

一种用于红外警戒系统的被动测距方法

钱铮铁

(华中光电技术研究所, 湖北, 武汉, 430073)

摘要 针对匀速直线运动的空中点目标, 利用测量目标辐射照度变化测距原理, 建立了目标模型, 推导了基于此目标模型的测距方程组. 这种测距方法的特点是无需利用目标数据库和假设速度等目标参数, 即可利用红外警戒系统直接测量到的目标角度及光谱辐射照度量解算出目标的距离、速度、辐射强度等参数并经过计算机数据仿真验证了其正确性.

关键词 被动测距, 红外警戒系统, 点目标.

PASSIVE RANGING METHOD FOR IRST SYSTEMS

QIAN Zheng-Tie

(Huazhong Institute of Electro-optics, Wuhan, Hubei 430073, China)

Abstract A passive ranging method for IRST systems aimed at uniform velocity point targets was presented. Target model has been built firstly, then the range equations set based on this model were developed. The peculiarity of this method is that the velocities, ranges and radiant intensities can be worked out, without targets database and supposing the parameters of targets just like velocities, only with the angles and radiations of the targets measured by IRST systems. The computer simulation verifies the validity of the method.

Key words passive ranging, IRST systems, point targets.

引言

红外警戒系统是一种被动红外探测系统, 主要用于同时探测多个空中目标, 并为舰载武器系统提供目标信息^[1]. 但由于其工作方式被动, 使得该系统只能探测到目标的角度量, 而无法直接提供目标的距离、速度等重要参数, 因此被动测距技术成为其关键技术之一^[2,3]. 本文提出的被动测距方法, 其最大特点在于: 不需利用目标数据库和假设速度等目标参数, 而是直接利用红外警戒系统可直接探测到的方位角、俯仰角、辐射量等目标参数, 对不同航向的目标, 计算出其距离、速度及光谱辐射强度.

1 目标模型的建立

红外警戒系统的工作方式为: 一个可探测到目标方位角、高低角及其在某一波长范围内的辐射照度量的红外传感器在水平面内做匀速旋转, 不断探测到并记录下各目标的角度及辐射量, 而本文中测距方程组所需的输入量, 就需要这样连续的三组角

度及辐射量. 在进行测距方程组推导之前, 应首先建立目标模型. 目标模型建立时对目标参数简化如下:

(1) 在测量时间, 对于较远处的目标, 可看作一个具有恒定辐射强度的点源^[5,6];

(2) 由于红外警戒系统探测器的转速较快, 因此在探测到足够计算用的三组目标参数期间, 可认为目标作匀速直线运动.

基于以上条件, 假定目标与探测器的距离为 R , 则其与红外探测器探测到的光谱辐射照度 E_s 之间满足如下关系^[5,6]:

$$E_s = \tau^R \cdot \frac{J_s}{R^2}, \quad (1)$$

式(1)中 τ 为单位长度上的大气透过率, 可由多种方法加以确定, J_s 为目标的光谱辐射强度. 由于探测器只能获得目标灰度量, E_s 的确定可使用标定过的红外探测器, 而当 E_s 在测距方程组中成比例出现时, 由于 E_s 与灰度量成正比, 可直接用灰度量代替^[4]. 目标模型空间几何关系见图1, 图1中P为目标所在点, φ 为高低角, θ 为方位角, P点速度为 V ,

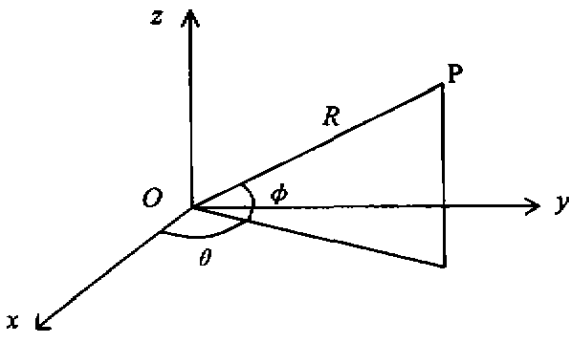


图1 目标角度关系几何图
Fig. 1 Geometric figure for angles of target

x - o - y 平面水平面, 探测器置于坐标原点, 它在水平面作逆时针匀速旋转, 周期为 T .

