

文章编号 1004-924X(2004)02-0161-04

双波段红外成像系统对空中点目标测距的方法

路 远,凌永顺,时家明

(解放军电子工程学院 科研部 202 室,安徽 合肥 230037)

摘要:提出了对空中点目标进行被动测距的方法。基于红外辐射在大气中的传输规律和红外成像系统的特性,建立了目标和背景的表现对比度模型。通过对两个波段上对比度模型的分析,推导出了测距公式和距离分辨率公式。理论分析表明,只要得到大气在两个波段上的消光系数,通过测量目标在两个波段、两个时刻上的目标表现对比度,即可计算得到目标距离和目标径向速度,而距离分辨率则取决于系统的对比度探测能力及相关参数。利用所得公式计算了不同气象条件下,目标距离分辨率与目标距离之间的关系。计算结果表明,该测距方法具有工程应用价值。

关键词:红外成像系统;表现对比度;消光系数;测距;距离分辨率

中图分类号:TH745.3 文献标识码:A

Measurement of aerial point target distance using dual-band infrared imaging system

LU Yuan, LING Yong-shun, SHI Jia-ming

(Research Department, Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China)

Abstract: By establishing a model based on the law of infrared radiation transmission in atmosphere and the characteristics of infrared imaging system for the apparent contrast between the target and the background, and analyzing the model over two wavebands to formulate the distance measuring formula and the distance resolving power formula, a passive distance measurement method is proposed for aerial point target distance measurement. The relationship between the distance resolving power and the distance is calculated for different weather conditions. The calculation results indicate that the method proposed is suitable for engineering application.

Key words: infrared imaging system; apparent contrast; extinction coefficient; distance measurement; distance-resolving power

1 引言

被动探测系统由于系统本身不辐射电磁波,故不容易获取目标的距离信息。被动系统常见的获取目标距离的方法主要是利用双站或多站对目标进行交叉定位。在红外波段,红外辐射在大气中传输时,大气对红外辐射的吸收随波长发生一定的变化,同一目标在不同波段上的对比度也会

随距离发生变化。于是,可以根据对比度、辐射强度等信息随距离的变化来确定目标的距离。目前,红外成像系统已经在目标探测、制导等系统上得到广泛应用。本文讨论如何利用成像系统获取目标的距离信息。

2 成像系统表现对比度模型^[1-3]

传统的被动定位系统基本上采取双站或多站

交叉定位方法,本文探讨红外成像系统的单站定位,主要讨论距离信息的获取。鉴于目前大多数红外成像系统已是非噪声限制系统,即对比度限制系统^[4-5],在此利用对比度的概念讨论双波段红外成像系统对空中点目标测距的方法。

对于红外成像系统,引用瞬时视场 IFOV (Instantaneous Field of View) 概念^[2],设探测器像元尺寸、光学系统焦距分别为 d 和 f , 则 $\text{IFOV} = d/f$ 。当目标与光电成像系统相距很远,其对红外系统张角小于红外成像系统的瞬时视场角时,它可以视作一点目标。

设目标发出的辐亮度是 L_t , 目标到传感器之间大气产生的路径辐亮度为 $L_a(R)$, 无限远处的大气背景辐亮度为 $L_a(\infty)$ 在光学系统焦平面上, 目标所在 IFOV 内产生辐照度 E_t 由以下 3 部分组成:

第 1 部分,来自目标并经大气透射衰减后的辐射,它形成的辐照度是:

$$E_1 = \frac{A_0}{R^2} \tau_a(R) L_t A_t, \quad (1)$$

第 2 部分,来自目标所张立体角内路径辐射形成的辐照度:

$$E_2 = \frac{A_0}{R^2} L_a(R) A_t, \quad (2)$$

第 3 部分,目标所张立体角外的大气背景形成的辐照度:

$$E_3 = \frac{A_0}{R^2} L_a(\infty) (A_p - A_t), \quad (3)$$

式中, τ_a 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 表示目标在垂直于观察视线方向平面上的投影面积; A_p 表示目标所在位置对应的瞬时视场投影面积,并有 $A_p = (\text{IFOV} \cdot R)^2$ 。

