

大气湍流对遥感系统图象分辨率的影响

宋正方

(中国科学院安徽光机所)

摘要——利用到达角的概念, 根据由实验资料建立起来的湍流垂直分布模式推导了地面极限分辨率的分析表达式。讨论了某些系统通过大气下视的分辨率。结果表明, 一般情况下湍流对遥感系统的地面极限分辨率的影响可以忽略不计, 但在强湍流的情况下, 当使用的高度大约在十公里以下时, 湍流可能成为高分辨率系统的一个限制因素。

一、前言

近年来, 空间科学日益受到重视, 地球资源的遥感由于与国民经济的发展密切相关而得到蓬勃的发展。为了获得更多的和更正确的信息, 对遥感系统的空间分辨率提出了更高的要求。采用高性能部件, 并进行精心设计, 固然可能达到上述目的, 但是, 另外一个不可忽视的因素是, 大气湍流的存在可能对遥感系统造成一定的影响。过去曾有人对此作过研究。Hufnagel 与 Stanley^[1] 利用无限平面波调制传递函数讨论过这个问题, 而 Fried^[2] 则从球面波的波结构函数出发处理了这个问题。然而, 遗憾的是他们所依据的湍流强度的高度分布模式已作了多次修改^[3], 而且也与后来的大部分测量资料相矛盾, 因此其结论自然值得商榷。此外, 这两个工作都没有考虑系统本身的性能, 湍流究竟起多大作用显然难以肯定。

我们认为, 湍流大气对遥感系统空间分辨率的影响, 也可归因于光波在光学系统平面上的到达角(入射角)起伏, 由此导致图象模糊, 降低了遥感系统的分辨本领。下面我们将湍流的影响和系统本身的分辨率结合起来分析, 并尝试使用到达角起伏的概念来处理, 对拟定的湍流模式求解, 最后对所给出的结果进行讨论。

二、基本公式

最常用的空间遥感系统就是相机, 我们就以此为例进行讨论, 而其结论无疑适用于其他类型的图象遥感系统。

设给定的空间摄影系统具有的地面分辨率为^[4]:

$$R_0 = z/f \cdot n, \quad (1)$$

本文 1982 年 4 月 26 日收到。

其中 z 为拍摄高度, 单位为 m ; f 为相机的焦距, 单位为 mm ; n 为该系系统由光学镜头和胶片决定的分辨本领, 以 $1/mm$ 计算。

当存在湍流扰动时, 将会产生附加的湍流项 R_T 。该项为随机量, 因而总的地面分辨率应为:

$$R = [R_0^2 + R_T^2]^{1/2} \quad (2)$$

下面推导 R_T 的计算公式。设在高度 z 处垂直向下对准地面上的点 A , 在相机焦平面处形成对应的点 A' (图 1)。由于大气湍流扰动, 使光线入射到相机平面的角度 (到达角) 随机变化。设某一时刻的到达角为 α , 象点将位于 B' 处。在一定曝光时间内象点将成为一个以 $l = \sigma_\alpha f$ 为半径的模糊圆 (σ_α 为到达角 α 的均方根值), 因此对应于地面的极限分辨率应为:

$$R_T = 2\sigma_\alpha z \quad (3)$$

根据光波在湍流大气中传播的理论^[5], 到达角起伏的均方值可由下式求出:

$$\sigma_\alpha^2 = D_\phi(\rho) / k^2 \rho^3 \quad (4)$$

其中, $D_\phi(\rho)$ 称为相位结构函数; ρ 为相机的通光口径; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数。对于空间摄影而言, 地面目标的每一单元相当于一个点光源, 由地面至空间向上传播。这时 D_ϕ 的理论公式为^[6]:

$$D_\phi(\rho) = \begin{cases} \frac{2.914}{1.457} \left\{ \frac{k^2 \rho^{5/3}}{\cos \theta} \int_0^z C_n^2(h) \left(\frac{h}{z}\right)^{5/3} dh, & (\rho \gg \sqrt{\lambda z}) \\ l_0 \ll \rho \ll \sqrt{\lambda z}, & \end{cases} \quad (5)$$

