

低空红外预警系统距离估算模型

陈志伟, 刘刚华, 黄 勇, 张树杰

(郑州防空兵学院 火控教研室, 河南 郑州 450052)

摘 要:对于红外预警系统,目标定位的最大难点是观测量只有角度,没有距离,这就使得火控系统的目标导引遇到困难。通过融合红外探测器对目标辐射的响应信息,利用所测得的角度参数,建立了获取目标距离的估算模型,为系统的研制提供了重要的理论依据。

关键词:红外探测器; 红外预警系统; 被动测距; 距离估算模型

中图分类号:TN21 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2004)05-0449-04

Range estimation model of infrared surveillance system in low level

CHEN Zhi-wei, LIU Gang-hua, HUANG Yong, ZHANG Shu-jie

(Fire Control Staff Room, Zhengzhou Air Defence Academy, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: For infrared surveillance system, it is most difficult that the measurements are only angles not distance, which makes target location of fire control system be difficult to realize. In this paper, the outputs of infrared sensors and the angle parameters are used to set up a range estimation model, which provides an important theoretical reference for the research of systems.

Key words: Infrared detector; Infrared surveillance system; Passive ranging; Range estimation model

0 引 言

低空红外预警系统是一种重要的对空目标探测装置,以被动方式工作,抗电子干扰和抗隐身目标能力强,但是只有目标高低角和方位角的测量,没有距离量的测量,不能独立地为情报指挥系统或火控设备提供较为准确的导引信号。因此,红外预警系统的多

目标测距成为该系统发展迫切需要解决的课题。参考文献[1]在列举了一些文献所探讨的测距方法并指出其局限性的基础上,给出了一种新的红外警戒系统的运动参数估计算法。但是,该方法在理论上却需要 3 个时刻的观测值来建立非线性方程组,再联立求取目标的运动参数,从而得出目标至舰艇的距离。参考文献[2]所探讨的两点距离估算方法依赖于初始距离,并且对不同的目标飞行特性需要分情况计算,使

收稿日期:2003-10-28; 修订日期:2003-11-15

作者简介:陈志伟(1977-),男,浙江龙游人,硕士生,主要从事防空兵技术装备作战运用方面的研究。

用不方便。

被动测量技术有单站和多站之分^[3]。所谓多站测量,就是多个平台同时对目标进行定位,通过解算几何关系来实现求解目标参数。其原理较简单,但是需要各平台之间保持数据通信且需知各平台之间的位置信息,这对于所要探讨的前出配置的红外预警系统是不合适的,原因如下:

(1) 要探讨的系统是立足于单平台工作的;

(2) 如果采用多站被动测量,则意味着要保持各个站点之间的通信,如果采用有线通信,则实际实施各平台的组网较复杂,不便于实施操作;如果采用无线通信联络,则系统容易遭受敌电磁干扰,且容易暴露自身,这样就可能出现或被敌实施硬杀伤,或造成敌目标逃窜,或被敌软杀伤,最终失去了本系统所具有的独特优势。所以,只研究单平台独立测量的情况。

结合项目研制的实际需要,以红外探测器对目标的响应信息为基础,通过对目标的现在点诸元进行模型构建,建立了一种基于两点的单平台单波段距离估算模型。

1 距离估算模型的构建

构建距离估算模型的前提条件为:

(1) 系统以一定的时间周期 T 实时提供目标的方位角与高低角。由于系统需要对一定空域进行扫描,时间周期 T 较大。

(2) 目标向红外预警平台作匀速直线运动。

由于本系统在相应的火控设备或情报指挥系统配置位置的基础上适当前伸一定距离进行配置,根据参考文献[4],在此距离上,为了保证最大飞行距离通常目标都是以巡航速度飞行,而不是处于攻击地面的机动飞行状态。因此,条件(2)通常可以满足。条件(1)则是由红外系统经过红外图像采集、图像处理得到的,较合理,容易满足。

由于系统接收到的目标信号的光谱特征与目标的距离相关,为此,在模型中融合红外探测器对目标辐射的响应输出,其中包含了目标的距离信息。首先分析探测器对目标的响应电压幅度输出与目标距离