同时,相邻瞬时视场内接收大气背景辐射的辐照度为:

$$E_b = \frac{A_0}{R^2} L_a(\infty) A_p, \quad (4)$$

依据对比度定义,经过大气衰减后的目标与大气背景的表现对比度可以表示成^[6]:

$$C_R = \frac{E_t - E_b}{E_b}, \quad (5)$$

式中, E_t 为目标在 IFOV 中形成的辐照度。令

$C_0 = \frac{A_t}{A_p}$, 那么,由以上各式可以推导出:

$$C_R = \frac{\tau_a(R) L_t + L_a(R) - L_a(\infty)}{L_a(\infty)}, \quad (6)$$

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 $L_a(\infty)$ 近似表示:

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

对于目标,定义其绝对对比度为:

$$C_0 = \frac{L_t - L_a(\infty)}{L_a(\infty)}, \quad (8)$$

于是,可得到:

$$C_R = \tau_a(R) \cdot C_0 \quad (9)$$

由上式可以看到,目标的表现对比度只与目标绝对对比度、大气传输状况、目标对成像系统张角在瞬时视场中所占比例有关,而与光学系统的参数无关。

3 双波段红外系统目标距离信息获取

空中目标发出的红外辐射,在传输到红外成像探测系统过程中,大气以及其中的气溶胶将会对其产生衰减。大气衰减能力可用消光系数 μ 来描述,在不同波段上,大气的消光能力也不相同。由大气衰减造成的红外辐射大气透过率为^[2]:

$$\tau_a = e^{-\mu R}, \quad (10)$$

于是,式(9)可以写成:

$$C_R = \tau_a \cdot e^{-\mu R} \cdot C_0, \quad (11)$$

设对于某双波段红外成像系统,目标距成像系统的距离为 R_1 时,在 λ_1 和 λ_2 两个波段上所得到的表现对比度分别为:

$$C_{\lambda_1 R_1} = \tau_{a1} \cdot e^{-\mu_1 R_1} \cdot C_{01}, \quad (12)$$

$$C_{\lambda_2 R_1} = \tau_{a2} \cdot e^{-\mu_2 R_1} \cdot C_{02}. \quad (13)$$

式中, μ_1 、 μ_2 为大气在 2 个波段上的消光系数; C_{01} 、 C_{02} 为目标在 2 个波段上的绝对对比度; τ_{a1} 为在 R_1 的距离上目标对成像系统张角在瞬时视场中所占比例。

经过一段时间 t (假设在此期间,目标辐射亮度和在观察方向上的投影面积不变),目标距成像系统距离为 R_2 ,在 λ_1 和 λ_2 两个波段上所得到的表现对比度分别为:

$$C_{\lambda_1 R_2} = \tau_{a1} \cdot e^{-\mu_1 R_2} \cdot C_{01}, \quad (14)$$

$$C_{\lambda_2 R_2} = \tau_{a2} \cdot e^{-\mu_2 R_2} \cdot C_{02}, \quad (15)$$

R_2 意义同 R_1 类似,并且从前面 R_1 的定义可以得到:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_1^2}{R_2^2}, \quad (16)$$

将式(12),(13),(14),(15),(16)联立,并令 $R = R_2 - R_1$, 可得:

$$R = R_2 - R_1 = \frac{1}{\mu_1 - \mu_2} \ln\left(\frac{C_{1R_1} \cdot C_{2R_2}}{C_{2R_1} \cdot C_{1R_2}}\right), \quad (17)$$

$$R_2 - R_1 = \frac{1}{\mu_1} \ln\left(\frac{C_{1R_1}}{C_{1R_2}} \cdot \frac{R_1^2}{R_2^2}\right), \quad (18)$$

