

文章编号: 1001-5078 (2006) 03-0168-03

论红外系统距离方程中大气透过率对距离的影响

张孝霖

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要: 文中指出: 红外系统距离方程中, 大气透过率本身就是随距离 R 迅速变化的函数, 从而将红外系统的距离方程改写为更加准确的表达形式。根据这一事实, 文中提出了对求解 R 的结果是否正确判断的准则, 并给出了求解距离 R 的正确方法。

关键词: 红外系统; 距离方程; 大气透过率函数 $\tau_a(R)$; 距离 R 的正确解法

中图分类号: TN219; P225. 2 **文献标识码:** A

On the Atmospheric Transmittance τ_a in the Range Equation of IR Systems and the Correct Solution of Range R

ZHANG Xiao-lin

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: In this paper, it is indicated that in the range equation of IR systems, the atmospheric transmittance τ_a itself is a rapidly varying function of range R , therefore, the range equation of IR systems is modified into a more exact expression. Based on this fact, the criterion of judging whether the solutions of R are correct or not is suggested, and the correct methods of solving the range R are given.

Key words: IR system; range equation; atmospheric transmittance function $\tau_a(R)$; correct methods of solving the range R

1 红外系统距离方程的准确表达式

如所周知, 红外系统基本的距离方程如下^[1],

$$R = \left[\frac{D_o \tau_a D^*}{4F(SNR) (\frac{f}{\lambda})^{1/2}} \right]^{1/2} (I_t)^{1/2} \quad (1)$$

式中, D_o 是系统入射光瞳孔径 (cm); τ_a 是光学系统效率; F 是光学系统 F 数; SNR 是保证必须探测概率所要求的信噪比; Ω 是系统立体角瞬时视场 (sr); f 是系统电子带宽 (Hz); λ 是红外系统响应的波长范围 (μm); D^* 是在 λ 波长范围内红外探测器的平均探测度 ($\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$); τ_a 是在 λ 波长范围内的大气透过率平均值; I_t 是在 λ 波长范围内温度为 T 的目标辐射强度 (W/sr)。在具体计算目标的辐射强度时, 有:

$$I_t = A_T L_T \quad (2)$$

其中, A_T 是目标在视轴垂直面上的投影面积 (cm^2); L_T 是 λ 波长范围内温度为 T 的目标辐射亮度 ($\text{W}/\text{cm}^2 \text{sr}$)。

对距离方程还有不少改进, 有关文献很多, 比如文献 [2-4] 等, 但是都没有涉及方程中大气透过率 τ_a 这一重要因子。由于本文重点论述 τ_a 及其对方程的影响, 在此不讨论方程的其它改进问题。从以

下的论述清楚可见, τ_a 对 R 的计算与有关讨论有特别重要的意义。

既然 τ_a 是随 R 迅速变化的函数, 自然应将方程 (1) 改写为如下更为准确的表达形式, 即:

$$R = (C)^{1/2} (I)^{1/2} [\tau_a(R)]^{1/2} \quad (3)$$

将距离方程改写成式 (3) 的形式还便于将方程中各参数分类并利于进一步的讨论。其中,

$$C = \frac{D_o \tau_a D^*}{4F(SNR) (\frac{f}{\lambda})^{1/2}} \quad (4)$$

方程 (3) 右端三项因子的物理意义简单而明确, C 代表系统综合参数, I 代表目标参数, $\tau_a(R)$ 代表大气衰减效应。新的方程表明: τ_a 不能简单地等同于 C 或 C 中的任何参数, 它不是常数, 而是距离 R 的函数。忽略了这一要点, 任何关于 R 的讨论与计算都将出现谬误。