其中, $C_n^2(h)$ 为折射率结构常数, 是高度 h 的函数; θ 为天顶距; l_0 为湍流内尺度, 它的数值在地面附近约为 $1 \sim 2 mm$, 到对流顶处增加到 $1 cm$ 左右。

将式(5)与(4)代入式(3), 即可得到 R_T 的表达式:

$$R_T = \begin{cases} \frac{3.414}{2.414} \left\{ \frac{\rho^{-1/6} z^{1/6}}{(\cos \theta)^{1/2}} \left[\int_0^z C_n^2(h) h^{5/3} dh \right]^{1/2}, & (\rho \gg \sqrt{\lambda z}) \\ l_0 \ll \rho \ll \sqrt{\lambda z}. & \end{cases} \quad (6)$$

上式表明, 湍流对图象分辨率的影响与波长无关, 因此式(6)对于从可见光直至红外的任何遥感系统都是适用的。如果已知湍流强度的分布规律, 上述积分不难求出。

三、湍流模式

湍流强度随高度分布的规律是研究光波在地面与空间之间传输的一项重要课题。人们曾利用铁塔、飞机和汽球等运载工具携带感应元件进行了直接或间接的测量^[7]。这三种方法各有利弊。铁塔可以进行经常性观测, 但高度有限, 一般不超过 $300 \sim 500 m$; 飞机和汽球可以升到适当的高度, 但代价颇大, 不可能经常观测。因此有人利用星光抖动^[8]、星光闪烁^[9]等资料来推算。

尽管直接观测有很多困难, 但最近几年来已积累了不少资料^[7, 8, 10~13]。这些资料表明, 晴空湍流具有分层结构, 各层的厚度约 $100 \sim 200 m$, 其强度随时随地而异, 不过总的趋势是随高度的增加而减弱。此外, 尚有随季节、昼夜的变化。如此复杂多变的湍流状态给建立湍流

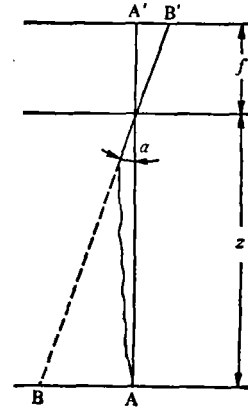


图 1 计算 R_T 的示意图

模式带来了巨大的困难。然而,从理论研究和工程设计的观点来看,重要的是了解其平均状态,而非现场的状态,因此建立一个能反映湍流分布总趋势的某种数学模式是很有价值的。

我们对各种测量资料进行了分析比较,发现它们之间尽管测量的方法、地点、时间和结果互不相同,却可以看出存在下述两个重要特点(参见图2):

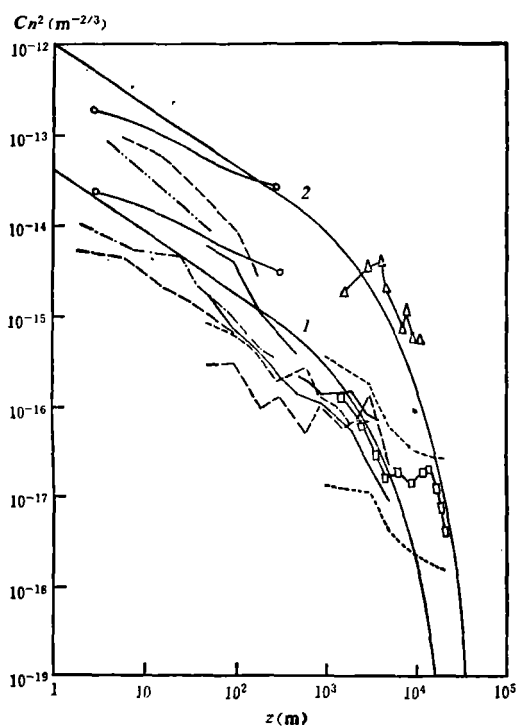


图2 湍流分布模式

曲线: 1— $C_n^2 = 4 \times 10^{-14} h^{-2/3} e^{-h/2500}$;