式(17),(18)化简后可得到关于 R_1 的方程:

$$\mu_1 \cdot R = \ln\left[\frac{C_{1R_1}}{C_{1R_2}} \cdot \frac{R_1^2}{(R_1 + R)^2}\right], \quad (19)$$

解此方程,可得:

$$R_1 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{2e^{\mu_1 R} \cdot C_{1R_2} \pm 2[e^{\mu R} \cdot C_{1R_1} \cdot C_{1R_2}]^{\frac{1}{2}}}{-e^{\mu_1 R} \cdot C_{1R_2} + C_{1R_1}} \right\} \cdot R, \quad (20)$$

式(20)中的 R 可由式(17)得到,由式(20)可以看出,对于双波段红外成像系统,只要知道了大气状况,即大气在 2 个波段上的消光系数,通过测量目标在 2 个波段、两个时刻上的目标表观对比度,就可以测得目标距离。同时,由式(17), R 除以二次测量之间的间隔时间 t , 就可得到目标的径向速度。由此可得出结论,双波段红外成像系统可用这种方法获取目标距离和速度信息。

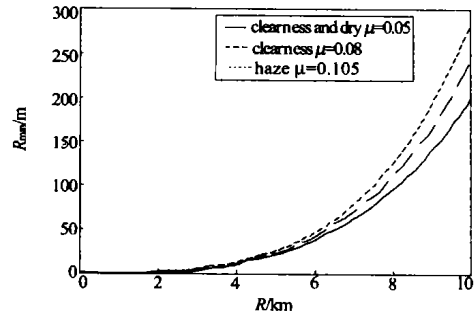
4 距离分辨率的讨论

本文使用距离分辨率 R_{\min} 来表示测距精度,即系统的最小可分辨距离。对于式(11),对 R 进行求导,可得:

$$\frac{dC_R}{dR} = \frac{A_t \cdot e^{-\mu R} \cdot C_0}{\text{IFOV}^2 \cdot R^2} \left(-\frac{2}{R} - \mu\right), \quad (23)$$

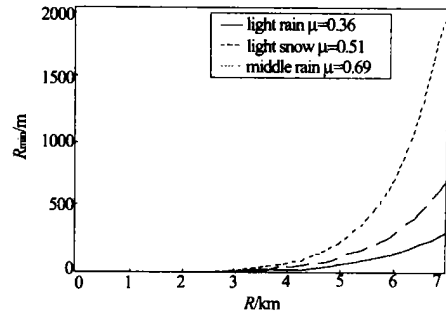
式(23)中的负号表明,系统探测到目标的表观对比度增大时,距离减小。目标此时在靠近探测系统,在求距离分辨率时,可以不考虑符号。将上式中 dR 写成 R_{\min} , dC_R 写成 $C_{R\min}$,其代表系统的对比度探测能力,舍弃负号,有:

$$R_{\min} = \frac{C_{R\min}}{\frac{C_0 A_t \cdot e^{-\mu R}}{\text{IFOV}^2 \cdot R^2} \left(\frac{2}{R} + \mu\right)}, \quad (24)$$