2 大气透过率 $\tau_a(R)$

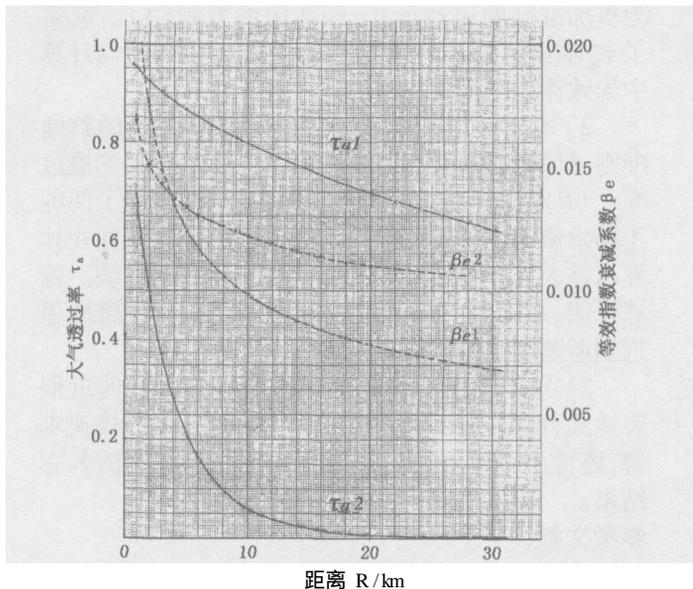
除了大气对红外辐射的衰减这一熟知事实外,

作者简介: 张孝霖 (1937 -), 男, 高级工程师, 主要研究方向为红外技术应用。

收稿日期: 2005-12-23

方程(3)清楚地指出： $\tau_a(R)$ 本身就是 R 的函数。但是，红外辐射的大气透过率与光程中所通过的物质质量 M 有复杂的关系，对常用的红外波段范围， $\tau_a(R)$ 一般没有解析表达式，这就是求解方程(3)的困难之处。但是，不论有无 $\tau_a(R)$ 的解析表达式，我们只能也必须在固定大气条件而不能在固定大气透过率 τ_a 下对 R 进行讨论或计算。请注意以下所有的 τ_a 都意味着是 R 的函数。这里仅指出常见的两种错误：

第一种错误：计算探测距离 R 时，并不给定大气条件而是给定大气透过率。事实上，不同大气条件下，同一大气透过率对应的距离往往有极大的差别，图1就可清楚看到这点。图中两条实线是，华北某地区分别在夏季与冬季，低高度、水平方向，8~12 μ m范围红外辐射的透过率曲线。大气条件已在图中作了注明。应特别注意：在设定透过率比如为0.65下，图中 τ_{a1} 曲线(冬季)对应的距离为26km，而 τ_{a2} 曲线(夏季)对应的距离仅约1km。更极端的对比条件就不再举例了。这就说明：不规定大气条件而只规定大气透过率进行探测距离的计算是没有意义的；



标号 1 的曲线：冬季，-3.26，海拔高度 0.2km，水平方向，每公里可沉积水 0.15cm。

标号 2 的曲线：夏季，24.24，海拔高度 0.2km，水平方向，每公里可沉积水 1.61cm。

图 1 两种典型条件下的大气透过率曲线

第二种错误：在讨论各参数对探测距离的影响时，将方程中大气透过率等同于一般参数并将之固定为常量，其结果必然是不真实的。比如，文献[5]在论述目标强度和探测器灵敏度对探测距离的影响时得出了表1所示的结果。请注意，表中所有结果都是在 $\tau_a = 0.9$ 这一设定下计算出来的。虽然在强辐射目标条件下，探测距离大得引人入胜，然而这一结果是错误的、不真实的。因为，表中最小探测距离

在 23海里下，已设定了大气透过率 $\tau_a = 0.9$ ；那么当距离到达其它的、比如最大的 642海里（增大了约 28倍）时，在统一的大气条件下， τ_a 还能有 0.9的高值吗？当然不可能，相反将降到远低于 0.9的值。如果要维持 $\tau_a = 0.9$ ，就必须针对每一个数据逐一修改大气条件，则表中所有计算结果都是不确定的，也就是没有意义的。

表 1 RST探测距离的理论值(海里)

目标红外辐射强度 / (W / sr)	$D^* = 10^{10}$ cm \sqrt{Hz}/w	$D^* = 10^{11}$ cm \sqrt{Hz}/w
1000	202	642
100	64	202
50	45	143
25	32	101
12.5	23	71

