

文章编号 1004-924X(2002)03-0276-05

基于对比度的空中红外点目标探测距离估计方法

王 刚,禹秉熙

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130022)

摘要:基于最小分辨对比度准则,研究了天空背景下红外点目标的最大探测距离估计方法。首先,分析了红外波段大气辐射传输与衰减、对比度限制光电成像系统功率响应特性,建立了目标表观对比度模型,并推导出了由气溶胶消光系数和距离参量确定的探测距离方程。然后,对目标天空背景温差、发射率、气溶胶衰减系数、瞬时视场、对比度探测阈值以及辐射波长等参数作了详细讨论。最后,利用 LOWTRAN7 程序的典型大气模式数据,对红外点目标探测距离进行了数值模拟。

关键词:红外;点目标;探测距离;对比度;瞬时视场

中图分类号:TP732.2 **文献标识码:**A

1 引言

红外点目标探测在军事侦察、跟踪和监视,以及红外制导和预警等许多领域具有重要意义。在长距离红外探测过程中,大气传输环节将限制系统探测性能的发挥,并且是影响目标对比度传输的重要因素之一。在以后分析中将看到,大气吸收衰减和路径辐射是引起目标固有对比度的降低的主要效应。

传统上,关于红外成像系统对点目标探测性能的分析是建立在噪声限制系统的信噪比分析基础之上的。文献[1]讨论了噪声限制系统的红外目标探测距离。然而,随着探测器器件技术的不断完善,目前大多数红外成像系统已经是非噪声限制的系统,换言之,是对比度限制的系统^[2-3]。因而,有必要研究对比度限制系统的探测距离估计方法。

下面,将在分析红外点目标辐射传输和衰减机理的基础上,建立表观对比度模型,并进一步推导对比度限制系统的探测距离方程。

2 表观对比度模型

如图1所示,目标热辐射发出的辐亮度是 L_t ,

目标到传感器之间路径大气产生的路径辐亮度为 $L_a(R)$,距离为无限远处的大气背景辐亮度限为 $L_a(\infty)$ 。

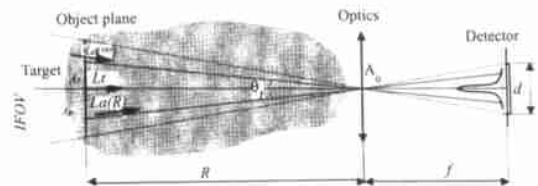


图1 红外点目标大气辐射传输及系统探测示意图
Fig. 1 Illustration of IR point target radiation propagation in the atmosphere and its detection.

为了便于讨论,我们引入瞬时视场 IFOV (Instantaneous field of view) 概念,用它表示成像系统可分辨的最小空间尺度^[4]。设探测器像元尺寸、光学系统焦距分别为 d 和 f ,则 $IFOV = d/f$ 。当红外目标与光电成像系统相距很远,其张角小于红外成像系统的瞬时视场时,它可以视作一点目标。

在光学系统焦平面上,目标所在 IFOV 内总的响应功率 P_t 由以下三部分组成:

第1部分,来自目标并经大气透射衰减后的辐射,它对应的响应功率是

$$P_1 = \tau \cdot \frac{A_0}{R^2} \cdot \tau_0 \cdot \tau_a(R) \cdot L_t \cdot A_t, \quad (1)$$

第 2 部分,来自目标所张立体角内路径辐射的响应功率

$$P_2 = \tau \cdot \frac{A_0}{R^2} \cdot \tau_0 \cdot L_a(R) \cdot A_t, \quad (2)$$

第 3 部分,是目标所张立体角外的大气背景辐射的响应功率

$$P_3 = \tau \cdot \frac{A_0}{R^2} \cdot \tau_0 \cdot L_a(\theta) \cdot (A_p - A_t), \quad (3)$$

式中, τ 表示探测器的响应度; τ_0 表示光学系统的透过率; $\tau_a(R)$ 表示距离为 R 的传输路径对应的大气透过率; A_0 表示光学系统入瞳面积, A_t 表示目标在观察视线方向的投影面积, A_p 表示在物方目标所在位置对应的瞬时视场投影面积,并有 $A_p = (\text{IFOV} \cdot R)^2$ 。

