

基于可测度分析的雷达系统误差估计*

杨宏文 郁文贤 胡卫东 吴建辉

(国防科技大学电子工程学院 长沙 410073)

摘要 建立了多部雷达情况下的系统误差观测模型,分析了系统的可观测度,得出可观测度不一定随观测数据的增多而增强的结论。在此基础上,通过数据筛选的方法,可以获得一个使系统可观测度增大的观测子集,用于误差估计。实验结果表明,使用本文的方法,可确保估计算法的有效性。

关键词 观测模型,系统误差,最小二乘,可观测度

分类号 TN95

Radar Systematic Error Estimation Based On the Analysis Observability

Yang Hongwen Yu Wenxian Hu Weidong Wu Jianhui

(Institute of Electronic Engineering, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract In this paper, a systematic error observation model for multiple radars is established, on the basis of which the system observability is analyzed and a conclusion is drawn that measurement accumulation does not always lead to higher observability. According to the conclusion a measurement subset can be produced by means of data selection, which causes higher system observability, to estimate the systematic error. Simulation result shows that the method proposed in this paper can ensure the validity of estimation algorithm.

Key words observation model, systematic error, least square, observability

在多传感器融合跟踪系统中,系统误差的存在将直接影响多传感器的关联融合过程。为获得更好的跟踪性能,必须估计传感器的系统误差。雷达系统误差估计一般分为两种方式,第一种方式是对雷达观测数据和理想的目标位置数据作比较,从而估计出雷达的系统误差^[1]。这种情况下,由于系统能够提供高精度的参考数据,估计效果通常都比较好;第二种方式则利用多部雷达对同一目标的观测数据进行对比,估计各雷达的系统误差。这种方式又可分为联合估计和独立估计两类方法,其中联合估计方法把雷达的系统误差和目标的运动状态结合在一起进行考虑,系统边跟踪目标边估计雷达的系统误差,两部分交互作用,这类方法一般以平滑目标的航迹为目的^[2,3],在系统误差比较简单时,也能估计出雷达的系统误差^[4,5]。本文所要分析的是独立估计方法,这种方法把系统误差估计从目标跟踪过程中分离出来,使误差估计部分和目标跟踪部分相互独立。

实际的误差估计系统中,误差分量比较复杂,系统观测一般为不完全观测,所以,系统普遍存在不同程度的可观测问题,而在以往文献中^[6~8],都没有对系统的可观测度作深入的分析。针对这种情况,本文建立了多个雷达源的系统误差观测模型,在此基础上分析系统的可观测度,发现观测数据的增多并不一定意味着系统可观测度的增强。基于这一结论,我们对观测数据进行筛选,得到一个使系统可观测度比较高的观测子集,用于系统误差估计。文章最后以两部雷达为例,对算法作仿真分析。仿真结果表明,和原观测集相比,使用筛选产生的观测子集,能够获得更优越的估计性能。

1 雷达测量误差和坐标系统

根据文献[9],方位误差可表示为一个常量加上随机噪声

$$\delta_{\theta} = \delta_{\theta_0} + v_{\theta}(t) \quad (1)$$

* 国家部委基金资助项目
1999年6月21日收稿
第一作者:杨宏文,男,1971年生,博士生

δ_{θ} 是方位测量的系统误差, $v_{\theta}(t)$ 是高斯白噪声。测距误差为

$$\delta_r = \delta_{rb} + \delta_{rg}R + v_r(t) \tag{2}$$

δ_{rb} 是斜距测量固有误差, δ_{rg} 是斜距测量的增益误差, R 是目标和雷达间的实际斜距, 而 $v_r(t)$ 是高斯白噪声。假定上述两个方程中的所有参数相互独立。

为了便于各传感器之间的数据进行比较, 本文采用图1的坐标系为通用坐标系。雷达对目标的观测值可表示为

$$R_a = R_{er} + R_{rt} \tag{3}$$

式中

$$R_{er} = (R_j + h_r) \begin{bmatrix} \sin B_r \\ -\cos B_r \sin L_r \\ \cos B_r \cos L_r \end{bmatrix} \tag{4}$$

