

红外警戒系统的运动参数估计算法*

朱炬波 周宏潮

(国防科技大学理学院数学与系统科学系, 湖南, 长沙, 410073)

摘要 通过对目标飞行轨迹的参数化建模, 提出了由红外传感器对目标角度和辐射功率的测量实现对目标距离和其它位置、速度参数估计的算法, 从而可以此作为目标威胁程度估计和目标特性识别的依据. 仿真计算表明, 该方法计算的精度高, 对目标位置的初始先验值依赖程度较小. 该算法也适合于其它测量体制的目标运动参数估计.

关键词 红外传感器, 参数建模, 威胁估计.

ALGORITHM FOR MOTION PARAMETERS ESTIMATION IN IRST SYSTEMS *

ZHU Ju-Bo ZHOU Hong-Chao

(National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Based on parameterized model of target flight orbit, this paper presents an algorithm to estimate target range and other location and velocity via infrared sensor, according to this, target threat degree and target identity can be discriminated. Simulation calculation confirms that this method is more accuracy, and depends less on a priori knowledge of target location initial value. This algorithm can be used for target motion parameter estimation in other measure system.

Key words infrared sensor, parameterized model, threat estimation.

引言

红外警戒系统以被动方式工作, 只有目标高低角和方位角的测量, 没有距离量的测量. 需通过多台交汇才能解算目标的位置, 从而得到目标的距离, 给威胁程度排序. 因此, 红外警戒系统的多目标测距成为该系统发展的关键技术之一. 文献[1, 2]给出了一些测距方法, 文献[3]给出了一个简便的目标距离估算方法, 但该方法依赖于初始距离, 同时对不同的目标飞行特性需要分情况计算, 在实用中不方便, 本文通过对目标的运动轨迹进行参数化建模, 提出了利用非线性回归模型估计方法来估计目标的运动参数.

1 算法

从目标辐射到红外探测器上的目标光谱辐射功率为

$$P_{\lambda} = \frac{J_{\lambda} \tau_a A_0 K}{R^2} = \frac{J_{\lambda} e^{-\alpha R} A_0 K}{R^2}, \quad (1)$$

其中 J_{λ} 为目标的红外光谱辐射强度, τ_a 为大气透过率, α 为大气衰减系数, A_0 为光学系统接收面积, K 为光学系统透过率, R 为目标距离. 从红外警戒系统前处理单元所采集的目标灰度 C 与 P_{λ} 的关系为 $C = a' G P_{\lambda}$, a' 为固定的系数, G 为增益, 本文假设在测量过程中增益不变.

记 $\beta = a' G J_{\lambda} A_0 K$, 并考虑测量的时序关系, 则 $C(t) = \beta \frac{e^{-\alpha R(t)}}{R^2(t)}$, 这里假设目标的方位角不变, 目标向舰艇作匀速直线运动(目标的方位角变化和非匀速直线运动的假设在本文中的讨论是不重要的, 见第3节), 因此^[4]

$$\begin{cases} x(t) = a + bt \\ y(t) = c + dt \\ R(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \end{cases}, \quad (2)$$

红外探测器得到的目标角度测量量为

* 2001 年优秀博士论文作者专项基金(批准号 200140) 和教育部振兴计划骨干教师基金资助项目
稿件收到日期 2002 - 10 - 10, 修改稿收到日期 2002 - 12 - 10

* The project is supported by Special Fund for Author of Excellent Doctor's Degree Dissertation in China (No. 200140) and Sustentation Fund for College Teacher of Ministry of Education
Received 2002 - 10 - 10, revised 2002 - 12 - 10

$$\varepsilon(t) = \arcsin \frac{\gamma(t)}{R(t)}, \tag{3}$$

由测量量 $C(t)$ 、 $\varepsilon(t)$ 和关系式(2)和式(3),得到联合模型

$$\begin{cases} C(t) = \beta \frac{e^{-\alpha R(t)}}{R^2(t)} = f_1(t; \beta, \alpha, a, b, c, d) \\ \varepsilon(t) = \arcsin \frac{\gamma(t)}{R(t)} = f_2(t, \beta, \alpha, a, b, c, d) \end{cases}, \tag{4}$$

