雷达与 IFF背靠背配置时的关联算法

阎红星 王晓博
(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191) (海军装备研究院, 北京 102249)
王国宏 王晨熙
(海军航空工程学院, 烟台 264001) (海军装备研究院, 北京 102249)

摘 要: 对于雷达与 IFF(Identification Friend or Foe)背靠背配置时的关联问题,提出了关联算法. 主要包括雷达航迹与 IFF点迹的时间对准、判别函数构造、关联判决准则选择和关联判决门限设置等,并讨论了多义性问题. 4种典型情况下的仿真结果表明,目标间隔与目标到雷达距离之比越大时,关联效果越好;目标交叉时,离交叉点越近,关联效果越差;目标机动阶段时间对准采用雷达航迹平滑的关联效果优于航迹预测,其它情况下采用两种时间对准方法的关联效果相近;在 NED(North East Down)坐标系和极坐标系下的关联效果相近; *n*/*m* 逻辑应选择 2/3或 3/4,以同时保证对友方目标的漏关联概率和不明目标的误关联概率都较低.

关 键 词: 雷达; IFF; 背靠背配置; 关联;
中图分类号: TN 95
文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)07-0869-04

Algorithm of radar-IFF correlation in back-to-back configuration

Yan Hongxing
(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)
Wang Xiaobo
(Navy Armament Academy, Beijing 102249, China)
Wang Guohong
(Naval Aeronautical and Astronautic University, Yantai 264001, China)
Wang Chenxi
(Navy Armament Academy, Beijing 102249, China)

Abstract: To solve the problem of radar-IFF correlation in back-to-back configuration, an algorithm was discussed, mainly including time-alignment between radar tracks and identification friend or foe (IFF) points, construction of discriminate functions, choice of the decision-making rule, and computation formula of decision thresholds. Moreover, the problem of ambiguity was also discussed. Simulation results in four typical conditions show that, with the greater ratio of target interval to range from target to radar, the better performance is; when it comes to target cross, the closer to the crossing, the worse the correlation is; when target maneuvering, time registration realized by track smoothing better than track predicting, while, in other conditions, the correlation results produced by these two methods are similar. Moreover, the correlation performance obtained in north east down (NED) coordinate system is almost the same as that in polar coordinate system. There, *n*/*m* logic should be chosen as 2/3 or 3/4 in order to promise both the missing correlation probability of friendly target and the false correlation probability of unknown target are low.

Key words: radar; identification friend or foe; back-to-back configuration; correlation

收稿日期: 2008-06-03
项目项目: 国家自然科学基金资助项目 (60541001)
作者简介: 阎红星 (1965 -),男,陕西渭南人,博士生, yanhongxing816@sina.com.

雷达与 IFF(Identification Friend or Foe)的关联属于异类传感器信息融合的范畴,在现代综合电子战中有重要应用[1-6].雷达与 IFF的关联主要有正常配置时的关联和背靠背配置(IFF系统的应答信号的所在方位与雷达目标回波方位不一致)时的关联两种情况.现有文献[2-6]中,对雷达与 IFF关联的研究较少,都未给出具体的雷达与 IFF的关联算法,更未涉及雷达与 IFF背靠背配置时的关联问题的研究.

本文研究了 3D雷达与 IFF背靠背配置时的关联问题,将该问题转化成一假设检验问题进行处理.首先,对雷达航迹和 IFF点迹进行了时间对准;然后,基于卡方分布检验的思想,建立了关联判别函数,并给出了关联判决规则及判决门限的计算方法,还讨论了多义性问题.

1 关联算法

1.1 问题描述

判决 l时刻雷达点迹是否与 IFF点迹关联,可以看作是对下列两个对立假设的检验:

H_0:雷达点迹和 IFF点迹属于同一目标;

H_1:雷达点迹和 IFF点迹不属于同一目标.

这样雷达与 IFF的关联问题便转换成了假设检验问题.

1.2 时间对准

本文中时间对准的方法是将雷达航迹进行预测或平滑.由于对于静止、慢速运动和沿雷达径向运动的目标,雷达航迹与 IFF点迹相差约半个周期,因而为简化问题分析,假定雷达航迹预测或平滑的时间为半个周期.