3 距离 R 的正确解法

求解 R 的结果是否正确的唯一判断准则就是：计算出的 R 值是否与求解中设定的大气透过率 $\tau_a(R)$ 所对应的 R 一致。如果一致就是正确的；虽不一致但在允许的误差范围内，其结果是可以接受的；否则就要重新计算。以上表达说明，要计算探测距离 R ，必须：(1)给定大气条件；(2)计算出该大气条件下的 τ_a-R 曲线。水平方向的情况最简单；斜程情况自然也可以求解。以下提供两种正确求解 R 的方法：

3.1 利用 τ_a-R 关系的逐步逼近法

按上面所述要求，完成(1)、(2)项规定的必要准备(例如图1)。

a)首先由期望的 R ，不妨记为 R_0 ，按图找出对应的 τ_a 值；

b)将 τ_a 值和其它参数代入方程(3)求试解，计算出的距离值记为 R_1 ，比较 R_1 与 R_0 ，如果在误差范围之内， R_1 就是比较正确、即可用的解。但一般是难以一次成功的；

c)如果 R 的解超出了允许的误差范围，就得进行下一步的求解。这可能出现以下两种情况：

情况一：当 R_1 显著大于 R_0 ，说明大气条件良好，实际 R 值将大于期望值，就可适当增大 R_0 并按图找出对应的新 τ_a 值，第二次求解，比如得 R_2 ，再比较 R_2 与 R_0 。这样的步骤逐次进行，一直逼近到所期望的误差范围内；

情况二：如果 R_1 显著小于 R_0 ，说明大气条件恶劣，实际 R 值将小于期望值，这时需要适当减小 R_0 并按图找出对应的新的 τ_a 值，与第一种情况的过程一样逐次逼近。

当然第一种情况与第二种情况可能交替出现，那就随之交替改变 R_0 的大小与相应的变化方向，使 R 的解逐步逼近到任意需要的精度。

3.2 利用 τ_a-R 关系的快速逼近法

如所周知，仅对单色或窄带红外辐射且在大气

均匀分布下,大气衰减才有简单的指数关系^[6]:

$$a = e^{-R} \quad (5)$$

式中, a 是大气衰减系数或称消光系数 (1/km)。本文提出等效指数衰减的方法,利用式 (5) 近似表达常用红外波段的大气衰减;但其中的大气衰减系数不再是常数,这里将之记为 a_e 并称为等效衰减系数,等效指数衰减函数记为

$$a_e = e^{-eR} \quad (6)$$

根据上式, a_e 由 R 与对应的 a 直接算出,所以与 R 并与 a 都有一一对应的关系从而得 a_e-R 曲线,正如图 1 所示。在大气透过率等效指数衰减假设下,将式 (6) 代入方程 (3);再将方程两端平方并取对数,解得距离 R 的新方程如下:

$$R = \frac{1}{e} [\text{Ln}C + \text{Ln}(I) - 2\text{Ln}R] \quad (7)$$

这虽然是一个近似方程,但能由之导出不少很有意义的结果。比如,文献 [7] 报道了在凝视系统中有近似的经验关系: $R = k \log_0 N_d$, N_d 是凝视系统的像素数, k 是比例系数。式 (4) 即系统综合参数 C 的分母内有因子 $N_d^{1/2}$, 设凝视系统总视场为 θ , 则

N_d 。在略去式 (7) 右端 R 的对数项后,自然就可得出与文献 [7] 等效的结果,即 $R = (1/e) \text{Ln}N_d$ 。限于篇幅,本文不进一步讨论新方程 (7) 所能引伸出的其他结论,而着重介绍新方程的解法并说明它能保证解的正确性。

式 (7) 虽也可人工解算,但对大量的分析设计,用计算机编程求 R 的自适应解将便捷得多,编程中使用如下的计算式:

$$R = \frac{1}{e} [\text{Ln}C + \text{Ln}(I) - 2\text{Ln}R_0]$$

由于函数 a_e 中的 R 与 a_e 的长度单位都是 km,只需要将系统参数 C 中的长度单位换算为 km,就保证了计算结果的正确性,并得以 km 为单位的 R 解。