另一方面,相邻瞬时视场内接收大气背景辐射所对应的响应功率由下式给出

$$P_b = \tau \cdot \frac{A_0}{R^2} \cdot \tau_0 \cdot L_a(\theta) \cdot A_p, \quad (4)$$

依据对比度定义^[5],经过大气环节衰减后的目标与大气背景的表观对比度可以表示成

$$C_R = \frac{P_t - P_b}{P_b}, \quad (5)$$

令 $\tau^2 = A_t/A_p$,那么,由以上各式可以推导出

$$C_R = \tau^2 \frac{\tau_a(R) L_t + L_a(R) - L_a(\theta)}{L_a(\theta)}, \quad (6)$$

上面的各表达式中,假定系统是非噪声限制的(信噪比足够高,噪声可以忽略),因而没有引入系统噪声的贡献。

在红外辐射长距离传输过程中,假定传输路径的路径辐亮度变化十分缓慢,则沿传输路径任意位置的路径辐亮度 $L_a(R)$ 可由该位置的大气透过率 $\tau_a(R)$ 和路径辐亮度限 $L_a(\theta)$ 近似表示^[6]:

$$L_a(R) = L_a(\theta) [1 - \tau_a(R)], \quad (7)$$

于是,公式(6)可进一步简化成

$$C_R = \tau^2 \cdot \tau_a(R) \cdot \frac{L_t - L_a(\theta)}{L_a(\theta)}, \quad (8)$$

由于,目标本身的固有对比度

$$C_0 = \frac{L_t - L_a(\theta)}{L_a(\theta)}, \quad (9)$$

于是,得到

$$C_R = \tau^2 \cdot \tau_a(R) C_0, \quad (10)$$

由公式(10)可以看出,目标的表观对比度 C_R 与目标固有对比度 C_0 和大气透过率 τ_a 相关,而与光学系统的入瞳面积 A_0 、透过率 τ_0 及探测器响应度 τ 无关。所以,对于点目标探测,对比度限制系统的信号表观对比度只取决于目标背景及大气透过率。

顺便指出,当目标的张角与系统的瞬时视场相等时,公式(10)仍然有效,此时 $\tau = 1$ 。以下,利用公式(10)推导对比度限制系统的探测距离方程。

3 探测距离方程

对于波长为 λ 的单色辐射,设目标表面发射率是 ϵ ,绝对温度是 T_t ,则目标的辐射亮度可以用 Planck 黑体辐射公式表示^[7]

$$L_t(T_t) = \epsilon \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp(c_2/\lambda T_t)}, \quad (11)$$

式中, c_1 和 c_2 为常数。类似地,设大气背景的绝对气温是 T_a ,则大气背景辐亮度限为 $L_a(\theta)$ 也可表示为发射率是近似等于 1(观测路径接近水平方向)的黑体。并有

$$L_a(\theta, T_a) = \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T_a)} \lambda^{-5}, \quad (12)$$

对于红外波段的大气透过率而言,主要是由大气分子选择性吸收和气溶胶散射消光引起的,因而可将其写成如下形式

$$\tau_a(R) = \tau_m \exp[-\tau_a R], \quad (13)$$

式中, τ_a 表示气溶胶的衰减系数, τ_m 表示 H_2O 、 CO_2 等大气分子选择吸收引起的透过率。

把公式(11)、(12)和(13)代入(10),则可导出探测距离方程。这里,略去具体的推导过程。探测距离方程具有下面的简单形式

$$R^2 = a \exp(-\tau_a R), \quad (14)$$

式中,

$$a = \frac{1}{\text{IFOV}^2} \cdot A_t \cdot \tau_m \cdot \frac{C_0}{C_R}, \quad (15)$$

