

LFM 雷达对高超声速目标的数据关联研究

张翔宇¹, 黄婧丽², 王国宏¹, 王希彬²

(1. 海军航空大学信息融合研究所, 山东烟台 264001; 2. 海军航空大学控制工程系, 山东烟台 264001)

摘要: 基于统计判决的关联决策是当前多雷达数据关联的一个有效途径. 然而, 在采用该方法对高超声速目标数据关联的问题进行研究时, 却会出现随着雷达测量精度的提高, 不同雷达数据关联的正确关联概率反而下降这一现象. 针对这一情况, 首先, 利用线性调频 (linear frequency modulated, LFM) 雷达合理构建了基于统计判决的高超声速目标数据关联模型; 接着, 在现有的统计判决机制下, 进一步分析了目标高超声速运动对多 LFM 雷达数据关联的影响, 并得出了其关联判决函数 (服从非中心卡方分布) 与现有的关联判决门限 (服从卡方分布) 相矛盾的结论; 最后, 结合统计学的原理, 通过对目标非中心统计参量的有效求解, 合理解释了上述奇怪现象的出现. 仿真结果表明, 在目标高超声速运动的条件下, 上述奇怪现象的出现是合理的.

关键词: 高超声速; 目标; 数据关联; LFM 雷达; 跟踪

中图分类号: TN958.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)01-0210-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.029

Multi-radar Data Association of Hypersonic Target by LFM Radar

ZHANG Xiang-yu¹, HUANG Jing-li², WANG Guo-hong¹, WANG Xi-bin²

(1. Institute of Information Fusion of Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China;

2. Department of Control Engineering of Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China)

Abstract: As a typical multi-radar data association metrics, the association method, which is based on the chi-square statistic metrics, is an effective way used for multi-radar data association in the current information fusion fields. It is found that, however, the correct probability of multi-sensor data association decreases as the radar measurement error decreases, when the target moves in a hypersonic way. In view of the strange phenomenon, the data association model, which is based on the chi-square statistic metrics, is established firstly by the linear frequency modulated radar. Then the influence of target hypersonic movement on multi-sensor data association is further discussed, and the conclusion is that the associated judgment function (subjected to the non central chi square distribution) is contradicted against the existing associated judgment threshold (subjected to the chi square distribution). Finally, the strange phenomenon above, which is proposed in this paper, is explained by using the statistic theories, and an important conclusion is correspondingly drew that the existing data association approaches, which are based on the chi-square statistic metrics, have a great disadvantage on multi-sensor data association of hypersonic target. Simulation results show that, the happening of the strange phenomenon above is reasonable, when the target moves in a hypersonic way.

Key words: hypersonic; target; data association; LFM radar; tracking

1 引言

多雷达的数据关联是多雷达数据融合的一个重要研究领域, 是解决通过多个雷达实现目标精确跟踪的一个有效途径^[1]. 在对多雷达数据关联的研究中, Singer 和 Kanyurk 在不同雷达估计误差相互独立的假设下, 提

出了基于卡方统计^[2,3]判决的多雷达数据关联算法. 该算法认为不同雷达的两条航迹是相关的当且仅当它们的统计距离在一定的门限范围内. 对于同一问题, Barshalom 认为在共同过程噪声^[4]的影响下, 不同雷达的估计误差是相关的, 并在此基础上引入了互协方差. 互协方差的引入使不同雷达间的数据关联变得更加精确,

但其在跟踪过程中的递归更新也使得多雷达数据关联的问题变得更加复杂. 针对这一情况, 文献[5]提出一种相关参量解耦的方法来对互协方差做近似替代. 通过互协方差矩阵的近似替代, 目标跟踪系统可有效实现不同雷达对目标的数据关联和融合跟踪. 与此同时, 为进一步提高多雷达数据关联的正确关联概率, 文献[6]把当前时刻的数据关联与历史信息结合起来, 提出一种序贯航迹关联方法. 文献[7]针对密集目标环境下的数据关联问题, 提出一种基于模糊处理的数据关联方法. 文献[8]进一步将目标的特征和属性信息引入数据关联, 有效提高了弱小目标的数据关联概率.

然而, 上述文献的研究全都建立在目标运动速度相对较小的情况下, 而对目标高超声速运动时的情况却并没有加以充分考虑. 但是, 随着 X-43^[9]、X-51^[10] 等高超声速飞行器的相继出现, 高超声速武器的关联探测已成为当前急需解决的关键问题.