表示从地心到雷达天线的向量,

$$R_{rt} = RP_{er} \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta \\ \cos \varphi \sin \theta \\ \sin \varphi \end{bmatrix} \tag{5}$$

表示雷达天线到被跟踪目标的向量。 B_r 是雷达的纬度, L_r 是雷达的东经经度, R_j 是到海平面的地球半径, h_r 是雷达高出海平面的高度, θ 是方位角, φ 是目标的仰角, P_{er} 为雷达坐标系到通用坐标系的坐标变换矩阵。

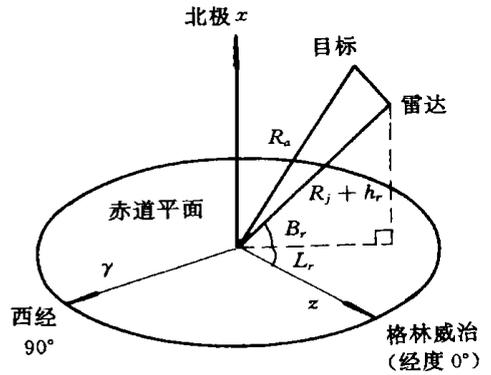


图1 通用坐标系

Fig.1 Uniform coordinate system

2 系统误差的观测模型

状态向量 X 表示 N 部雷达的系统误差,

$$X = [X^1 \ X^2 \ \dots \ X^i \ \dots \ X^N]^T \tag{6}$$

其中 $X^i = [\delta_{rb} \ \delta_{rg} \ \delta_{\theta}]$ 表示第 i 部雷达的系统误差; 设 k 时刻雷达 i 的距离、俯仰角和方位角观测值分别为 $r_c^i(k)$ 、 $\varphi^i(k)$ 和 $\theta^i(k)$, 转换到直角坐标系为 $Z^i(k)$,

$$Z^i(k) = \begin{bmatrix} r_c^i(k) \cos \varphi^i(k) \cos \theta^i(k) \\ r_c^i(k) \cos \varphi^i(k) \sin \theta^i(k) \\ r_c^i(k) \sin \varphi^i(k) \end{bmatrix} \tag{7}$$

令 $Z(k)$ 表示 k 时刻雷达系统误差的观测向量, 系统误差的观测模型为

$$Z(k) = \begin{bmatrix} P_{er}^2 Z^2(k) + Z_{cr}^2 - \{P_{er}^1 Z^1(k) + Z_{cr}^1\} \\ P_{er}^i Z^i(k) + Z_{cr}^i - \{P_{er}^1 Z^1(k) + Z_{cr}^1\} \\ P_{er}^N Z^N(k) + Z_{cr}^N - \{P_{er}^1 Z^1(k) + Z_{cr}^1\} \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中 P_{er}^i 表示雷达 i 的坐标系到通用坐标系的坐标变换矩阵; Z_{cr}^i 表示雷达 i 在通用坐标系中的坐标。对(8)式的观测模型线性化^[1], 结合(1)~(3)式, 可得

$$Z(k) = H_k X + M_k V(k) \tag{9}$$

式中 $H_k = \frac{\partial Z(k)}{\partial X} \Big|_{\substack{X=0 \\ V(k)=0}}$ 、 $M_k = \frac{\partial Z(k)}{\partial V(k)} \Big|_{\substack{X=0 \\ V(k)=0}}$ 为观测方程的系数矩阵, $V(k) = [V^1(k) \ \dots \ V^i(k) \ \dots \ V^N(k)]^T$ 为 N 部雷达的观测噪声向量, $V^i(k) = [v_r^i(k) \ v_{\varphi}^i(k) \ v_{\theta}^i(k)]$ 表示雷达 i 的观测噪声向量。