2 推导测距方程组

根据在探测过程中目标路径的不同, 测距方程组可分为三种类型, 而每种类型中, 由于运动轨迹的细微差别, 例如目标的远离或接近、航向与探测器旋转方向的差异等, 又细分为多种情况, 针对每种类型各取一种情况加以推导, 同种类型不同情况推导过程类似.

2.1 径向运动目标

所谓径向运动, 是指目标沿直线作朝向探测器的匀速运动 (见图 2), 图 2 中 P 、 P_{i+1} 、 P_{i+2} 为探测器连续探测到目标时目标的位置, 此时目标方位角与高低角都保持不变, 但其辐射照度会发生变化, 在 P_i 、 P_{i+1} 、 P_{i+2} 三点的辐射照度值为:

$$E_i = \tau^k \cdot \frac{J_\lambda}{R_i^2}, \quad (2)$$

$$E_{i-1} = \tau^{k_{i-1}} \cdot \frac{J_\lambda}{R_{i-1}^2}, \quad (3)$$

$$E_{i+2} = \tau^{k_{i+2}} \cdot \frac{J_\lambda}{R_{i+2}^2}; \quad (4)$$

若令 t 为目标从 P_{i+2} 点运动至 O 点所需时间, 则有:

$$R_{i-2} = Vt, \quad (5)$$

$$R_{i+1} = Vt + VT, \quad (6)$$

$$R_i = Vt + 2VT; \quad (7)$$

由上述式 (6), 可确定 t 和速度 V :

$$t = \left[\sqrt{\frac{1}{1 - \frac{E_{i-1}}{\sqrt{E_{i+2}} \cdot E_i}}} - 1 \right] \cdot T, \quad (8)$$

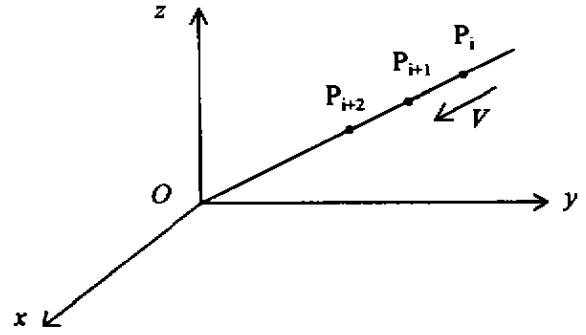


图2 径向运动几何图
Fig. 2 Geometric figure for a radial motion target

$$V = \frac{\ln \left[\left(\frac{(t+T)^2}{t^2} \right) \cdot \left(\frac{E_{i+1}}{E_{i+2}} \right) \right]}{T \cdot \ln(\tau)}, \quad (9)$$

由此得:

$$R_{i+2} = Vt = \frac{\ln \left[\left(\frac{(t+T)^2}{t^2} \right) \cdot \left(\frac{E_{i+1}}{E_{i+2}} \right) \right]}{T \cdot \ln(\tau)} \cdot t, \quad (10)$$

其光谱辐射强度为:

$$J_\lambda = \frac{E_{i+2} \cdot R_{i-2}^2}{\tau^{k_{i+1}}}, \quad (11)$$

2.2 目标高低角变化、方位角保持不变

目标运动时高低角变化、方位角保持不变的情况下, 运动轨迹线不通过探测器, 但它在水平面的投影通过探测器, 现以图 3 为例计算如下: 由图 3 中的三角形关系及正弦定理可得:

$$\frac{2VT}{\sin(\varphi_{i+1} - \varphi_i)} = \frac{R_{i+2}}{\sin(\psi + \varphi_i)}, \quad (12)$$

$$\frac{VT}{\sin(\varphi_{i+1} - \varphi_i)} = \frac{R_i}{\sin(\psi + \varphi_i)}; \quad (13)$$

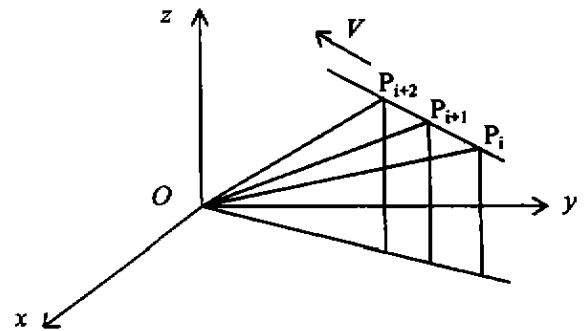


图3 方位角恒定目标几何图
Fig. 3 Geometric figure for the target with constant bearings

其中 ϕ 为目标运动轨迹与水平面的夹角。

式(12)与式(13)相除得:

$$\frac{2\sin(\varphi_{+1} - \varphi)}{\sin(\varphi_{-2} - \varphi)} = \frac{R_{+2}}{R_{-1}}, \quad (14)$$