雷达航迹进行时间对准的状态方程为

$$\boldsymbol{X}(t_i \mid t_j) = \boldsymbol{F}\boldsymbol{X}(t_j \mid t_j) \tag{1}$$

其中,$\boldsymbol{X}(t_i \mid t_j)$为时间对准至 t_i时刻的目标在雷达的 NED(North East Down)坐标系中的坐标;$\boldsymbol{X}(t_j \mid t_j)$为 t_j时刻目标的滤波值.当时间对准采用航迹预测时,$t_i - t_j = T/2$(T为雷达的采样周期);采用航迹平滑时,$t_j - t_i = T/2$. $\boldsymbol{F}$为状态转移矩阵,表达式如下:

$$\boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_1 & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{F}_1 & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{F}_1 \end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{F}_1 = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{1}{2}\Delta t^2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中,航迹预测时,$\Delta t = T/2$,航迹平滑时,$\Delta t = -T/2$.

与式(1)对应的协方差为

$$\boldsymbol{P}(t_i \mid t_j) = \boldsymbol{F}\boldsymbol{P}(t_j \mid t_i)\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{\Gamma}\boldsymbol{Q}(t_j)\boldsymbol{\Gamma}^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

其中,$\boldsymbol{P}(t_i \mid t_j)$,$\boldsymbol{Q}(t_j)$为 t_j时刻目标的滤波协方差和过程噪声协方差;$\boldsymbol{\Gamma}$为过程噪声分布矩阵,表达式如下:

$$\boldsymbol{\Gamma} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Gamma}_1 & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{\Gamma}_1 & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{\Gamma}_1 \end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{\Gamma}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\Delta t^2 \\ \Delta t \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

1.3 关联判别函数

3D雷达可以获得目标的距离、方位和俯仰,而 IFF点迹主要包含下列信息:目标的距离、方位、高度和属性.关联可以在 NED坐标系下进行,也可以在极坐标系下进行,受篇幅所限,本文仅构建 NED坐标系下的关联判别函数.为简化问题分析,假定雷达的滤波误差服从零均值高斯分布,且与 IFF的位置误差相互独立,并将式(1)、式(3)中时间对准后的状态向量和滤波协方差分别记为:$\boldsymbol{X}_R(l)$和 $\boldsymbol{P}_R(l)$.

定义 NED坐标系下 3D雷达与 IFF的关联矢量差 $\boldsymbol{v}_1(l)$为

$$\boldsymbol{v}_1(l) = \boldsymbol{X}_R(l) - \boldsymbol{X}_{\mathrm{IFF}}(l) \tag{5}$$

其中,$\boldsymbol{X}_{\mathrm{IFF}}(l)$为 IFF得到的目标在 NED坐标系中的坐标,即

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{IFF}}(l) = \begin{bmatrix} x_{\mathrm{N.\ IFF}}(l) \\ x_{\mathrm{E.\ IFF}}(l) \\ x_{\mathrm{D.\ IFF}}(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{\mathrm{IFF}}(l)\cos\theta_{\mathrm{IFF}}(l)\cos\varepsilon_{\mathrm{IFF}}(l) \\ \rho_{\mathrm{IFF}}(l)\sin\theta_{\mathrm{IFF}}(l)\cos\varepsilon_{\mathrm{IFF}}(l) \\ -\rho_{\mathrm{IFF}}(l)\sin\varepsilon_{\mathrm{IFF}}(l) \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中,$\rho_{\mathrm{IFF}}(l)$,$\theta_{\mathrm{IFF}}(l)$分别为 IFF得到的目标距离和方位,由于 IFF不能直接得到目标的仰角 $\varepsilon_{\mathrm{IFF}}(l)$,但可以获得目标的高度 $h_{\mathrm{IFF}}(l)$,因而 $\varepsilon_{\mathrm{IFF}}(l)$可以由下式得到:

$$\varepsilon_{\mathrm{IFF}}(l) = \arcsin\left(\frac{h_{\mathrm{IFF}}(l) - h_{\mathrm{a}}}{\rho_{\mathrm{IFF}}(l)} - \frac{\rho_{\mathrm{IFF}}(l)}{2R_{\mathrm{e}}}\right) \tag{7}$$

其中,h_{a}为雷达天线高度;R_{e}为等效地球半径,约为 8 500 km.