由公式(14)易见

$$R < \sqrt{a}, \quad (16)$$

因此, a 确定了探测距离 R 的上限,称之为

距离参量(Range Parameter)。因为方程(14)的形式极为简单,故不必进行数值计算,只需给定 a 便可求得 R 和 a 的关系曲线。

对于对比度限制的光电成像系统而言,最大探测距离是由系统最小可分辨对比度(对比度探测阈值) K 确定的。把公式(15)进一步展开,得到

$$a = \frac{1}{\text{IFOV}^2} \cdot m \cdot \frac{1}{K} \cdot l \cdot \exp\left(\frac{c_2}{T_t - T_a}\right) \cdot A_t, \quad (17)$$

4 分析和讨论

探测距离方程(14)表明:探测距离 R 依赖于气溶胶衰减系数 a 和距离参量 a_0 。其中, a 表征了气溶胶散射的衰减特性, a 越小,大气能见度越好,因而 R 越大。 a 确定了 R 的上限, a 值越大, R 越大。由公式(17)可以看出, a 反映的是目标背景、大气分子吸收和系统响应特性。

1) 目标背景辐射特性:表现为目标固有对比度 C_0 和投影面积 A_t 。 C_0 与目标和天空背景温度 T_t 和 T_a 、目标表面发射率 ϵ_t 都有关。在点目标成像的前提下,目标与天空背景的反差越大,换言之,天空背景温度越低,它们的温差越大,则 a 值越大。另外,高发射率、大面积的目标对应的 a 值也越大。

2) 大气分子吸收特性: H_2O 、 CO_2 等大气分子的选择吸收透过率 m 。事实上, m 也是与距离相

关的,但依存函数比较复杂。 m 值随着距离的增加而降低。而且,它与大气状态密切相关。

3) 系统响应特性:取决于系统的瞬时视场 IFOV、对比度探测阈值 K 和辐射波长 λ 。其中, IFOV 反映了系统的空间响应特性, K 反映了系统的辐射响应特性, λ 反映了系统的光谱响应特性。具体地说, IFOV 与探测器像元尺寸 d 和系统焦距 f 有关。 a 值与 IFOV 的平方成反比,当点目标的张角远小于 IFOV 时,适当地减小 IFOV,能大大地提高 a 值。另外, K 值越小, a 值越大。实际上, K 值的高低取决于探测器自身的最高灵敏度。通常,取 0.02 ~ 0.10 作为成像系统的对比度探测阈值^[8]。因为 C_0 和 m 是随红外辐射波长 λ 的变化而变化的,所以,中波红外 MWIR(3 ~ 5 μm)和长波红外 LWIR(8 ~ 12 μm)的 a 值是不同的,因而也就决定了两个波段对应探测距离的差异。

5 数值模拟

表 1 是利用 LOWTRAN7 程序拟和的,1976 年美国标准大气几种典型气溶胶模式下沿水平路径的气溶胶散射波段平均衰减系数。图 2 和图 3 分别给出了典型气溶胶模式下中波红外 MWIR(3 ~ 5 μm)和长波红外 LWIR(8 ~ 12 μm)波段的 $a \sim R$ 关系曲线。表 2 给出了乡村气溶胶能见度是 23km 模式下沿水平路径的不同观测距离对应的 m 平均值

表 1 1976 年美国标准大气典型气溶胶模式波段平均衰减系数

Table 1 Band average extinction coefficients for typical aerosol models of 1976 US Standard Atmosphere
($P = 1013\text{mb}$ $T = 288.2\text{K}$ $RH = 46\%$)

Aerosol Models		3 ~ 5 μm (km^{-1})	8 ~ 12 μm (km^{-1})
0	No aerosol	0	0
1	Rural extinction VIS = 23km	1.6E - 02	1.4E - 02
2	Rural extinction VIS = 5km	7.6E - 02	7.2E - 02
3	Navy maritime VIS = 66km (WS = 7.2m/s)	1.5E - 02	6.0E - 03
4	Maritime extinction VIS = 23km	5.0E - 02	1.7E - 02
5	Urban extinction VIS = 5km	1.0E - 01	7.5E - 02
6	Tropospheric extinction VIS = 50km	8.0E - 04	1.1E - 03
7	Fog 1 (advective fog) VIS = 0.2km	2.1E + 01	2.4E + 01
8	Fog 2 (radiative fog) VIS = 0.5km	1.1E + 01	1.9E + 00
9	Desert extinction VIS = 76km (WS = 0 m/s)	2.6E - 03	2.2E - 03
10	Desert extinction VIS = 57km (WS = 10m/s)	2.1E - 02	2.1E - 02
11	Desert extinction VIS = 16km (WS = 20m/s)	2.0E - 01	2.1E - 01
12	Desert extinction VIS = 2km (WS = 30m/s)	2.0E + 00	2.0E + 00