的关系。

由参考文献[5]得知任一光谱区间内探测器产生的信号电压都可以通过对整个区间进行积分得到:

$$V_s = \frac{A_0}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_\lambda \tau_a(\lambda) \tau_0(\lambda) \mathcal{R}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中 A_0 为光学系统入射孔径的面积。

遗憾的是,该式不能直接求解。积分中与目标发动机工作状态、飞行速度等因素相关的目标的红外光谱强度 J_λ 以及与当时大气条件、目标飞行高度和距离有关的光谱透过率 $\tau_a(\lambda)$ 这两个量对红外探测器而言是未知的,而且是不可控、随机变化的。目前的研究水平尚不能得到 J_λ 和 $\tau_a(\lambda)$ 的精确解析表达^[6],所以无法从公式(1)中直接求解目标距离。通过对公式(1)中各变量对探测器产生的信号电压的影响进行分析得出: $S_{J_\lambda}^V = 1$, $S_{\tau_a(\lambda)}^V = 1$, $S_R^V = -2$,显然, R 的变化量比 J_λ 和 $\tau_a(\lambda)$ 的变化量对 V_s 的影响大得多。因此,将与波长有关的各项由积分形式简化为红外探测器光谱通带内的平均值,有利于工程实践。假定光谱通带为一矩形,即在 λ_1 和 λ_2 之间的大气透过率为 τ_0 ,在此区间之外的透过率为零; λ_1 和 λ_2 之间的辐射强度 $J_\lambda d\lambda$ 可用 J 来代替; $\tau_a(\lambda)$ 用与距离和大气衰减系数相关的平均值 τ_a 来代替,由参考文献[1]可得 $\tau_a = e^{-\alpha R}$; $\mathcal{R}(\lambda)$ 用 λ_1 和 λ_2 之间的平均响应度 \mathcal{R} 来代替。通过简化处理,则:

$$V_s = \frac{A_0 J e^{-\alpha R} \tau_0 \mathcal{R}}{R^2} \quad (2)$$

式中 α 为大气衰减系数,可根据现场的气象参数或平均参数计算或查表得到,而

$$\mathcal{R} = \frac{V_n D^*}{(A_d \Delta f)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

式中 A_d 是探测器的面积; Δf 是等效噪声带宽; D^* 是探测器光谱响应度,是 λ_1 和 λ_2 之间的平均值。

大多数红外系统都是响应辐射源规定方向上的一个小立体角内的辐射通量。通常,红外辐射源所发射的辐射能通量的空间角分布很复杂,这给辐射量的计算带来很大的麻烦。

由于现代空袭兵器的尾喷管实际上是被排出的气体加热的圆柱形腔体。用 Gouffé 的术语来说,长度与半径之比 (L/r) 在 3~8 内。因而,可将尾喷管

看成一个黑体辐射源。而黑体精确地遵守朗伯余弦定律,因此,目标在传感器方向的辐射强度 J 、辐射亮度 N 和辐射源在红外探测器方向的面积 A 之间关系为:

$$J = NA$$

在工程计算中,为稳妥起见把空袭武器的发动机看作是辐射系数为 0.9、温度等于排气温度和面积等于喷口面积的灰体。依据斯蒂芬-玻耳兹曼关系,辐射亮度可表示为:

$$N = \frac{0.9\sigma T^4}{\pi}$$

式中 σ 是斯蒂芬-玻耳兹曼常数。可以看出,辐射亮度与辐射源的温度息息相关。我们知道,目标飞行状态的变化势必引起目标发动机温度的相应同向变化。由前提条件目标作匀速直线运动,可知目标的温度变化也不大,因此假定目标的辐射亮度在采样周期内亦不变化,则目标在传感器方向的辐射强度 J 的变化与红外探测器方向的相应目标面积成正比。因此,可得:

$$V_s = \frac{A_0 NA e^{-\alpha R} \tau_0 V_n D^*}{R^2 (A_d \Delta f)^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