3 可观测度分析

令 $Q_k = \{M_k \text{cov}[V(k)]M_k^T\}^{-1}$, 则根据(9)式的观测方程, 可以得到 n 时刻系统误差向量的加权最小二乘估计 $\hat{X}^{wls}(n)$,

$$\hat{X}^{wls}(n) = \left[\sum_{k=1}^n H_k^T Q_k H_k \right]^{-1} \left[\sum_{k=1}^n H_k^T Q_k Z_k \right] \quad (10)$$

令 $A(n) = \sum_{k=1}^n H_k^T Q_k H_k$, $A(n)$ 可逆时, 解向量 $\hat{X}^{wls}(n)$ 的精确度取决于矩阵 $A(n)$ 的条件数^[10], 条件数大时, 观测向量因噪声引起的小扰动会造成解的大振动, 因此系统误差的观测度可定义为

$$Deg(n) = \frac{1}{\text{cond}_2\{A(n)\}} = \frac{\min_j \lambda\{A(n)\}}{\max_j \lambda\{A(n)\}} \quad (11)$$

式中, $\text{cond}_2\{A(n)\}$ 、 $\lambda\{A(n)\}$ 分别表示矩阵 $A(n)$ 的条件数和特征值。 $Deg(n)$ 越大, 表示系统的可观测度越强, 反之则越弱。

利用(11)式的可观测度定义, 对系统进行分析, 我们发现系统的可观测度并不一定随 n 值的增大而增强, 有时反而变差。造成这一现象的主要原因是观测数据在观测空间分布不平衡, 即观测点在部分观测区域分布相对密集。

4 数据筛选与仿真实验

根据上述分析, 可以得出这样一个结论: 观测数据集存在一个使系统的可观测度达到最强的子集, 利用该观测子集求解雷达的系统误差, 可以获得更可靠的估计结果。要找到这个子集, 必须对观测集的所有子集计算系统的可观测度, 而一个 n 元素集合具有 2^n 个子集, 所以这种方法计算量太大。为此, 我们采用对观测集内数据剔除的方法, 产生一个次优的观测子集, 用于误差估计。剔除准则为:

$$Deg(k) < Deg(k - 1) \quad (12)$$

即剔除一组数据必须使系统可观测度增强, k 为当前观测集内的元素数量。算法具体流程如下:

- (a) 假设总共进行了 n 次观测, 令 $k = n$, 计算 $A(k)$, 置 $m = 1$;
- (b) 从 $A(k)$ 中减去第 m 次观测所得数据, 得 $A(k - 1)$;
- (c) 分别根据 $A(k)$ 和 $A(k - 1)$ 计算系统误差的观测度 $Deg(k)$ 和 $Deg(k - 1)$, 如果 $Deg(k) < Deg(k - 1)$, 则把第 m 次观测数据从观测集中删除出去, $A(k) = A(k - 1)$, $k = k - 1$; 否则 k 、 $A(k)$ 和观测集保持不变。

(d) $m = m + 1$ 重复步骤(b)、(c), 遍历所有的观测数据, 最后得到的观测集就是一个次优的观测子集。

本文以两个雷达源的情况为例, 使用模拟数据对算法进行了测试。图2给出了雷达的位置和两条飞行路径, 设目标高度为 6km, 雷达扫描周期为 2s, 距离测量噪声标准偏差为 0.1km, 方位和俯仰角的测量噪声标准偏差为 8, 7mrad, 航迹同步时采用简单卡尔曼滤波算法。系统误差估计采用(10)式的最小二乘法。对两条飞行路径各作 1000 次 Monte-Carlo 仿真, 分别采用原观测集和筛选产生的观测子集, 估计两部雷达的系统误差, 结果显示如表 1, 路径 1 的实验中距离固有误差和距离增益误差的估计精度在数据筛选后变化不大, 但方位角偏差的估计精度明显变好; 路径 2 的实验中, 数据筛选前估计算法不能收敛, 筛选后却能够获得很好的估计结果。