与第一种逼近法一样,在设定大气条件并计算出 a_e-R 曲线后, a) 首先由预期的 R_0 找出对应的 a_e 值; b) 将 a_e 、 I 和 C 输入计算机,算出 R 值并记为 R_1 ,比较 R_1 与 R_0 ,如果在要求的误差范围内,就得到所需的解; c) 否则就与第一种逼近法一样,分别按两种可能出现的情况修改 R 对应的 a_e 值并重新计算,以逼近到误差范围之内。

图 2 为计算流程图。初始值 R_0 已赋值为 0.1,单位为 km。赋值语句 $R_0 = R_0 + 0.001$ 与判断语句 $|R - R_0| < 0.01$ 中数值的单位也都为 km。这些数值都可根据实际需要进行调整。

验算证明,这种方法比第一种方法的逼近速度快得多,因为 a_e-R 关系比 $a-R$ 关系明显要平稳。所得解的正确性是显然的,因为它符合前面提到的判断准则:计算出的 R 值是否与求解中设定的大气透过率 a 所对应的 R 一致。这里仅仅用 a_e 代替了 a ,而如前所述,这两者是严格一一对应的。

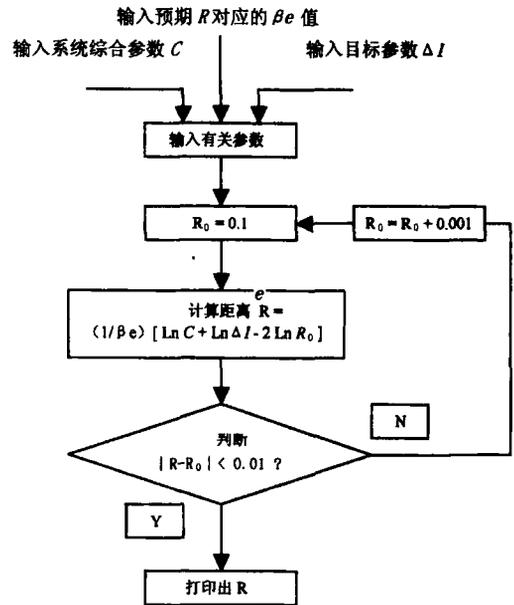


图 2 计算机求解方程 (7) 的流程图

4 结论

1) 本文强调指出红外辐射的大气透过率是随距离迅速变化的函数,并将红外系统距离方程改写为更加准确的表达形式,即文中的方程 (3)。忽略了 a 本身就是 R 的函数,必然会在 R 的讨论与计算中导致谬误与困扰;

2) 本文提出了对求解 R 结果是否正确的判断准则:计算出的 R 值必须与求解中设定的大气透过率 $a(R)$ 所对应的 R 一致。在此基础上提出了两种正确求解 R 的方法,而首先必须给定大气条件并计算出该大气条件下的 $a-R$ 曲线或 a_e-R 曲线。验算说明,利用 a_e-R 关系的方法可以更加快捷地逼近到所需要的结果;

3) 由大气等效指数衰减导出距离方程的近似表达式,即文中的方程 (7),不但可用于 R 的快速求解,还可由之导出对工程设计与应用都有用的其它结果。

参考文献:

- [1] Hudson, R D JR. Infrared System Engineering[M]. New York: John Wiley and Sons, 1969, Chapter 13.
- [2] Miller, J L. Principles of Infrared Technology, A Practical Guide to the State of the Art[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1994, Chapter 8, 9, 10.
- [3] Zhang X L. (Some new results of IR systems/sensitivity equation) Int J. IR MMW, 1992, 13 (4): 559.
- [4] Slater, P. N., Remote Sensing, Optic & Optical System, London · Amsterdam · Don Mills · Ontario · Sydney · Tokyo: Addison-Wesley Publishing Company, 1980, 111.
- [5] A R 杰哈, 张孝霖, 陈世达, 舒郁文, 等译. 红外技术应用, 北京: 化学工业出版社, 2004: 281.
- [6] Electro-Optics Handbook, RCA (Commercial Engineering), New York: Harrison, 1974, Chapter 7.
- [7] Kurer M, et al Optical Engineering, 1987, 26 (3): 182.