射衰减影响的订正与边界层湍流结构有密切关系。

参 考 文 献

- [1] Haugen, D. A., Kaimal, J. C., *J. Appl. Meteor.*, 17, 6, 895—899, 1978.
- [2] Neff, W. D., Coultres, R. L., *Acoustic Remote Sensing, Probing the Atmospheric Boundary Layer*, American Meteorological Society, Boston, 1986.
- [3] Deloach, R., *On the excess attenuation of sound in the atmosphere*, NAST, TN-D-7823, 1975.
- [4] Brown, E. H., Clifford, S. F., *J. Acoust. Soc. Amer.*, 60, 788—794, 1976.
- [5] 周秀骥, 科学通报, 第18期, 1400—1401, 1987.
- [6] Sutherland, L. C., *Review of experimental data in support of a proposed new method for computing atmospheric absorption losses*, Rep. TST-75-87, Dept. of Transp., Washington D. C., 1975.
- [7] Kaimal, J. C., Wyngaard, J. C., Haugen, D. A., *J. Atmos. Sci.*, 33, 2152—2169, 1976.
- [8] Wyngaard, J. C., Izumi, Y. and Collins, S. A., *J. Opt. Soc. Amer.*, 61, 1646—1650, 1971.
- [9] 陈炎涓, 大气科学, 8, 66—74, 1984.
- [10] Neff, W. D., *Quantitative evaluation of acoustic echos from the planetary boundary layer*, Tech. Rep. ERL, 322—WPL38, 34pp, 1975.

ATTENUATION OF SOUND AND ATMOSPHERIC SOUNDING

Xue Yan

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Zhou Xiuji

(Academy of Meteorological Science, AMS)

Abstract

The attenuations of sound by molecular absorption (ASMA) in the mean monthly climatic fields of Beijing, Wuhan, Shanghai and Hankou cities are calculated. The results show that ASMA have complicated nonlinear relation with atmospheric temperature and moisture, and they should not be ignored in the detection of turbulent structure coefficient of mixing layer by acoustic radar, but it can be estimated with the surface meteorological data.

An approximative method of calculating the attenuations of sound by turbulence is given. When both the attenuations of sound by molecular absorption and turbulence are considered, the magnitude of C_T^2 in unstable conditions obtained from echosonde is more close to the observations from Kaimal et al. .