2— $C_n^2 = 10^{-12} h^{-2/3} e^{-h/4000}$

数据: ●, ○, △和□分别引自[7]、[10]、[11]和[13]

与文献[14]利用星光所测的结果很一致。后者与分别在三个不同地点由星光闪烁算得的值^[9]很接近。上述工作都是在夜间进行的,而夜间的湍流是不强的。这个事实似乎意味着我们的第一个模式大致代表夜间的或中等湍流强度情况下的湍流分布。

较强的湍流通常出现在白天。根据我们在近地面的观测资料,一般情况下除清晨和黄昏外,平均说来白天要比深夜大一、二个量级,铁塔观测资料^[7]也表明存在上述差异。在季节方面,夏秋和冬春也可以相差一个数量级^[11]。故此我们有理由相信,式(8)能反映较强的湍流强度分布。

1. 在低空, C_n^2 随高度的增加基本上按一定的幂次减弱。从总的趋势来看,比较符合 Татарский^[5]的理论分析,即按“-2/3”规律减弱。

2. 在一定高度以上, C_n^2 按负指数规律急剧下降。虽然对流顶处存在强度增加的现象,但增加的程度并不都是很大的^[13]。

根据上述特点,我们拟定了两个可能概括不同状态的模式:

$$1. C_n^2 = 4 \times 10^{-14} h^{-2/3} e^{-h/2500}; \quad (7)$$

$$2. C_n^2 = 10^{-12} h^{-2/3} e^{-h/4000}. \quad (8)$$

其中 2500 和 4000 为特征高度 H_0 。

为了检验这两个模式的适用性,我们来计算下列两个特征量:

$$I_1 = \int_0^{\infty} C_n^2(h) dh, \quad (9)$$

$$I_2 = \int_0^{\infty} C_n^2(h) h^{5/6} dh, \quad (10)$$

I_1 表征整层大气的积分湍流强度, I_2 是用以计算通过整层大气的星光闪烁的特征量。

把式(7)代入式(9)和(10), 得到 $I_1 = 1.46 \times 10^{-12} m^{1/3}$, $I_2 = 3.42 \times 10^{-10} m^{7/6}$ 。前者

四、计算结果

把式(7)和(8)代入式(6), 并利用积分公式:

$$\int_0^u X^{a-1} e^{-bX} dX = b^{-a} [\Gamma(a) - \Gamma(a, bu)], \quad (11)$$

和

$$\Gamma(1+n, X) = n! e^{-X} \sum_{m=0}^n \frac{X^m}{m!}, \quad (12)$$

求得大气湍流导致的地面分辨率 R_T 的最终分析表达式:

1. 对于中等湍流情况,

$$R_T = \left\{ \begin{array}{l} 1.707 \\ 1.207 \end{array} \right\} \times 10^{-3} \frac{\rho^{-1/6} z^{1/6}}{(\cos \theta)^{1/2}} [1 - e^{-z/2500} (1 + z/2500)]^{1/2}, \quad \begin{array}{l} (\rho \gg \sqrt{\lambda z}) \\ (l_0 \ll \rho \ll \sqrt{\lambda z}) \end{array} \quad (13)$$

2. 对于较强湍流情况,

$$R_T = \left\{ \begin{array}{l} 1.366 \\ 0.966 \end{array} \right\} \times 10^{-3} \frac{\rho^{-1/6} z^{1/6}}{(\cos \theta)^{1/2}} [1 - e^{-z/4000} \times (1 + z/4000)]^{1/2}, \quad \begin{array}{l} (\rho \gg \sqrt{\lambda z}) \\ (l_0 \ll \rho \ll \sqrt{\lambda z}) \end{array} \quad (14)$$