式(4)中的参数 α 可根据现场的气象参数或平均参数来计算或查表得到,故式(4)又可表示为

$$\begin{cases} C(t) = f_1(t; \beta, a, b, c, d) \\ \varepsilon(t) = f_2(t; \beta, a, b, c, d) \end{cases}, \tag{5}$$

由式(5)可知,因为有 5 个未知参数,故由单个时刻的测量值是不能求解未知数的. 文献[1]在讨论飞机目标时,假设了 $d=0$,即飞机向舰艇水平飞行,仍有 4 个未知参数,由两个时刻的测量值共可以得到 4 个方程,理论上可以求解方程(5)(文献[3]在具体实施时,是假设已知前一时刻的距离和当前时刻的 $C(t)$ 、 $\varepsilon(t)$,通过一定的几何近似来得到当前时刻的距离). 本文综合考虑了飞机目标和导弹目标,即不对飞行特性式(2)作其它限制.

由式(5),理论上只需 3 个时刻的观测值的非线性方程,就能得到目标的运动参数 a, b, c, d ,从而得到目标至舰艇的距离 $R(t)$. 由于实际中测量存在噪声,以及测量方程中未知参数间的相关性可能较强,它们对运动参数的估计影响较大,因此这里利用多点的测量数据来求解目标运动参数,并考虑有测量噪声的情况.

$$Y = F(\theta) + \eta, \tag{6}$$

其中, $Y = [C(t_1), \varepsilon(t_1), C(t_2), \varepsilon(t_2), \dots, C(t_n), \varepsilon(t_n)]^T$ 为测量数据, $\theta = [\beta, a, b, c, d]^T$ 为未知参数, $F(\theta) = [f_1(t_1; \theta), f_2(t_1; \theta), f_1(t_2; \theta), f_2(t_2; \theta), \dots, f_1(t_n; \theta), f_2(t_n; \theta)]^T$ 为测量关系, $\eta = [\eta_{c_1}, \eta_{\varepsilon_1}, \eta_{c_2}, \eta_{\varepsilon_2}, \dots, \eta_{c_n}, \eta_{\varepsilon_n}]^T$ 为测量随机误差.

对非线性回归模型(6),可用多种方法估计参数 θ ,本文采用 Gauss-Newton 法^[5]. 记 $e(\theta) = Y - F(\theta)$, $V(\theta) = (\frac{\partial F}{\partial \theta_j})$, ($j=1, 2, \dots, 5$), $S(\theta) = \|Y - F(\theta)\|^2 = [Y - F(\theta)]^T [Y - F(\theta)]$ 则 Gauss-Newton 迭代格式为

$$\begin{cases} \text{给定初值 } \theta^{(0)} \\ \theta^{(i+1)} = \theta^{(i)} + [V(\theta^{(i)})^T V(\theta^{(i)})]^{-1} V(\theta^{(i)})^T \\ \quad \cdot [Y - F(\theta^{(i)})], \end{cases} \tag{7}$$

其中 $V(\theta) = [V^T(\theta, t^1), V^T(\theta, t^2), \dots, V^T(\theta, t^n)]^T$,

$$V^T(\theta, t) = \begin{pmatrix} \beta x(t) e^{-\alpha R(t)} \frac{-\alpha R(t) - 2}{R^4(t)} - \frac{\gamma(t)}{R^2(t)} \\ t \beta x(t) e^{-\alpha R(t)} \frac{-\alpha R(t) - 2}{R^4(t)} - t \frac{\gamma(t)}{R^2(t)} \\ \beta y(t) e^{-\alpha R(t)} \frac{-\alpha R(t) - 2}{R^4(t)} - \frac{x(t)}{R^2(t)} \\ t \beta y(t) e^{-\alpha R(t)} \frac{-\alpha R(t) - 2}{R^4(t)} - t \frac{x(t)}{R^2(t)} \\ \frac{e^{-\alpha R(t)}}{R^2(t)} & 0 \end{pmatrix},$$

当 $n \geq 3$, $V(\theta)$ 列满秩,故 $V(\theta)^T V(\theta)$ 是正定矩阵. 由文献[5]中的定理 3.8.2,迭代能收敛到真值.