且由于: $E_{-1} = \tau^{\theta_{-1}} \cdot \frac{J_1}{R_{-1}^2}, \quad (15)$

$$E_{+2} = \tau^{\theta_{+2}} \cdot \frac{J_2}{R_{+2}^2}; \quad (16)$$

于是有:

$$\frac{E_{+1}}{E_{+2}} = \tau^{\theta_{+1} - \theta_{+2}} \left(\frac{R_{-1}}{R_{+1}} \right)^2, \quad (17)$$

即可得到:

$$R_{-2} = \frac{2 \ln[E_{+1} \sin^2(\varphi_{+2} - \varphi)] - \ln[E_{+2} \sin^2(\varphi_{+1} - \varphi)]}{[\sin(\varphi_{-2} - \varphi) - 2\sin(\varphi_{-1} - \varphi)] \cdot \ln \sin(\varphi_{+1} - \varphi)}, \quad (18)$$

进而可得到的目标运动轨迹与水平面的夹角 ϕ :

$$\phi = \arctan \left[\frac{2\sin(\varphi_{+2} - \varphi_{+1})\sin(\varphi_{+1} - \varphi)}{\sin(\varphi_{+2} - \varphi) - 2\sin(\varphi_{-2} - \varphi_{+1})\cos(\varphi_{-1} - \varphi)} \right] - \varphi_{-1}, \quad (19)$$

速度 V :

$$V = \frac{R_{+2} \sin(\varphi_{-2} - \varphi_{-1})}{T \sin \phi}, \quad (20)$$

光谱辐射强度 J_2 :

$$J_2 = \frac{E_{-2} \cdot R_{+2}^2}{\tau^{\theta_{+2}}}, \quad (21)$$

2.3 目标方位角变化

在探测过程中,若目标运动轨迹线及其在水平面内的投影线都不通过探测器,则其方位角与高低角都会发生变化,在极少数情况下,方位角变化而高低角不变,但不影响以下测距方程组的使用,其几何关系见图4。图4中 P'_1, P'_{i+1}, P'_{i-2} 为 P_1, P_{i-1}, P_{i+2} 在水平面内的投影点, α 为运动轨迹线在水平面内的投影直线与 R_i 在水平面内的投影直线之间的夹角, ϕ 为运动轨迹与水平面的夹角。

本文计算仅给出重要中间结果与最终结果。

利用目标投影从 P'_i 运动到 P'_{i+1} 所需时间与探测器从 P'_i 转到 P'_{i+1} 所在角度所需时间相等这一条件,在水平面内角三角形,可得到 α 值:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - (\theta_1 + \theta_2) - \arctan \left[\frac{4\pi - (\theta_1 + \theta_2)}{2\pi - \theta_1}, \frac{\sin \theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2) \sin \theta_2} - \frac{1}{\tan \theta_2} \right], \quad (22)$$

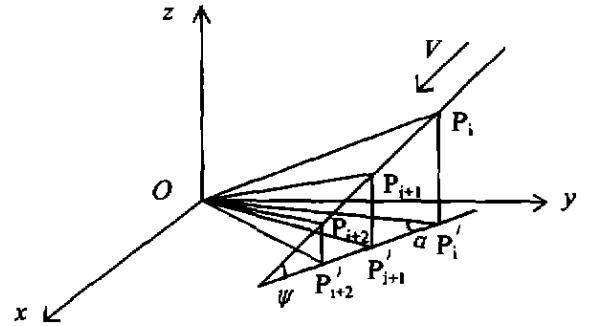


图4 方位角变化目标几何图
Fig. 4 Geometric figure for a target with variant bearings

式(22)中

$$\theta_1 = \theta_{i-1} - \theta_i, \quad (23)$$

$$\theta_2 = \theta_{i+2} - \theta_{i+1}; \quad (24)$$

在此基础之上,可以解得:

$$R_{+2} = \frac{\ln(E_{+1} \sin^2 \alpha \cos^2 \phi) - \ln[E_2 \sin^2(\theta_1 + \theta_2 + \alpha) \cos^2 \varphi_{-2}]}{[1 - \cos \varphi_{+2} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \alpha) \sec \varphi_1 \csc \alpha] \cdot \ln}, \quad (25)$$