在对高超声速目标关联探测的研究中, 由文献[11]可知, LFM 信号是当前雷达最常用的信号形式之一, 具有大的时宽带宽积, 其接收信号进行匹配滤波处理后可显著提高信噪比, 但却存在距离-速度的耦合现象, 进而引起运动目标的测距偏移问题. 在径向速度较小的情况下, 目标回波的这一特性通常可以不做考虑, 但在目标径向高超声速运动的情况下, 其距离和速度的耦合现象将对多雷达数据关联的问题产生重要的影响.

为此, 本文以多 LFM 雷达数据关联的问题为例, 结合统计学的思想进一步分析了目标高超声速运动对多雷达数据关联的影响, 并得出了在目标高超声速运动的条件下, 随着雷达测量精度的提高, 不同雷达数据关联的正确关联概率反而下降这一反常结论.

2 基于统计判决的多 LFM 雷达数据关联模型

2.1 LFM 雷达对高超声速目标的有偏探测

如图 1 所示, 假设雷达正跟踪一个径向速度为 v 的目标, 并发射 LFM (Linear Frequency Modulated) 脉冲信号^[12].

$$s(k) = \text{rect}\left(\frac{k}{\tau}\right) \cos(2\pi f_0 k + \pi \mu k^2) \quad (1)$$

其中, $\text{rect}\left(\frac{k}{\tau}\right) = 1$, τ 是脉冲宽度, f_0 为中心载频, $\mu = \frac{B_u}{\tau}$ 为调频斜率, B_u 为脉冲带宽.

则 k 时刻的雷达接收信号可表示为:

$$s_r(k) = \text{rect}\left(\frac{\gamma(k-t_0)}{\tau}\right) \cos(2\pi f_0 \gamma(k-t_0) + \pi \mu \gamma^2(k-t_0)^2) \quad (2)$$

其中, $t_0 = \frac{2R_0}{c}$, R_0 为目标与雷达的初始距离, c 是光速,

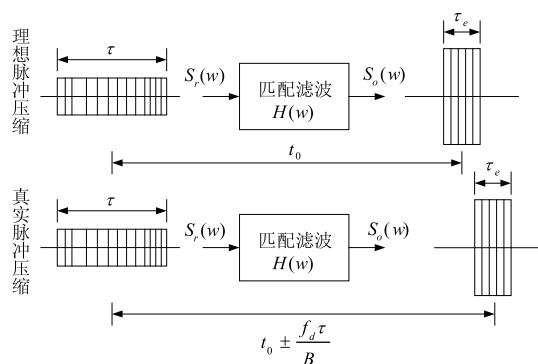


图 1 目标高超声速运动对 LFM 雷达量测的影响

$$\gamma = 1 + \frac{2v}{c}$$

这时, 对接收信号 $s_r(k)$ 进行匹配滤波处理, 其 k 时刻的滤波器输出可表示为:

$$s_o(k) = (\tau - |k - t_0|) \frac{\sin[\pi(\mu|k - t_0| + f_d)(\tau - |k - t_0|)]}{\pi(\mu|k - t_0| + f_d)(\tau - |k - t_0|)} \cdot \exp\{j\pi\mu(-k^2 - t_0^2 - 2f_d t_0)^2\} \cdot \exp\left\{j2\pi\left(\mu(k - t_0) + f_d\right)\left(t_0 + \frac{k}{2}\right)\right\} \quad (3)$$

其中, $f_d = \frac{2v}{c}f_0$ 为目标的多普勒频率. 这时, 依据最大输出信噪比准则, 信号 $s_o(k)$ 在 $k = t_0 \pm \frac{f_d}{\mu}$ 处有最值, 即雷达量测不可避免的会受到距离时延偏差的影响.

$$\Delta r = \frac{f_d}{\mu} c = \frac{2vf_0\tau}{B_u} = \frac{2v\tau}{B_u\lambda} c \quad (4)$$

为定量分析目标高超声速运动对 LFM 雷达探测跟踪的影响, 分析如下:

如图 2 所示, 假设目标始终以 $V = 10\text{Ma}$ 的速度运动, 且在 k 时刻目标相对雷达的运动方向 $\psi(k) = 5^\circ$, 目标距离 $r(k) = 600\text{km}$, 目标飞行高度 $h(k) = 25\text{km}$, 雷达波长 $\lambda = 0.1\text{m}$, 线性调频脉冲信号宽度为 $\tau = 600\mu\text{s}$, 线性调频带宽为 $B_u = 1.5\text{MHz}$, 则 k 时刻脉冲压缩导致的距离时延偏差可达:

$$\Delta r(k) = \frac{2\tau c}{B_u\lambda} V \cos(\psi_k) \frac{\sqrt{r_k^2 - h_k^2}}{r_k} \approx 8.1\text{km} \quad (5)$$

而现有雷达的距离测量误差通常为 100m 左右, 也就是说该偏差将对目标的探测跟踪产生重要的影响, 是不可以忽略不计的.

2.2 基于统计判决的多 LFM 雷达数据关联

由上述分析可知, 在目标高超声速运动的条件下, 雷达量测将产生高动态的距离时延偏差, 这时, 单一雷达已无法实现对高超声速目标的可靠跟踪, 为此, 拟采用多部雷达组网的方法来有效解决这一问题.

要实现多部雷达对高超声速目标的组网跟踪, 首

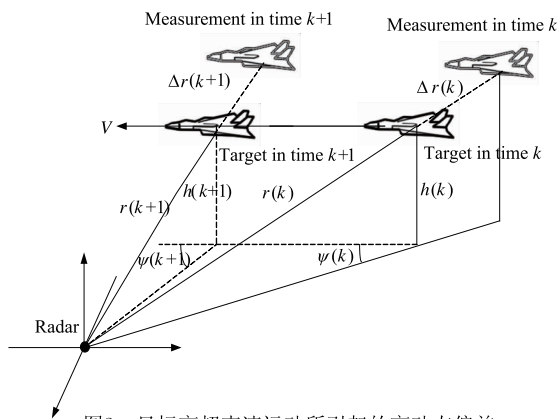


图2 目标高超声速运动所引起的高动态偏差

先需判断不同雷达对目标的量测是否源于同一目标。如图3所示,假设异地配置的雷达A和B共同对目标进行探测跟踪,并以雷达A为融合中心进行多雷达数据关联处理。雷达*i* (*i* = A, B) 在*k*时刻的量测由距离 $r_i(k)$ 、方位角 $\theta_i(k)$ 和俯仰角 $\varphi_i(k)$ 共同组成,且该量测同时受到高动态偏差和随机量测噪声的影响。

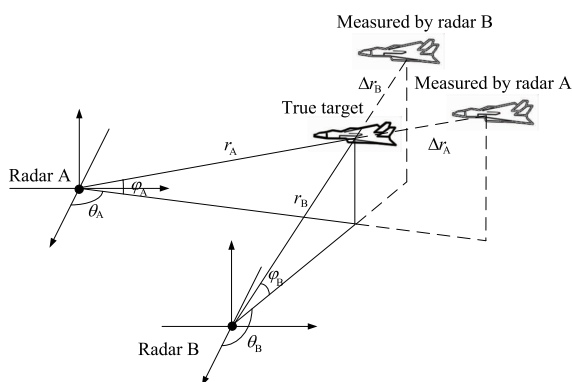


图3 目标高超声速运动下的多传感器数据关联模型图

$$\begin{bmatrix} r_i(k) \\ \theta_i(k) \\ \varphi_i(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{r}_i(k) \\ \bar{\theta}_i(k) \\ \bar{\varphi}_i(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta r_i(k) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{r_i}(k) \\ w_{\theta_i}(k) \\ w_{\varphi_i}(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $[\bar{r}_i(k), \bar{\theta}_i(k), \bar{\varphi}_i(k)]^T$ 为目标的真实状态, $\Delta r_i(k)$ 为高动态的距离时延偏差, 随机量测噪声向量 $[w_{r_i}(k), w_{\theta_i}(k), w_{\varphi_i}(k)]^T$ 服从具有0均值, 恒定方差 $R_\delta^i = \text{diag}[\sigma_{r_i}^2, \sigma_{\theta_i}^2, \sigma_{\varphi_i}^2]$ 的高斯分布。