令 $l = \frac{A_0 N \tau_0 D^*}{(A_d \Delta f)^{\frac{1}{2}}}$, 并考虑测量的时序关系,则信噪比

$$V_s(t)/V_n(t) = \frac{lA(t)e^{-\alpha R(t)}}{R^2(t)}$$

以红外预警系统所在位置为原点,建立球形坐标系,以周期 T 对目标进行采样。考虑到本系统在探测目标时探测器的视场始终大于目标最大的视角。目标运动轨迹的前两个采样点构成的几何关系如图 1 所示。

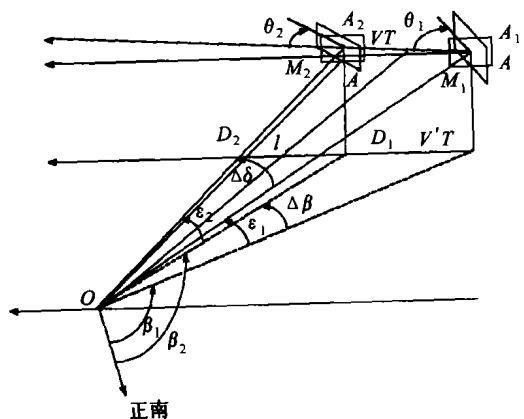


图 1 红外探测器视向面积分析

Fig. 1 Analysis of surface area in infrared detector's sight line

在平面 OM_1M_2 内过点 M_1 作一直线垂直于 OM_1 , 过点 M_2 作一直线垂直于 OM_2 , 则有 θ_1, θ_2 。 D_1 为目标与系统的距离, β_1 为目标相对于系统的以正南为零逆时针旋转的方位角, V 为目标在这两点之间的飞行速度, 建立如下方程组:

$$\begin{cases} V_{s1}/V_{n1} = \frac{lA_1 e^{-\alpha D_1}}{D_1^2} \\ V_{s2}/V_{n2} = \frac{lA_2 e^{-\alpha D_2}}{D_2^2} \\ (VT)^2 = D_2^2 + D_1^2 - 2D_2 D_1 \cos \Delta\delta \\ V = \frac{D_2 + D_1}{2} \cdot \frac{\Delta\delta}{T} \end{cases} \quad (5)$$

方程组 (5) 中 l 为未知的常量, 探测器的信噪比可以由探测器的输出得到。显然 4 个方程不能求解 D_1, D_2, V, A_1, A_2 和 l 共 6 个未知量。由前面的讨论可知 A_1 和 A_2 都与目标的面积有关。通过方程组中前两个方程以及它们与目标面积之间的关系, 可以得到一个方程, 并且把未知常量 l 以及目标面积 A 消掉。这样就可以通过联立三个方程求解目标未知参数 D_1, D_2, V 。

下面分别探讨 A_1, A_2 与目标面积的关系。

在采样的两点, 目标辐射源在探测器方向的面积分别为:

$$A_1 = A \cos \theta_1 \cos \epsilon_1$$

$$A_2 = A \cos \theta_2 \cos \epsilon_2$$

又由于在同一平面 OM_1M_2 内, 有下面的关系式成立:

$$\theta_2 = \theta_1 - \Delta\delta \quad (6)$$

建立方程组:

$$\begin{cases} (V'T)^2 = (D_2 \cos \epsilon_2)^2 + (D_1 \cos \epsilon_1)^2 - 2D_1 \cos \epsilon_1 D_2 \cos \epsilon_2 \cos(\beta_2 - \beta_1) \\ (VT)^2 = (D_2 \sin \epsilon_2 - D_1 \sin \epsilon_1)^2 + (V'T)^2 \\ (VT)^2 = D_2^2 + D_1^2 - 2D_2 D_1 \cos \Delta\delta \end{cases} \quad (7)$$

整理上述方程组可得 $\Delta\delta$ 为:

$$\cos \Delta\delta = \sin \epsilon_1 \sin \epsilon_2 + \cos \epsilon_2 \cos \epsilon_1 \cos(\beta_2 - \beta_1)$$