上述公式表明, 地面极限分辨率 R_T 强烈地依赖于湍流分布规律, 而且同口径的 $1/6$ 次方成反比。至于 R_T 同高度的依赖关系可从上述公式得知, 在 $z \gg H_0$ 和 $z \ll H_0$ (H_0 为特征高度) 的极限情况下, 分别与 z 的 $1/6$ 次方和 $7/6$ 次方成正比。

我们针对多光谱相机常用的口径 ($\phi \approx 50$ mm) 和 $\theta = 0$ 的情况作了计算, 结果由图 3 表示。其中曲线 1 和 2 分别按式 (13) 和 (14) 计算得到, 实线为 $\rho \gg \sqrt{\lambda z}$ 的情况, 虚线为 $l_0 \ll \rho \ll \sqrt{\lambda z}$ 的情况。由图可知, 在一般情况下, 100 km 处的地面极限分辨率 R_T 约为 1~2 cm, 而当湍流较强时, R_T 将增大为十多个厘米。

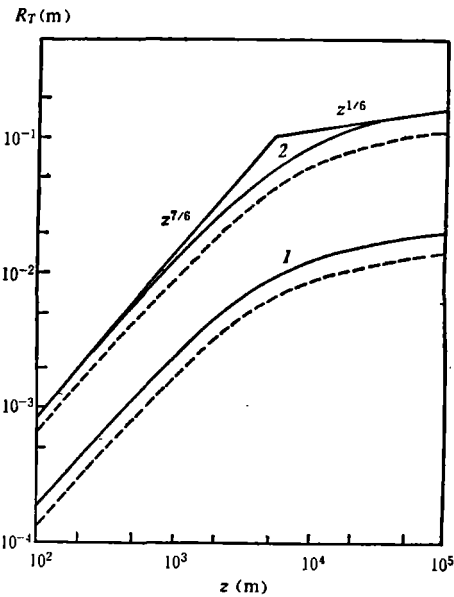


图 3 R_T 与高度的关系

五、讨 论

现在我们来进一步讨论空间遥感系统在湍流大气中总的地面分辨率与高度的关系。首先考虑下述三种情况:

1. 在 $n = 20$ l/mm 情况下, S190A 型航空相机的分辨率 ($f = 150$ mm, $\rho = 42$ mm);
2. n 值相同, 但具有较长的焦距和较大的接收口径 ($f = 460$ mm, $\rho = 200$ mm);
3. 高分辨率情况, 其中参数为设计时可供选择的数值 ($n = 100$ l/mm, $f = 1$ m, $\rho = 200$ mm)。

这三种情况下的 R_0 值分别见图 4 中的曲线 1~3。至于总的分辨率 R , 我们仅对较强湍流和高分辨率情况作了计算, 见曲线 4 和 5, 其中分别设 $\rho = 200$ mm 和 42 mm。

对图 3 和图 4 作一番比较, 不难看出, 在普通分辨率场合下, 无论湍流强弱, 从低空到高空, 系统本身的分辨率是决定性因素, 湍流的影响完全可以不加考虑。在高分辨率系统中, 一般情况下, 湍流的作用也能忽略不计, 但在湍流较强时, 低空 (约到 10~20 km, 视通光口径而定) 的 R_T 具有和 R_0 相近的数值, 从而增大了分辨率, 或者说降低了分辨本领。例如, 在

$z=2\text{ km}$ 时, 使用较小的口径, 分辨本领为 100 l/mm 的相机实际的等效分辨本领仅为 64 l/mm , 而使用较大的口径时, 等效分辨本领也降到 81 l/mm 。到了高空 ($z>30\sim 40\text{ km}$), 湍流的作用相对来说大大减弱, 地面极限分辨率再次取决于系统本身的参数。