注 1:在模型(6)的求解中,为了避免模型病态,应对测量数据进行规范化处理.

注 2:为了使模型对飞行特性机动性较强的目标有较好的适应性,可以采用若干点分段实施模型(6)的计算(2.3 节就是采用这种方法仿真的),事实上,若采用两点来计算就基本退化为文献[3]的算法.

注 3:在模型(6)中利用的点数越少,估计结果对测量的随机误差越敏感. 2.1、2.3 节给出了在考虑随机误差情况下的参数估计效果的仿真结果.

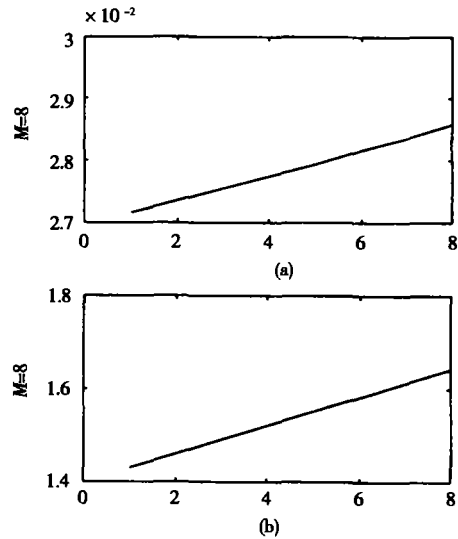


图 1 距离估计的相对误差. 横轴为采样点;纵轴为相对误差,单位:%. (a)为测量元上不考虑随机误差;(b)为测量元上考虑 1% 的随机误差
Fig.1 Relative Error of Range Estimation. Transverse axis: sample point; Vertical axis: relative error, unit: %. (a) measuring element without random error; (b) measuring element with 1% random error.

2 仿真计算

2.1 模型(6)和算法(7)的估计效果仿真

利用模型(6)和算法(7),先仿真产生测量数据(参数值给定如表 1),分别考虑在测量元中没有随机误差和加入随机误差(真实信号的 0.5%)的两种情况下,本文方法的估计效果.

表 1 模型(6)和算法(7)的效果仿真
Table 1 Simulation Result of Model (6) and Algorithm (7)

	真值	50	-0.8	5	0.8	1
测量元中加入随机误差	估计值	49.3	-0.8	4.9	0.8	0.9
	相对误差	1.4%	0.5%	2.2%	0.4%	9.7%
测量元中没有随机误差	估计值	50	-0.8	5	0.8	1
	相对误差	0.03%	0.02%	0.03%	0.03%	0.2%

2.2 参数初值的选取对估计结果的影响

本例考虑在目标不同运动参数情况下,改变初值对运动参数估计结果的影响. 结果见表 2. 其中参数 a, c 的单位为 km , b, d 的单位为 km/s . 从表 2 可以知道,初值的变化对估计结果的影响不大,模型(6)对初值的依赖程度低,在实际中完全可以满足需要.

2.3 测量点的个数对估计的影响

在测量量上加入随机误差(约为真实值的 1%),考虑在模型(6)中用的测量点的个数对目标

表 2 初值的改变对回归模型(6)估计结果的影(不考虑测量随机误差)