由式(7)可得

$$\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{IFF}}(l) = \left\{\frac{-[2R_{\mathrm{e}}(h_{\mathrm{IFF}}(l) - h_{\mathrm{a}}) + \rho_{\mathrm{IFF}}^2(l)]}{2R_{\mathrm{e}}\rho_{\mathrm{IFF}}^2(l)}\mathrm{d}\rho_{\mathrm{IFF}} + \frac{1}{\rho_{\mathrm{IFF}}(l)}\mathrm{d}h_{\mathrm{IFF}}\right\} \Bigg/ \sqrt{1 - \left(\frac{h_{\mathrm{IFF}}(l) - h_{\mathrm{a}}}{\rho_{\mathrm{IFF}}(l)} - \frac{\rho_{\mathrm{IFF}}(l)}{2R_{\mathrm{e}}}\right)^2} \tag{8}$$

则与式(7)对应的仰角误差协方差为

$$\sigma^2_{\varepsilon,\,\mathrm{IFF}}(l) = \left\{ [2R_e(h_{\mathrm{IFF}}(l) - h_a) + \rho^2_{\mathrm{IFF}}(l)]^2 \cdot \sigma^2_{\rho,\,\mathrm{IFF}} + 4R_e^2\rho^2_{\mathrm{IFF}}(l)\sigma^2_{h,\,\mathrm{IFF}} \right\} \Big/ \left\{ 4R_e^2\rho^4_{\mathrm{IFF}}(l)\left[1 - \left(\frac{h_{\mathrm{IFF}}(l) - h_a}{\rho_{\mathrm{IFF}}(l)} - \frac{\rho_{\mathrm{IFF}}(l)}{2R_e} \right)^2 \right] \right\} \tag{9}$$

其中,$\sigma^2_{\rho,\,\mathrm{IFF}}$和 $\sigma^2_{h,\,\mathrm{IFF}}$分别为 IFF的目标距离和高度误差方差.

与式 (5)对应的协方差 $P_1(l)$为

$$P_1(l) = P_{\mathrm{R}}(l) + P_{\mathrm{IFF}}(l) = \begin{bmatrix} \sigma^2_{N,\mathrm{R}}(l) & \sigma_{NF,\mathrm{R}}(l) & \sigma_{ND,\mathrm{R}}(l) \\ \sigma_{NE,\mathrm{R}}(l) & \sigma^2_{E,\mathrm{R}}(l) & \sigma_{ED,\mathrm{R}}(l) \\ \sigma_{ND,\mathrm{R}}(l) & \sigma_{ED,\mathrm{R}}(l) & \sigma^2_{D,\mathrm{R}}(l) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma^2_{N,\,\mathrm{IFF}}(l) & \sigma_{NE,\,\mathrm{IFF}}(l) & \sigma_{ND,\,\mathrm{IFF}}(l) \\ \sigma_{NE,\,\mathrm{IFF}}(l) & \sigma^2_{E,\,\mathrm{IFF}}(l) & \sigma_{ED,\,\mathrm{IFF}}(l) \\ \sigma_{ND,\,\mathrm{IFF}}(l) & \sigma_{ED,\,\mathrm{IFF}}(l) & \sigma^2_{D,\,\mathrm{IFF}}(l) \end{bmatrix} \tag{10}$$

由式 (5)、式 (10)可构造 NED坐标系下 3D雷达与 IFF的关联判别函数 $\eta_1(l)$:

$$\eta_1(l) = \nu_1^{\mathrm{T}}(l)\,P_1^{-1}(l)\,\nu_1(l) \tag{11}$$

1.4　关联判决规则

在得到雷达与 IFF关联的判别函数后,进行两级判决:

1) 在 l时刻,将 IFF应答信号与雷达航迹进行关联判决,即:若关联判别函数 $\eta_i(l)$ $(i = 1, 2) \le T_S$ (关联判决门限),则接受原假设 H_0,即判定该时刻 3D雷达与 IFF关联;否则,不关联;

2) 采用 n/m逻辑最终确定雷达与 IFF是否关联.

