

文章编号:1001-5078(2007)06-0517-03

基于对比度的双波段被动红外测距

付小宁¹, 赵 赓¹, 刘上乾²

(1. 西安电子科技大学机电工程学院测控系, 陕西 西安 710071; 2. 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘 要:建立了基于双波段对比度观测的被动测距算法。应用瞬时视场概念结合美国海军红外辐射传输模型描述大气透过率造成的衰减,在 $3.4 \sim 5\mu\text{m}$, $8 \sim 12\mu\text{m}$ 波段上得到了目标对比度与探测距离的关系式。分析表明在相邻两个探测距离上可得到4个形如 $\ln x + bx + c = 0$ 的超越方程。通过求解该超越方程组,即可获得相应的目标距离。最后,给出了本文算法的理论误差曲线,分析表明该测距误差小于对比度的测量误差,适用于工作在海域的对比度受限系统对点目标的距离估计。

关键词:双波段;被动测距;对比度

中图分类号:TN216

文献标识码:A

Passive IR Ranging Based on Contrast in Dual-band Radiation

FU Xiao-ning¹, ZHAO Geng¹, LIU Shang-qian²

(1. Dept. of Meas. & Ctrl., Electromechanical Engineering School, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Sch. of Technology Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A passive IR ranging algorithm based on contrast in dual-band radiation was established. With the instantaneous field of view concept and the U. S. navy model combined, the relation equation of a target's contrast detected at $3.4 \sim 5\mu\text{m}$ and $8 \sim 12\mu\text{m}$ band via the distance from detector to the target itself is achieved. It showed that 4 transcendental functions such as $\ln x + bx + c = 0$ can be obtained at two adjacent detecting distances, and then, the detecting distance can be gained by solving those 4 transcendental functions. At last, it's illustrated by the theoretic ranging error curve that the relative ranging error is less than the contrast-detected error, this scheme is validity to point target ranging through a contrast-limited system in maritime space.

Key words: dual-band; passive ranging; contrast

1 引言

当电磁辐射通过大气从辐射源向接收器传输时,吸收和出视场散射降低了目标信号,而进入视场的散射和路径辐射则降低了目标的对比度^[1]。这时,探测器接收到的对比度只是经过大气透过率衰减后的固有对比度^[1-2]。对某一波段的红外辐射而言,探测器检测到的对比度是目标固有对比度和目标视距的函数;同一目标在不同波段上的对比度也随目标视距的不同而发生变化。因此,根据对比度

或目标辐射强度可以确定目标的距离。

当前,国内外已有人对此作了探索,但是,受到红外传输模型问题的限制^[3],有关研究尚未获得实质性突破^[2,4]。近几年,美国海军通过在世界各地

基金项目:装备预研基金资助项目(41101050105)。

作者简介:付小宁(1964-),男,副教授,研究生导师,中国力学学会会员,传感器专业会员,从事光电检测技术与自动化装置,传感器测量,测控技术与仪器方面的教学与科研工作,发表论文40余篇,EI检索6篇。E-mail: fuxn@mail.xidian.edu.cn

收稿日期:2006-11-22

的大量实际测量,建立了海平面附近的大气中红外辐射传输透过率的数学模型,使得整波段大气透过率与现实相符合的距离从 5km 扩展到 20km^[1,3,5]。本文将采用美国海军模型进行相应的研究。

2 目标距离信息的获取

文献[2]阐述了目标对成像系统的表观对比度模型,根据该模型,可得目标的表观对比度为:

$$C_R = \xi \cdot \tau_a(R) \cdot C_0 \quad (1)$$

由上式可以看到,目标的表观对比度只与目标固有对比度为 C_0 、距离为 R 的路径对应的大气透过率 $\tau_a(R)$ 、目标对成像系统张角在瞬时视场中所占比例 ξ 有关,而与光学系统的参数无关。

应用美国海军红外辐射传播模型,则式(1)可进一步写成如下形式:

$$C_R = \xi \cdot \exp(-\alpha R^\beta) \cdot C_0 \quad (2)$$

式中, α 和 β 是取自相应数据库的平均系数,数据库用观察的数量组加以标记,在数据库中用不同的百分率来定义系数分组。例如,70% 的一组意味着用这些值通过计算而得到的大气透过率等于或小于数据库中典型数据的 70%。所有预测值在 20 km 以内是合理的。适用于东中国海、黄海的 R400 数据见表 1。

表 1 R400 系数
Tab. 1 R400 coefficient

百分比	3.4 ~ 5 μm		8 ~ 12 μm	
	α	β	α	β
10%	0.46450	0.60692	0.13377	0.85766
25%	0.51896	0.60212	0.18370	0.87567
50%	0.64507	0.56790	0.33349	0.88109
70%	0.72821	0.54521	0.50976	0.88056
80%	0.75606	0.54707	0.55940	0.88230
85%	0.77212	0.56045	0.58038	0.88297
90%	0.80774	0.59999	0.60764	0.88794
95%	0.94043	0.68741	0.66784	0.88851