θ_1 可以通过下式得出:

$$\sin \theta_1 = \frac{D_1^2 + (VT)^2 - D_2^2}{2D_1(VT)} \quad (8)$$

按照三角形正弦定理可得:

$$\cos\theta_1 = D_2 \sin\Delta\delta / VT \quad (9)$$

把方程组(5)按照上面讨论的进行最终处理,记信噪比 $SNR = V_s / V_n$, 得到求解目标距离和飞行速度的方程组为:

$$\begin{cases} \frac{SNR_2}{SNR_1} = \frac{\cos(\theta_1 - \Delta\delta) \cos\epsilon_2 e^{-\alpha D_2} D_1^2}{\cos\theta_1 \cos\epsilon_1 e^{-\alpha D_1} D_2^2} \\ (D_2 + D_1)^2 \Delta\delta^2 = 4D_2^2 + 4D_1^2 - 8D_2 D_1 \cos\Delta\delta \\ \cos\Delta\delta = \sin\epsilon_1 \sin\epsilon_2 + \cos\epsilon_2 \cos\epsilon_1 \cos(\beta_2 - \beta_1) \end{cases}$$

$$\text{式中 } \cos\theta_1 = \frac{2D_2 \sin\Delta\delta}{(D_1 + D_2)\Delta\delta}$$

这样就可以通过上面的方程组求出目标的距离,进而可以确定目标的飞行速度。

2 参数选择

该模型在工程上成功运用的关键在于选择合适的采样周期 T , 并综合考虑如下 4 个因素:

(1) 假定在采样周期 T 内, 忽略目标温度和辐射亮度的变化对探测器输出的影响, 则要求周期 T 值不能太大。

(2) 经过采样周期 T , 目标和探测器之间的距离变化所引起的探测器输出变化经放大和模数转换后要能被鉴别出来, 则要求 T 值不能太小。

(3) 在采样周期 T 内, 应完成模型的运算。

(4) 要考虑 T 值与红外探测器的参数输出时钟以及火控计算机的参数输入时钟是否合拍。

所以 T 值的选择应根据具体情况而定。

3 结束语

本文建立了一个能使单波段低空红外预警系统实现单站被动测距能力的模型。该模型融合了红外探测器对目标辐射响应中所包含的距离信息, 经合理地假设, 消除了未知的目标红外辐射和红外大气衰减的影响。在利用探测器输出的目标角度信息的基础上, 可估算空中目标至红外探测器的距离。

假定了目标的运动模型是匀速运动, 这代表了现实中的主要情况。对于非匀速运动, 仍然需要做大量的工作。

本文是对红外预警系统被动估算距离研究的一个尝试, 后续研究工作将是模型的改进, 即提高模型估算距离的精度并进行工程应用的研究。

参考文献:

- [1] 朱炬波, 周宏潮. 红外警戒系统的运动参数估计算法[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(2): 101-104.
- [2] 姜宏滨. 舰载红外警戒系统中的距离估算[J]. 红外与毫米波学报, 1999, 18(6): 438-441.
- [3] 孙仲康, 周一宇, 何黎星. 单多基地有源无源定位技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [4] 韩挺进, 齐泽强, 高申中, 等. 防空兵新“三打三防”[M]. 北京: 解放军出版社, 2001.
- [5] 小哈德逊 R D. 红外系统原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1975.
- [6] 徐南荣, 卞南华. 红外辐射与制导[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.

欢迎订阅《红外与激光工程》

《红外与激光工程》系中国宇航学会光电技术专业委员会会刊, 由中国航天科工集团公司主管, 创刊于 1972 年, 是国家科委和国家新闻出版署批准的国家级学术刊物, 中国科技论文统计源期刊, 中国无线电电子学、电信技术类核心期刊, 被美国“剑桥科学文摘(CSA)”、英国“科学文摘(SA)”、俄罗斯“文摘杂志(AJ)”收录, 入编中国学术期刊(光盘版), 国内外公开发售。本刊可办理广告业务, 广告经营许可证号: 津工商广字 3-141。

本刊为 A4 开本, 112 页, 全年定价 60 元(含邮费)。邮发代号为 6-133, 欢迎订阅。

联系电话: 022-23666400; 022-23363000 转 3087。