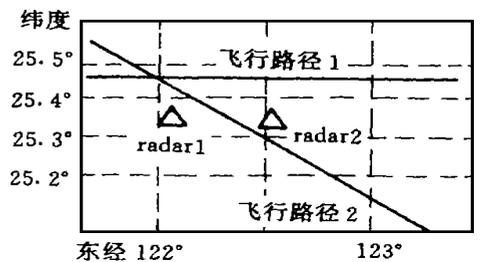


图2 模拟飞行路径
Fig. 2 Simulation flying path

5 结论

本文在系统误差的线性观测模型基础上,分析了系统的可观测度,得出系统可观测度与观测数据的多少存在不定性关系的结论。依据这个结论,我们对观测数据进行筛选,产生一个使系统可观测度较强的观测子集,最后的仿真实验表明:使用筛选子集比采用原观测集的估计性能更优。

表1 系统误差估计的仿真结果比较

Tab. 1 Comparison of simulation result of systematic error estimation

			$\delta_{rb}(m)$	$\delta_{rg1}(\%)$	$\delta_{\theta 1}(mrad)$	$\delta_{rb2}(m)$	$\delta_{rg2}(\%)$	$\delta_{\theta 2}(mrad)$	
雷达实际系统误差			1000	0.5	8.7	1000	0.4	14	
蒙特卡洛仿真	路径一	用原集	均值	989	0.52	5.1	1004	0.42	10
		估计	标准差	18	0.014	0.78	18	0.016	0.84
		用筛选	均值	995	0.51	8.4	995	0.42	13.7
		集估计	标准差	25	0.03	1.0	22	0.022	0.9
	路径二	用原集	均值	942	0.65	5.5	964	0.55	10.3
		估计	标准差	57	0.14	0.9	48	0.14	0.996
		用筛选	均值	989	0.52	8.5	993	0.429	13.5
		集估计	标准差	42	0.079	1.0	30	0.069	1.067

参考文献

- 1 J nsd ttir I. Integrity Monitoring and Estimation of Systematic Errors in radar Data Systems. Master's thesis, The University of Iceland, Systems Engineering Laboratory, 1994
- 2 Zhou Y, Leung H, Chan C. A Two-step Extended Kalman Filter Fusion Approach for Misalignment Sensors. Proceedings of the international Conference on multisource-multisensor information fusion, Las Vegas, 1998: 54 ~ 58
- 3 Alouani A T, Rice T R, Blair W D. A Two-Stage Filter for State Estimation in the Presence of Dynamical Stochastic Bias. Proceedings of the American Control Conference, 1992: 1784 ~ 1788
- 4 Friedland B. Treatment of Bias in Recursive Filtering. IEEE Transactions on Automatic Control AC-14, 1969: 359 ~ 367
- 5 Dhar S. Application of a recursive method for registration error correction in tracking with multiple sensors. Proceedings of the American Control Conference, San Francisco, 1993, WP9-15: 30
- 6 Ficher W L, Muche C E, Cameron A G. Registration Errors in a Netted Air Surveillance System. Technical Note 1980-40, MIT Lincoln Laboratory
- 7 Helmick R E, Rice T R. Removal of alignment errors in an integrated system of two 3-D sensors. IEEE Trans. AES, 1993, AES-29: 1333 ~ 1343
- 8 Leung H, Blanchette M, Gault K. Comparison of registration error correction techniques for air surveillance radar network. Proceedings of SPIE on Signal and Data Processing of Small targets, San Diego, 1995, 2561: 498 ~ 508
- 9 Radar Surveillance in En-Route Airspace and Major Terminal Areas. proposed EUROCONTROL standard document, EUROCONTROL, 1994
- 10 Ciarlet P G 著. 矩阵数值分析与最优化. 胡健伟译. 北京: 高等教育出版社, 1985