设对于某双波段红外成像系统,点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观对比度分别为:

$$C_{11} = \xi_1 \cdot \exp(-\alpha_1 R_1^{\beta_1}) \cdot C_{01} \quad (3a)$$

$$C_{21} = \xi_1 \cdot \exp(-\alpha_2 R_1^{\beta_2}) \cdot C_{02} \quad (3b)$$

式中, $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ 为取自数据库的平均系数; C_{01}, C_{02} 为目标在 2 个波段上的固有对比度; ξ_1 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 时,在 λ_1 和 λ_2 两个波段上所得到的表观对比度分别为:

$$C_{12} = \xi_2 \cdot \exp(-\alpha_1 R_2^{\beta_1}) \cdot C_{01} \quad (4a)$$

$$C_{22} = \xi_2 \cdot \exp(-\alpha_2 R_2^{\beta_2}) \cdot C_{02} \quad (4b)$$

ξ_2 意义同 ξ_1 类似。根据文献[2], ξ_2, ξ_1 分别与 R_2^2, R_1^2 成反比,当相邻两次采样间隔上目标姿态无明显变化时,有:

$$\xi_1 = k/R_1^2 \quad (5a)$$

$$\xi_2 = k/R_2^2 \quad (5b)$$

式中, k 为与目标到成像系统视距无关的常数。将式(5)带入式(4),有:

$$C_{11} = \exp(-\alpha_1 R_1^{\beta_1}) \cdot k C_{01}/R_1^2 \quad (6a)$$

$$C_{21} = \exp(-\alpha_2 R_1^{\beta_2}) \cdot k C_{02}/R_1^2 \quad (6b)$$

$$C_{12} = \exp(-\alpha_1 R_2^{\beta_1}) \cdot k C_{01}/R_2^2 \quad (6c)$$

$$C_{22} = \exp(-\alpha_2 R_2^{\beta_2}) \cdot k C_{02}/R_2^2 \quad (6d)$$

式(6)显示,对于同一目标,在波段 1 ($\lambda'_1 \sim \lambda'_2$) 和波段 2 ($\lambda''_1 \sim \lambda''_2$) 所得到的对比度是各不相同的。记第 i 波段 ($i=1$ 或 2) 在第 j ($j=1$ 或 2) 个观测点上的对比度检测值为 C_{ij} ,式(6)可概括为:

$$C_{ij} = \exp(-\alpha_i R_j^{\beta_i}) \cdot k C_{0i}/R_j^2 = \exp(-\alpha_i R_j^{\beta_i}) \cdot C_{0i}^*/R_j^2 \quad (7)$$

令 $C_{0i}^* = \ln(\gamma_i)$,式(7)转变为:

$$R_j^2 C_{ij} = \exp(-\alpha_i R_j^{\beta_i} + \gamma_i) \quad (8)$$

对式(8)取对数,可得:

$$\ln C_{ij} + 2 \ln R_j = -\alpha_i R_j^{\beta_i} + \gamma_i \quad (9)$$

根据式(9),对相邻采样点 $j=1, 2$,有下列等式成立:

$$\ln C_{11} + 2 \ln R_1 = -\alpha_1 R_1^{\beta_1} + \gamma_1 \quad (10a)$$

$$\ln C_{21} + 2 \ln R_1 = -\alpha_2 R_1^{\beta_2} + \gamma_2 \quad (10b)$$

$$\ln C_{12} + 2 \ln R_2 = -\alpha_1 R_2^{\beta_1} + \gamma_1 \quad (10c)$$

$$\ln C_{22} + 2 \ln R_2 = -\alpha_2 R_2^{\beta_2} + \gamma_2 \quad (10d)$$

对式(10)进行整理,有如下方程组:

$$\ln R_1^{\beta_1} + \alpha_1 \beta_1 / 2 \cdot R_1^{\beta_1} + \beta_1 / 2 \cdot (\ln C_{11} - \gamma_1) = 0 \quad (11a)$$

$$\ln R_1^{\beta_2} + \alpha_2 \beta_2 / 2 \cdot R_1^{\beta_2} + \beta_2 / 2 \cdot (\ln C_{21} - \gamma_2) = 0 \quad (11b)$$

$$\ln R_2^{\beta_1} + \alpha_1 \beta_1 / 2 \cdot R_2^{\beta_1} + \beta_1 / 2 \cdot (\ln C_{12} - \gamma_1) = 0 \quad (11c)$$

$$\ln R_2^{\beta_2} + \alpha_2 \beta_2 / 2 \cdot R_2^{\beta_2} + \beta_2 / 2 \cdot (\ln C_{22} - \gamma_2) = 0 \quad (11d)$$

方程组(11)是一组形如 $\ln x + bx + c = 0$ 的超越方程。根据文献[6],当 $b > 0$ 时,该超越方程有一根 $x = e^a$,且满足 $e^a + e/b = -c/b$ 。至此,可得如下解集:

$$R_1^{\beta_1} = -1/\alpha_1 \cdot \ln C_{11} + \gamma_1/\alpha_1 - 2e/(\alpha_1 \beta_1) \quad (12a)$$

$$R_1^{\beta_2} = -1/\alpha_2 \cdot \ln C_{21} + \gamma_2/\alpha_2 - 2e/(\alpha_2 \beta_2) \quad (12b)$$

$$R_2^{\beta_1} = -1/\alpha_1 \cdot \ln C_{12} + \gamma_1/\alpha_1 - 2e/(\alpha_1 \beta_1) \quad (12c)$$

$$R_2^{\beta_2} = -1/\alpha_2 \cdot \ln C_{22} + \gamma_2/\alpha_2 - 2e/(\alpha_2 \beta_2) \quad (12d)$$