为有效判断不同雷达对目标的量测是否关联, 首先需将各雷达对目标的量测转换到以雷达A为融合中心的直角坐标系下, 即:

$$Z_A(k) = \begin{bmatrix} r_A(k) \sin\theta_A(k) \cos\varphi_A(k) \\ r_A(k) \cos\theta_A(k) \cos\varphi_A(k) \\ r_A(k) \sin\varphi_A(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$Z_B(k) = \begin{bmatrix} r_B(k) \sin\theta_B(k) \cos\varphi_B(k) \\ r_B(k) \cos\theta_B(k) \cos\varphi_B(k) \\ r_B(k) \sin\varphi_B(k) \end{bmatrix} + \Delta X \quad (8)$$

其中, $Z_A(k)$ 和 $Z_B(k)$ 分别表示融合中心下的目标量测, ΔX 为一常数, 表示为雷达A和B的间的相对位置。

在获得融合中心下目标量测 $Z_A(k)$ 和 $Z_B(k)$ 的基础上, 为实现不同雷达目标量测的数据关联, 令:

$$Y(k) = Z_A(k) - Z_B(k) \quad (9)$$

则可构造关联判决函数:

$$\eta(k) = Y(k)^T (R_A(k) + R_B(k))^{-1} Y(k) \quad (10)$$

其中, $R_A(k)$ 和 $R_B(k)$ 分别为 $Z_A(k)$ 和 $Z_B(k)$ 所对应的量测协方差。

这时, 依据现有的基于统计判决的关联准则^[13], 不同雷达目标数据关联的问题可以如下的假设检验做进一步的分析判决:

H_0 : 若 $\eta(k) \leq \xi$, 则判雷达A和B的量测来自同一目标;

H_1 : 若 $\eta(k) > \xi$, 则判雷达A和B的量测来自不同目标。

其中, $\xi = \chi_\beta^2(n)$ 为统计判决门限, β 是其显著性水平, $n = 3$ 是自由度。

3 目标高超声速运动对多 LFM 雷达数据关联的影响

在假设 H_0 成立的条件下, 由于目标量测存在高动态的距离时延偏差 $\Delta r_i(k)$ ($i = A, B$), 则必然存在稳态偏差 $\Delta(k)$, 使得:

$$Y(k) = \bar{X}(k) + B(k) \quad (11)$$

其中

$$\Delta(k) = E[Z_A(k) - Z_B(k) | H_0] \neq 0 \quad (12)$$

则

$$\bar{X}(k) \sim N(0, R_A(k) + R_B(k)) \quad (13)$$

这时, 关联判决函数 $\eta(k)$ 将不再服从传统的卡方统计判决分布, 而是服从自由度是3, 非中心统计参量为 $\delta(k)$ 的非中心卡方分布^[14]。即:

$$\eta(k) = Y(k)^T (R_A(k) + R_B(k))^{-1} Y(k) \sim \chi^2(3, \delta(k)) \quad (14)$$

其中

$$\delta(k) = \Delta(k)^T (R_A(k) + R_B(k))^{-1} \Delta(k) \quad (15)$$

然而, 在现有的统计判决机制下, 关联判决门限 λ 却仍服从传统的卡方分布判决。这时, 必然会因为判决函数与判决门限的不匹配带来较大的关联判决误差。

4 目标高超声速运动对多 LFM 雷达数据关联的影响分析

4.1 非中心统计参量 $\delta(k)$ 的求解

由上述分析可知, 在目标高超声速运动的条件下, 关联判决函数 $\eta(k)$ 将不再服从传统的卡方统计判决机制。这时, 为合理解释随着雷达测量精度的提高, 不同雷

达数据关联的正确关联概率反而下降这一反常现象,必须先对非中心统计量 $\delta(k)$ 进行求解.

由于在某一固定时刻 k , 非中心统计量 $\delta(k)$ 的取值为一常数, 则有:

$$\Delta(k)\delta(k)\Delta(k)^T = \Delta(k)\Delta(k)^T(R_A(k) + R_B(k))^{-1} \cdot \Delta(k)\Delta(k)^T \quad (16)$$

进一步变形可得:

$$\delta(k)(R_A(k) + R_B(k)) = \Delta(k)\Delta(k)^T \quad (17)$$

这时, 对式(17)两端进行行列式运算有:

$$\delta(k) = \frac{|\Delta(k)\Delta(k)^T|}{|R_A(k) + R_B(k)|} \quad (18)$$

由式(18)可以看出, 由于 k 时刻的稳态偏差 $\Delta(k)$ 是一常数, 则 $|\Delta(k)\Delta(k)^T|$ 的取值也是一常数. 这时, 只要获得行列式 $|R_A(k) + R_B(k)|$ 的取值, 便可有效实现非中心统计参量 $\delta(k)$ 的求解.