1.5　关联判决门限

雷达与 IFF的关联判决门限 T_S选择的原则是使 2)判决后的漏关联概率 α一定,则 1)判决后的漏相关概率为

$$p = f^{-1}(\alpha) \tag{12}$$

由于原假设 H_0成立时关联判别函数 $\eta_i(l)$服从自由度为 3的 χ^2分布,即可得到 3D雷达与 IFF关联的决策门限 T_S,即

$$T_S = \chi^2_p(3) \tag{13}$$

其中,$\chi^2_p(3)$为自由度为 3的 χ^2分布的上 p分位点.

1.6　多义性处理

所谓多义性是指在 l时刻,满足上述关联判决规则的雷达航迹与 IFF点迹配对不唯一,这时需要做进一步的判决.处理框图如图 1所示.

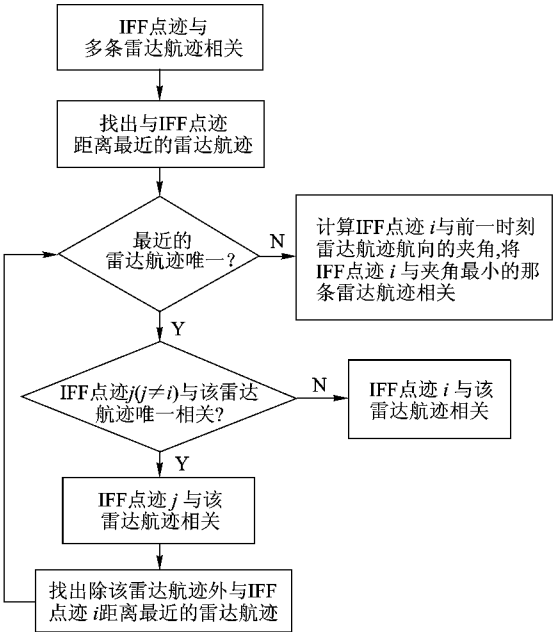

图 1　多义性处理框图

2　仿真实验

2.1　仿真条件

假定舰载 3D雷达对两个目标进行跟踪,T = 5 s,$\sigma_{\rho,\mathrm{R}}$ = 50 m,$\sigma_{\theta,\mathrm{R}}$ = 0.2,$\sigma_{\varepsilon,\mathrm{R}}$ = 0.3,h_a = 20 m.舰艇作匀速直线运动,速度为 10 m/s $\sigma_{\rho,\,\mathrm{IFF}}$ = 120 m,$\sigma_{\theta,\,\mathrm{IFF}}$ = 0.5°,$\sigma_{h,\,\mathrm{IFF}}$ = 80 m[2].两目标中,目标 1为我方目标,可对 IFF的询问信号做出应答,目标 2为不明目标,不能做出应答.将目标运动分为 4种情况.情况 1时两目标匀速直线、平行运动、间距较大;情况 2时两目标匀速直线、平行运动、间距较小;情况 3时两目标匀速直线、交叉运动;情况 4时两目标机动.

仿真中,n/m逻辑有 3种: 2/3、3/3和 3/4,α = 0.05,Monte Carlo仿真进行 1 000次.情况 1时的雷达和目标的初始位置如图 2所示.

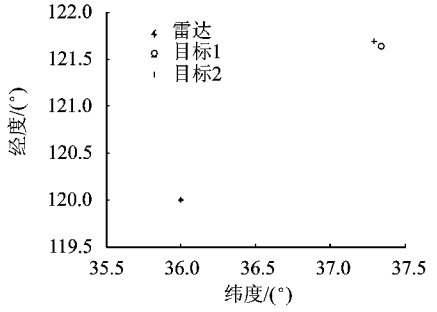

图 2　情况 1时雷达和目标的初始位置

2.2　仿真结果与分析

4种情况下在 NED坐标系进行关联时目标 1的正确关联概率和目标 2的误关联概率见表 1.

1) 由情况 1、2时的仿真结果可以看出,当目

标间隔一定时,目标离舰艇越近,关联效果越好;当目标离舰艇的距离一定时,目标间隔越大,关联效果越好.因而,当目标间隔与目标到舰艇距离之比越大时,关联效果越好.这是由于目标离舰艇越近,雷达的横向测距误差和测高误差越小,对关联的不利影响越小;目标间隔越大,不明目标与 IFF 点迹的误关联可能性越小,因而正确关联概率越大.