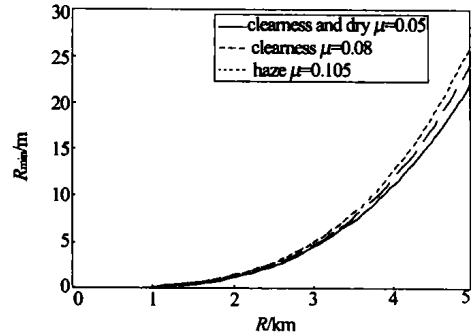
(a) 气象条件

(a) Weather condition



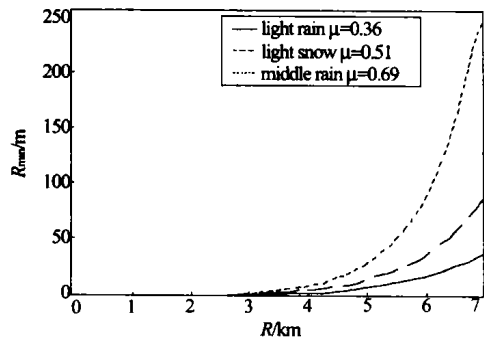
(b) 气象条件

(b) Weather condition



(c) 气象条件

(c) Weather condition



(d) 气象条件

(d) Weather condition

图 1 距离分辨率与目标距离关系

Fig. 1 Relationship between range resolution and target distance

式(24)说明,系统的距离分辨率取决于系统的对比度探测能力 C_{Rmin} , 目标与背景的绝对对比度 C_0 , 大气的消光系数 μ , 目标与系统的距离 R 和成像系统的瞬时视场 IFOV。式(24)应在满足目标在探测系统最大探测距离内的情况下应用。在一些典型的大气气象条件下,大气在 812 波段的消光系数如表 1 所示^[2]。

表 1 8~12 μm 波段的消光系数

Tab. 1 Distinction coefficient at 8~12 μm waveband

气象条件	晴朗干燥	晴朗	薄雾	轻雾	中雾
消光系数 (/ km)	0.05	0.08	0.105	1.9	3.5
气象条件	小雨	小雪	中雨	大雨	大雪
消光系数 (/ km)	0.36	0.51	0.69	1.39	9.2

对于式(24),假设 $C_{Rmin} = 0.001$, $C_0 = 2$, IFOV = 6, $A_t = 5 \text{ m}^2$, 计算得到系统的距离分辨率与距离的关系如图 1 所示。图 1(a)对应于较好的气象条件;图 1(b)对应于稍差的气象条件;图 1(c)为图 1(a)的局部放大;图 1(d)为图 1(b)的局部放大。在恶劣的气象条件下,红外系统无法工作。

从图 1 可以看出,天气状况对分辨率影响很大。在良好的天气情况下,系统可以达到较好的距离分辨率;天气稍差时,较远距离上系统分辨率很差,距离分辨率随着目标距离增加而增大,在近距离的情况下,可在一定程度上满足工程上的测距需求。

5 结 论

前面的理论分析表明,只要知道了大气在两个波段上的消光系数,通过测量目标在两个波段、两个时刻上的目标表观对比度,就可以计算得到目标距离和目标的径向速度。应用中,大气消光系数可以实际测得,也可以根据天气状况计算或利用数据库获得。系统的对比度探测能力可由系统的最小可探测温差以及其他相关参数确定。实际上,当点目标随着距离的减小而变成面目标时,该讨论方法同样适用。通过文中最后的实例计算知道,利用该方法测距在一定程度上可满足工程需要。本文仅对红外成像系统的被动测距进行了理论上的研究,工程上应用尚需进行试验验证。

参考文献:

- [1] 王刚,禹秉熙. 基于对比度的空中红外点目标探测距离估计方法[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(3): 276-280.
WANG G, YU B X. Approach to estimate infrared point target detection range against sky background based on contrast [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(3): 276-280.
- [2] ACCETTA J S, SHUMAKER D L. *Infrared and electro-optical system handbook* [M]. Second Edition. Bellingham, Washington, USA: Infrared Information Analysis Center, 1993.
- [3] 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): 82-85.
XU ZH SH. Infrared detection system parameter relation formula and practical application [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(4): 82-85.
- [4] 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.
- [5] KOPEIKA N S. *A system engineering approach to imaging* [M]. Bellingham, Washington, USA: SPIE, 1998.
- [6] SLATER P N. *Remote sensing, optics and optical systems* [M]. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1980.

作者简介:路 远(1971-),男,安徽萧县人,解放军电子工程学院讲师,博士研究生,主要研究方向为电子对抗技术,在国内外正式刊物上发表论文多篇。E-mail: luyuan@mail.hf.ah.cn;
凌永顺(1937-),男,安徽滁州人,中国工程院院士,解放军电子工程学院教授,博士生导师,主要研究方向为电子对抗技术,获国家发明二等奖一项,国家科技进步二等奖二项。