4.2 行列式 $|R_A(k) + R_B(k)|$ 的计算

在对行列式 $|R_A(k) + R_B(k)|$ 求解的过程中, 由于

$$R_i(k) = \begin{bmatrix} i_{11} & i_{12} & i_{13} \\ i_{12} & i_{22} & i_{23} \\ i_{13} & i_{23} & i_{33} \end{bmatrix}, \quad i = A, B \quad (19)$$

其中

$$i_{11} = \sigma_{r_i}^2 \cos^2 \theta_i \cos^2 \varphi_i + r_i^2 \sigma_{\theta_i}^2 \sin^2 \theta_i \cos^2 \varphi_i + r_i^2 \sigma_{\varphi_i}^2 \cos^2 \theta_i \sin^2 \varphi_i \quad (20)$$

$$i_{22} = \sigma_{r_i}^2 \sin^2 \theta_i \cos^2 \varphi_i + r_i^2 \sigma_{\theta_i}^2 \cos^2 \theta_i \cos^2 \varphi_i + r_i^2 \sigma_{\varphi_i}^2 \sin^2 \theta_i \sin^2 \varphi_i \quad (21)$$

$$i_{33} = \sigma_{r_i}^2 \sin^2 \theta_i + r_i^2 \sigma_{\varphi_i}^2 \cos^2 \varphi_i \quad (22)$$

$$i_{12} = \sigma_{r_i}^2 \cos \theta_i \sin \theta_i \cos^2 \varphi_i - \sigma_{\theta_i}^2 r_i^2 \cos \theta_i \sin \theta_i \cos^2 \varphi_i + r_i^2 \sigma_{\varphi_i}^2 \cos \theta_i \sin \theta_i \sin^2 \varphi_i \quad (23)$$

$$i_{13} = \sigma_{r_i}^2 \cos \theta_i \cos \varphi_i \sin \varphi_i - r_i^2 \sigma_{\varphi_i}^2 \cos \theta_i \cos \varphi_i \sin \varphi_i \quad (24)$$

$$i_{23} = \sigma_{r_i}^2 \sin \theta_i \cos \varphi_i \sin \varphi_i - r_i^2 \sigma_{\varphi_i}^2 \sin \theta_i \cos \varphi_i \sin \varphi_i \quad (25)$$

则行列式 $|R_A(k) + R_B(k)|$ 可进一步表示为:

$$|R_A(k) + R_B(k)| = \begin{vmatrix} A_{11} + B_{11} & A_{12} + B_{12} & A_{13} + B_{13} \\ A_{12} + B_{12} & A_{22} + B_{22} & A_{23} + B_{23} \\ A_{13} + B_{13} & A_{23} + B_{23} & A_{33} + B_{33} \end{vmatrix} \quad (26)$$

由式(19) ~ (26) 可知, 这时如果直接对行列式 $|R_A(k) + R_B(k)|$ 进行求解, 计算量将非常庞大. 为此, 利用分块矩阵的相关性质来有效解决这一问题. 令:

$$|R_A(k) + R_B(k)| = \begin{vmatrix} m_1 & m_4 & m_5 \\ m_4 & m_2 & m_6 \\ m_5 & m_6 & m_3 \end{vmatrix} \quad (27)$$

进一步变形可得:

$$|R_A(k) + R_B(k)| = \begin{vmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 - m_4^2 m_1^{-1} & m_6 - m_4 m_5 m_1^{-1} \\ 0 & m_6 - m_4 m_5 m_1^{-1} & m_3 m_1^{-1} \end{vmatrix} \quad (28)$$

则

$$|R_A(k) + R_B(k)| = |m_1| \cdot \begin{vmatrix} m_2 - m_4^2 m_1^{-1} & m_6 - m_4 m_5 m_1^{-1} \\ m_6 - m_4 m_5 m_1^{-1} & m_3 - m_5^2 m_1^{-1} \end{vmatrix} = m_1 m_2 m_3 + 2m_4 m_5 m_6 - m_2 m_5^2 - m_3 m_4^2 - m_1 m_6^2 \quad (29)$$