我们迄今讨论的是 $\theta=0$ 的情况, 如果相机摄取天顶距为 θ 的目标, 则实际的地面分辨率不能直接引用图 4 的结果, 必须计入 $\sec\theta$ 这个因子。

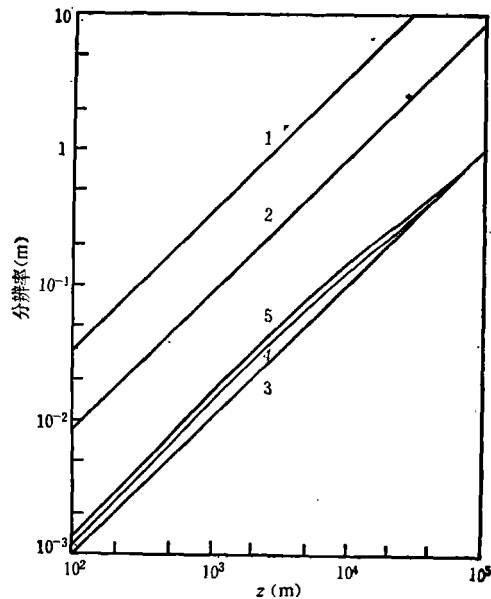


图 4 地面极限分辨率与高度的关系

六、结 束 语

我们首先引入到达角的概念来考虑大气湍流对遥感系统图象分辨率的影响, 并根据许多实验资料拟定了两个分别适用于不同情况的湍流分布模式, 结合相机的参数具体计算了实际的地面极限分辨率。结果表明, 一般情况下, 在计算遥感系统的地面极限分辨率时, 可以不考虑湍流的影响, 起决定作用的是系统本身的参数, 但在湍流较为强烈时, 将会限制高分辨率系统在低空中使用, 或者说, 较强的湍流最终将限制低空遥感系统分辨率的提高。

参 考 文 献

- [1] Hufnagel R. E. & Stanley N. R., *J. Opt. Soc. Am.*, **54**(1964), 52.
- [2] Fried D. L., *J. Opt. Soc. Am.*, **56**(1966), 1380.
- [3] Clifford S. F., *Laser Beam Propagation in the Atmosphere* (Strohbehn J. W. Ed.), Springer-Verlag, 1978.
- [4] 吕斯骅, 遥感物理基础, 商务印书馆, 1981.
- [5] Татарский В. И., 湍流大气中波的传播理论(中译本), 科学出版社, 1978.
- [6] Kerr J. R. et al., *Proc. IEEE*, **58**(1970), 1691.
- [7] Гурвич А. С. и др., *Лазерное Излучение в Турбулентной Атмосфере*, Наука, 1976.
- [8] Bufton J. L., *Appl. Opt.*, **12**(1973), 1785.
- [9] Hulett H. R., *J. Opt. Soc. Am.*, **57**(1967), 1335.
- [10] Subramanian M., *J. Opt. Soc. Am.*, **62**(1972), 677.

- [11] Morris G. J., *J. Opt. Soc. Am.*, **63**(1973), 263.
- [12] Barletti R. et al., *J. Opt. Soc. Am.*, **66**(1976), 1380.
- [13] Bufton J. L. et al., *J. Opt. Soc. Am.*, **62**(1972), 1068.
- [14] Roddier C. & Vemin J., *Appl. Opt.*, **16**(1977), 2252.

EFFECTS OF ATMOSPHERIC TURBULENCE ON THE IMAGE RESOLUTION OF REMOTE SENSING SYSTEMS

Song Zhengfang

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

ABSTRACT

On the basis of the turbulent profile model which is established by experimental data, the author derives the analytical forms of the limiting ground resolution by the concept of angle-of-arrival. The results indicate that the effects of atmospheric turbulence on the limiting ground resolution of remote sensing systems can be neglected generally. However, in the case of strong turbulence, it would become a limiting factor for high resolution systems when they are used at some altitude of less than 10 km or so.