表 2 乡村气溶胶模式下不同距离对应的 m 值

Table 2 m values for different ranges in rural aerosol model (VIS = 23km)

Range (km)	3 ~ 5 μ m	8 ~ 12 μ m
0	1.00	1.00
1	0.62	0.88
2	0.53	0.81
5	0.39	0.66
10	0.28	0.49
20	0.18	0.28
50	0.07	0.07
100	0.02	0.01

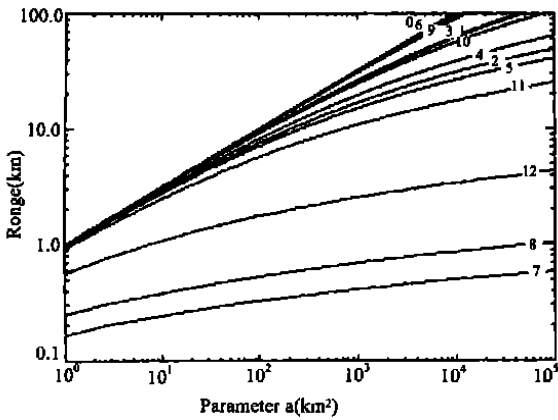


图 2 3 ~ 5 μ m 波段不同气溶胶模式下关于 a 和 a 的探测距离函数

Fig.2 Detection range as the function of a and a in 3 ~ 5 μ m wave band for different aerosol models.

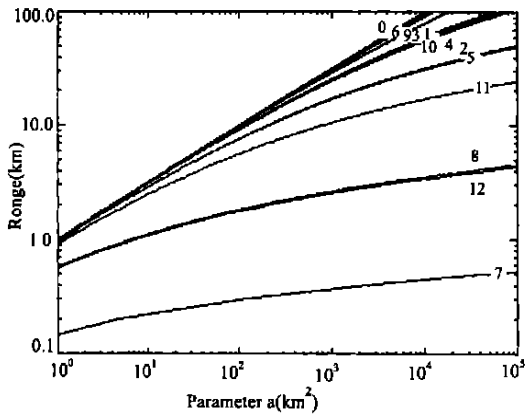


图 3 8 ~ 12 μ m 波段不同气溶胶模式下关于 a 和 a 的探测距离函数

Fig.3 Detection range as the function of a and a in 8 ~ 12 μ m wave band for different aerosol models.

我们对一典型的红外目标分别对 MWIR 和 LWIR 两波段对应的探测距离进行了数值模拟,初始参数见表 3。在模拟过程中,需要利用公式 (14)和(17)和表 1 和表 2 的数据,反复作线性插值和迭代,直到探测距离 R 收敛为止。最后的计算结果是:在 MWIR 波段, $a = 406.4\text{km}^2$,探测距离 $R = 17.5\text{km}$;而在 LWIR 波段, $a = 163.4\text{km}^2$,探测距离 $R = 11.8\text{km}$ 。

表 3 探测距离估计数值模拟初始参数

Table 3 Initial parameters for detective range evaluation numerical simulation

A_t	Target area	0.5 m ²
ϵ	Target emissivity	0.8
T_t	Target temperature	300 K
T_a	Sky background temperature	270 K
a	Aerosol extinction coefficient	0.014 km ⁻¹
m	Molecular absorption transmittance	0.22 (3 ~ 5 μ m) 0.39 (8 ~ 12 μ m)
IFOV	Instantaneous field of view	0.5 mrad
K	Contrast threshold	0.02