在式(12)中消去 γ_1 和 γ_2 ,可得如下非线性方程组:

$$R_1^{\beta_1} - R_2^{\beta_1} = 1/\alpha_1 \cdot \ln(C_{12}/C_{11}) \quad (13a)$$

$$R_1^{\beta_2} - R_2^{\beta_2} = 1/\alpha_2 \cdot \ln(C_{22}/C_{21}) \quad (13b)$$

由式(10)可得:

$$R_1/R_2 = (C_{12}C_{21}/(C_{11}C_{22}))^{\beta_2 - \beta_1} \quad (14)$$

联解式(13)、式(14),可得当前时刻的目标距离:

$$R_2 = \frac{\ln(C_{12}/C_{11})}{\alpha_1 \cdot [(C_{12}C_{21}/(C_{11}C_{22}))^{\beta_2 - \beta_1} - 1]} \quad (15)$$

式(15)中, $C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}$ 为观测量; $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ 是可以按现场实际情况选定的美国海军红外辐射传输模型参数。故知式(15)所示的方程组可解。

3 对测距公式的讨论

假定测量时式(7)中 C_{ij}, R_j 的相对误差分别为 $\delta C_{ij}, \delta R_j$,对某次具体测量有:

$$\ln[E_{ij}(1 + \delta C_{ij})] + 2\ln[R_j(1 + \delta R_j)] = -\alpha_i R_j^{\beta_i} (1 + \delta R_j)^{\beta_i} + \gamma_i \quad (16)$$

当 $\delta C_{ij}, \delta R_j$ 均较小时,有:

$$\delta R_j \approx -\delta C_{ij}/(2 + \alpha_i \beta_i R_j^{\beta_i}) \quad (17)$$

至此,可对本文方法进行测距误差的估计。结合式(15),当对比度的测量误差为 5% 时,在 1 ~ 22km 内的距离估计误差见图 1。

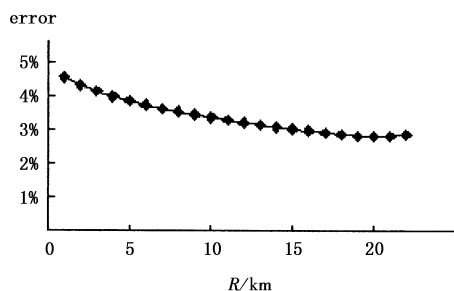


图1 测距误差(对比度的测量误差为 5%)

Fig.1 ranging error via a 5% error of contrast

根据图 1,当对比度的测量误差为 5% 时,测距相对误差小于 5%。换言之,应用本文方法的测距误差小于对比度的测量误差。

当目标与探测器距离偏小时,其点目标特征减弱,测距误差增大;当目标与探测器距离过大时,因对比度的测量误差增加,测距误差增大。由此可见,图 1 所示的误差曲线比较符合实际,具有一定的理论价值。

4 结 语

本文根据探测器接收到的目标对比度是经过大气透过率衰减后的目标固有对比度这一基本事实,结合美国海军模型,在 3.4 ~ 5 μm , 8 ~ 12 μm 波段上得到了目标对比度与探测距离的关系式。通过求解相邻观测点上的 4 组关系方程,即可实现对目标的被动测距。研究表明,该测距方案的理论误差小于对比度的测量误差,具有一定的理论价值。该算法适用于工作在海域的对比度受限系统对点目标的距离估计;通过连续的距离测量还可估计目标的速度^[5],最终实现对目标威胁度的排序。要求系统工作于对比度受限模式^[2]。

参考文献:

- [1] Gerald C Holst. Electro-optical imaging system performance [C]//second edition. SPIE Optical Engineering Press, 2000: 23 - 46.
- [2] LU Yuan, LING Yong shun, SHI Jia-ming. Measurement of aerial pointit target distance using dual-band infrared imaging system [J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 1(2): 161 - 164. (in Chinese)
- [3] FU Xiao-ning. Research on infrared passive location technology from mono-station [D]. Doctor dissertation, Xidian University, 2005. (in Chinese)
- [4] WANG Gang, YU Bing-xi. Approach to estimate infrared point target detection range against sky background based on contrast [J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(3): 276 - 280. (in Chinese)
- [5] FU Xiao-ning, LIU Shang-qian, NIU Jian-jun. A research on global passive ranging algorithm forIRST systems [J]. Infrared Technology, 2005, 27(4): 279 - 283. (in Chinese)
- [6] LIU Qing-ge. On solution to the transcendent equation that $\log_a x + bx + c = 0$ [J]. Middle School Mathematics Monthly, 1994, (9): 15 - 17. (in Chinese)