Table 2 The Initial Value Influence on Estimation of Regression Model(6) (without measured random error)

	a	b	c	d
真值(1)	50	-0.8	5	0.8
初值 1	25	-0.56	3.5	0.56
相对误差	0.5812%	0.3040%	2.0839%	0.4644%
初值 2	35	-0.64	4	0.64
相对误差	0.3429%	0.0058%	0.0321%	0.4624%
真值(2)	40	-0.9	6	0.7
初值 1	20	-0.54	0.36	0.42
相对误差	1.3280%	1.1518%	1.5681%	1.2809%
初值 2	35	-0.72	4.8	0.56
相对误差	0.2358%	0.4339%	1.8573%	0.1828%
真值(3)	30	-0.5	4	0.6
初值 1	15	-0.3	2.4	0.36
相对误差	0.5617%	0.6070%	1.1518%	0.9244%
初值 2	18	-0.35	2.8	0.42
相对误差	0.5050%	0.0573%	0.7267%	0.5310%

距离估计的影响.

从该图我们可以知道,当用 $M=3$ 点估计时,距离估计的相对误差约为 20%, $M=5$ 时约为 15%.

3 结论

本文通过建立目标运动的参数化方程,得到了测量量与运动参数的非线性回归方程,给出了运动参数的估计算法,从而得到目标至传感器的距离以及目标的速度等重要参数,为建立目标的威胁估计奠定了良好的基础.

我们假定了目标的运动模型是匀速度运动式

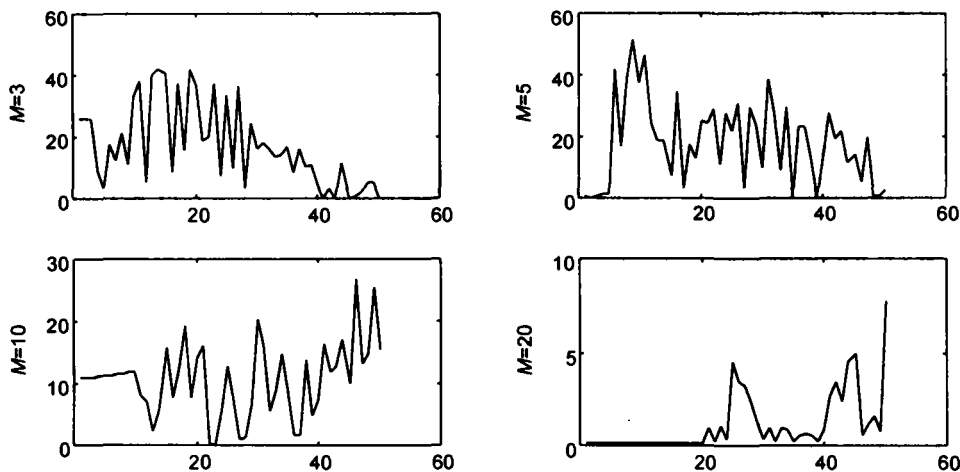


图 2 距离估计的相对误差图(横轴为采样点;纵轴为相对误差,单位为%)

Fig. 2 Relative Error of Range Estimation. (Transverse axis; sample point; Vertical axis; relative error, unit 1%)

(2),这代表了实际中的主要情况,对于非匀速运动,可类似地建立非线性回归模型(6),但模型的求解需要更多的测量值.在实际中的运动模型用一次样条函数来表示可能更为精确.

致谢:本文的计算是在国防科技大学数学技术试验室完成的,在此表示感谢!

REFERENCES

- [1] Dalmia A K, Trivedi M. Target ranging using passive sensing approaches. *SPIE*, 1995, **2469**: 363—370
- [2] Reilly J P, Younkings L T, Taylor R J. Infrared passive ranging using sea background for accurate sensor registration. *SPIE*, 1995, **2469**: 318—329
- [3] JIANG Hong-Bin. Range estimation in ship-borne 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—441
- [4] WANG Zheng-Ming, ZHU Ju-Bo. Reduced parameter model on trajectory tracking data with applications. *Science in China (Series E)*, 1999(2): 190—199
- [5] WANG Zheng-Ming, YI Dong-Yun. *Model and Parameters Estimation on Measured Data*. Changsha: National University of Defense Technology Press (王正明,易东云. *测量数据建模与参数估计*.长沙:国防科技大学出版社), 1996