6 结论

在以大气为背景的前提下,对于对比度限制光电成像系统而言,目标对比度的传输只与大气透过率有关。传统上,探测距离估计直接采用大气透过率参数,不把大气成分的散射衰减和选择吸收效应分离开来^[9-10]。推导过程中,我们分别引入了反映两种效应的气溶胶衰减系数 a 和距离参量 a ,更适合精确的工程分析和计算。其中,距离参量 a 限定了红外成像系统的最大探测距离。距离参量 a 不但与对比度探测阈值 K 有关,而且还与目标背景辐射、大气分子吸收特性及系统的空间、辐射和光谱响应特性有关。

在白天,尽管中波红外波段存在太阳光散射贡献,可能影响计算精度。但进一步模拟计算表明,只要观察视线不十分接近太阳时,其贡献要比红外热辐射低几个数量级。因此,可以忽略阳光散射的影响。而在夜间或全云状态下,不管是长波红外还是中波红外波段,根本不必考虑阳光散射的影响。因此,文中建立的表现对比度模型和探测距离方程适用于整个热红外波段。

参考文献:

- [1] Ekstrand B. Approach to estimation of infrared point - target range [J]. *Appl. Opt.*, 2000 ,39(20) :3495 - 3503.
- [2] Sadot D, Kopeika N S. Imaging through the atmosphere :practical instrumentation - based theory and verification of aerosol modulation transfer function[J]. *J. Opt. Soc. Am. A* , 1993 ,10(1) :172 - 179.
- [3] Kopeika N S. *A system engineering approach to imaging* [M]. Bellingham , Washington , USA : SPIE , 1998 ,PM38 :331 - 356.
- [4] Accetta J S, Shumaker D L. *Infrared and electro - optical system handbook* [M]. Second Edition. Bellingham , Washington , USA : Infrared Information Analysis Center , 1993 ,5 :7 - 9.
- [5] Philip N, Slater. *Remote Sensing , optics and optical systems* [M]. Massachusetts : Addison - wesley publishing company , 1980. 206 - 207.
- [6] Accetta J S, Shumaker D L. *Infrared and Electro - Optical System handbook* [M]. Second Edition. Bellingham , Washington , USA : Infrared Information Analysis Center , 1993 ,7 :470 - 475.
- [7] Gerald C, Holst. *Testing and evaluation of infrared imaging systems* [M]. Bellingham , Washington , USA : Copublished by SPIE and JCD Publishing Co , 1998 ,PM58 :80 - 90.
- [8] Gerald H. *CCD Arrays , Cameras , and Displays* [M]. Second Edition. Bellingham , Washington , USA : SPIE , 1998 , PM57 :351 - 359.
- [9] 吴晗平. 红外辐射大气透过率的工程理论计算方法研究[J]. *光学 精密工程* ,1998 ,6(4) :35 - 43.
- [10] 许中胜. 红外探测系统参数关系及实际应用[J]. *光学 精密工程* ,1999 ,7(4) :81 - 85.

Approach to estimate infrared point-target detection range against sky background based on contrast

WANG Gang , YU Bing-xi

(*Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics ,
Chinese Academy of Sciences , Changchun 130022 , China*)

Abstract : This paper investigates the approach to estimate the maximum detection range of an infrared point-target against sky background based on the minimum resolved contrast (MRC) criteria. Firstly, the characteristics of radiation propagation and attenuation in the atmosphere, and the power response of a contrast-limited optoelectronic system are analyzed, the apparent contrast model of a target is developed, and the detection range equation dependent on the aerosol extinction coefficient and range parameter are derived. Secondly, other parameters such as temperature difference and emissivity of target and sky, molecular absorptive transmittance, instantaneous field of view (IFOV), contrast threshold and radiant wavelength are discussed in detail. Finally, the numerical simulations related to infrared point-target detection range are executed using typical atmospheric data output from LOWTRAN7 code.

Key words : infrared ; point-target ; detection range ; contrast ; instantaneous field of view

作者简介:王 刚(1970 -) ,男,吉林省长春市人,1993年毕业于长春光学精密机械学院光学工程系。1998年获中国科学院长春光学精密机械研究所光学专业理学硕士学位,现为博士研究生,助理研究员,主要从事光学仪器研制、大气光学、空间遥感技术、成像模拟和图像质量评估等方面的研究。