2) 由情况 3时的仿真结果可以看出,目标交叉运动时,距离交叉点越近,关联效果越差.这是由于目标距交叉点越近,目标间隔越小,因而误关联可能性越大.

3) 在情况 1～3时,时间对准采用雷达航迹预测与采用航迹平滑的关联效果相近.这是由于3种情况下两目标都是匀速直线运动,进行雷达航迹预测或平滑,都可以达到较好的时间对准效果.情况 4时,在目标机动阶段,采用航迹平滑的关联效果优于采用航迹预测,这是由于目标机动时,运动状态变化较大,采用航迹平滑的时间对准效果优于航迹预测.

4) 4种情况下 NED坐标系和极坐标系下的关联效果相近.

5) 比较 4种情况下 7种 n/m 逻辑的关联效果,可以发现:在保证对友方目标的正确关联概率较高的前提下,n/m 逻辑应选择 2/3或 3/4,这样可以使对不明目标的误关联概率较低.

表 1 4种情况下在 NED坐标系进行关联时目标 1的正确关联概率和目标 2的误关联概率

关联开始时刻	n/m 逻辑	目标 1的正确关联概率				目标 2的误关联概率			
		情况 1	情况 2	情况 3	情况 4	情况 1	情况 2	情况 3	情况 4
5	2/3	0.940	0.587	0.950	0.952	0.001	0.332	0	0
		0.924	0.576	0.943	0.948	0	0.341	0	0
	3/3	0.897	0.247	0.962	0.972	0	0.104	0	0
		0.893	0.277	0.969	0.973	0	0.102	0	0
	3/4	0.940	0.444	0.945	0.959	0	0.208	0	0
		0.937	0.460	0.946	0.957	0	0.200	0	0
25	2/3	0.965	0.621	0.905	0.845	0	0.300	0.022	0
		0.963	0.609	0.899	0.963	0	0.301	0.023	0
	3/3	0.934	0.302	0.608	0.791	0	0.079	0	0
		0.937	0.296	0.618	0.961	0	0.084	0	0
	3/4	0.974	0.489	0.902	0.861	0	0.178	0	0
		0.963	0.492	0.894	0.957	0	0.195	0	0
45	2/3	0.965	0.634	0.967	0.957	0	0.293	0	0
		0.953	0.647	0.952	0.949	0	0.284	0	0
	3/3	0.974	0.298	0.978	0.984	0	0.078	0	0
		0.974	0.311	0.976	0.979	0	0.086	0	0
	3/4	0.967	0.515	0.970	0.964	0	0.170	0	0
		0.959	0.514	0.960	0.961	0	0.169	0	0

3 结束语

雷达和 IFF关联是雷达和 IFF信息融合的前提和关键.基于卡方分布检验的思想,本文提出了一种雷达与 IFF背靠背配置时的关联算法,并对算法的性能进行了仿真验证,得到了一些新的结论.

参考文献 (References)

[1] 张晶炜,熊伟,何友.基于数据压缩的多传感器多假设算法[J].北京航空航天大学学报, 2007, 33(12): 1448 - 1451
Zhang Jingwei, Xiong Wei, He You. Multisensor multipled hypothesis algorithm based on data compressing technic [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(12): 1448 - 1451 (in Chinese)

[2] Schutz R, Engelberg B, Soper W, et al. Fusion of IFF and radar reports for AEW applications [J]. SPIE, 2003, 5204: 305 - 317

[3] Robert R, Carson Jr, Michael P Meyer, et al. Fusion of IFF and radar data [C]// IEEE Digital Avionics Systems Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 1997: 5.3 - 9 - 15

[4] Leung Henry, Wu Jiangfeng. Bayesian and dempster-shafer target identification for radar surveillance [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(2): 432 - 447

[5] 王壮,郁文贤,庄钊文,等.基于运动状态和敌我属性的空中目标融合识别[J].国防科技大学学报, 2001, 23(4): 83 - 87
Wang Zhuang, Yu Wenxian, Zhuang Zhaowen, et al. Air target fusion identification based on kinematic state and foe-friend attribute [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001, 23(4): 83 - 87 (in Chinese)

[6] 郦能敬.预警机系统导论[M].北京:国防工业出版社, 1998: 217 - 218
Li Nengjing. Introduction to airborne early warning system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 217 - 218 (in Chinese)

(责任编辑:娄 嘉)