$$\phi = \arctan$$

$$\left[\frac{\tan \varphi_1 \sin(\alpha + \theta_1 + \theta_2) - \sin \alpha \tan \varphi_{+2}}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)} \right], \quad (26)$$

$$J_2 = \frac{E_{-2} \cdot R_{+2}^2}{\tau^{\theta_{+2}}}, \quad (27)$$

$$V = \frac{2\pi R_{-2} \sin(\theta_1 + \theta_2)}{T(4\pi - \theta_1 - \theta_2) \sin \alpha \cos \phi}. \quad (28)$$

3 数据验证

数据仿真验证的方法为:预置目标参数,包括初始距离、高低角、光谱辐射强度、速度及航向,探测器回转周期以及大气透过率;再通过计算机模拟解算出此目标在各个时刻的距离、角度及光谱辐射照度,其中高低角、方位角及光谱辐射照度是红外警戒系统可直接测得的量,以这些量作为测距方程组的输入量,将其输出量与预置量相比较即可对该方法的正确性作出判断。

在这里,选取了两个方位角、高低角同时变化目标,每个目标测量连续的三个点,而探测器回转周期皆为1s,每m大气透过率为0.99967,计算机仿真计算结果见表1。由仿真计算结果表明了上述方程的正确性。

表1 计算机仿真数据表
Table 1 Computer simulation data table (单位: (°), m, Wsr⁻¹, m/s, s)

目标	目标设置参数					测距方程组输入值					
	初始距离 R_0	初始高低角 φ_0	夹角 α	速度 V	夹角 ψ	光谱辐射强度 J_s	光谱辐射照度 E			方位夹角 θ	
							E_{i+1}	E_{i-1}	E_i	θ_1	θ_2
目标1	10000	20	30	200	10	500	1.87E-07	2.05E-07	2.25E-07	0.610	0.633
目标2	10000	15	60	400	20	700	2.62E-07	2.93E-07	3.26E-07	1.958	2.031
测距方程组输入值			实际距离 R			测距方程组输出值**					
高低角 φ			R_i	R_{i-1}	R_{i+1}	距离 R_{i+1}	夹角 σ	速度 V	夹角 ψ	光谱辐射强度 J_s	
φ_0	φ_{i+1}	φ_{i-1}									
20.000	20.119	20.300	10000	9828.852	9658.103	9662.696	29.717	201.768	10.114	501.702	
17.000	14.506	11.973	10000	9789.943	9591.834	9735.362	60.162	405.336	19.984	756.224	

说明:

- 为表示方便,表中角度单位为(°),但在代入公式计算时应换算成弧度;
- 表中测距方程组输出值误差的产生是计算时数据截尾造成的。

4 结语

本文采用测量目标辐射照度变化测距原理,推导了目标在各种可能的运动轨迹情况下的距离计算公式,由于不需要假设速度等目标参数,且可计算各种航路的目标,使得该方法拥有较广泛的适应性,仿真结果表明了测距的方程组的正确性。

下一步要进行该方法的工程应用研究,包括测距方程组的简化,噪声和误差对其产生的影响及其消除方法等。

REFERENCES

- [1] Jong A. IRST and its perspective. *SPIE*, 1995, **2552**: 206-213
- [2] Randall P. Kinematic ranging for IRSTs. *SPIE*, 1993, **1950**: 96-104
- [3] Reilly J P, Younkins L T, Taylor R J. Infrared passive ranging using sea background for accurate sensor registration. *SPIE*, 1995, **2469**: 319-329
- [4] JIANG Hong-Bin. Range estimation in shipborne IRST systems. *J. Infrared Millim. Waves* (姜宏滨. 舰载红外警戒系统中的距离估算. *红外与毫米波学报*), 1999, **18** (6): 438-442
- [5] BAI Chang-Cheng, ZHANG Hai-Xing, FANG Hu-Bao. *Infrared Physics*. Beijing: Electronic Industry Press (白长城, 张海兴, 方胡宝. *红外物理*. 北京: 电子工业出版社), 1989, 1-32
- [6] ZHANG You-Wen. *Infrared Optical Engineering*. Shanghai: Shanghai Science & Technology Press (张幼文. *红外光学工程*. 上海: 上海科学技术出版社), 1982, 1-98