将式(26)代入(29)可得:

$$|R_A(k) + R_B(k)| = p_A + p_B + p_{AB} + p_{BA} \quad (30)$$

其中

$$p_A = A_{11}A_{22}A_{33} + 2A_{12}A_{13}A_{23} - A_{11}A_{23}^2 - A_{22}A_{13}^2 - A_{33}A_{12}^2 \quad (31)$$

$$p_B = B_{11}B_{22}B_{33} + 2B_{12}B_{13}B_{23} - B_{11}B_{23}^2 - B_{22}B_{13}^2 - B_{33}B_{12}^2 \quad (32)$$

$$p_{AB} = A_{11}A_{22}B_{33} + A_{11}A_{33}B_{22} + A_{22}A_{33}B_{11} - A_{12}^2 B_{33} - A_{13}^2 B_{22} - A_{23}^2 B_{11} + 2A_{12}A_{13}B_{23} + 2A_{12}A_{23}B_{13} + 2A_{13}A_{23}B_{12} - 2A_{11}A_{23}B_{23} - 2A_{22}A_{13}B_{13} - 2A_{33}A_{12}B_{12} \quad (33)$$

$$p_{BA} = B_{11}B_{22}A_{33} + B_{11}B_{33}A_{22} + B_{22}B_{33}A_{11} + B_{22}^2 A_{33} - B_{13}^2 A_{22} - B_{23}^2 A_{11} - 2B_{12}B_{13}A_{23} + 2B_{12}B_{23}A_{13} + 2B_{13}B_{23}A_{12} - 2B_{11}B_{23}A_{23} - 2B_{22}B_{13}A_{13} - 2B_{33}B_{12}A_{12} \quad (34)$$

将式(20) ~ (25)代入(31), 经化简可得:

$$p_A = r_A^4 \sigma_{r_A}^2 \sigma_{\theta_A}^2 \sigma_{\varphi_A}^2 (\cos^2 \theta_A \cos \varphi_A \sin^2 \varphi_A + \sin^2 \theta_A \cos \varphi_A \sin^2 \varphi_A + \cos^2 \theta_A \cos^3 \varphi_A + \sin^2 \theta_A \cos^3 \varphi_A)^2 \quad (35)$$

类似地, p_B 、 p_{AB} 和 p_{BA} 的取值详见附录.

4.3 目标高超声速运动对多 LFM 雷达数据关联的影响分析

这里以雷达 A 为例, 由式(35)可知, 随着雷达测量精度的提高 ($\sigma_{r_A}^2$ 、 $\sigma_{\theta_A}^2$ 或 $\sigma_{\varphi_A}^2$ 的减小), p_A 的取值将呈逐渐减小的趋势变化; 而由附录可知, p_B 保持不变, p_{AB} 和 p_{BA} 呈逐渐减小的趋势变化. 这时, 行列式 $|R_A(k) + R_B(k)|$ 的取值将呈逐渐减小的趋势变化. 而由式(18)可知, 由于 $|\Delta(k)\Delta(k)^T|$ 的取值为一常数, 则非中心统计参量 $\delta(k)$ 的取值将呈逐渐增大的趋势变化.

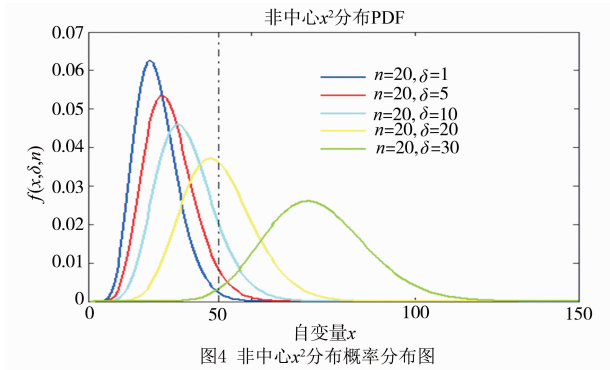
与此同时, 依据非中心卡方分布的性质^[15]可知, 随着非中心参数 $\delta(k)$ 的增大, 关联判决函数 $\eta(k)$ 的分布函数(图中面积部分)将对应减小. 这也就是说, 不同雷达间的数据关联概率将对应减小. 其具体效果如图 4 所示.

综上所述, 随着雷达测量精度的提高, 不同雷达数据关联的正确关联概率反而对应减小.

5 仿真分析与验证

5.1 仿真环境设置

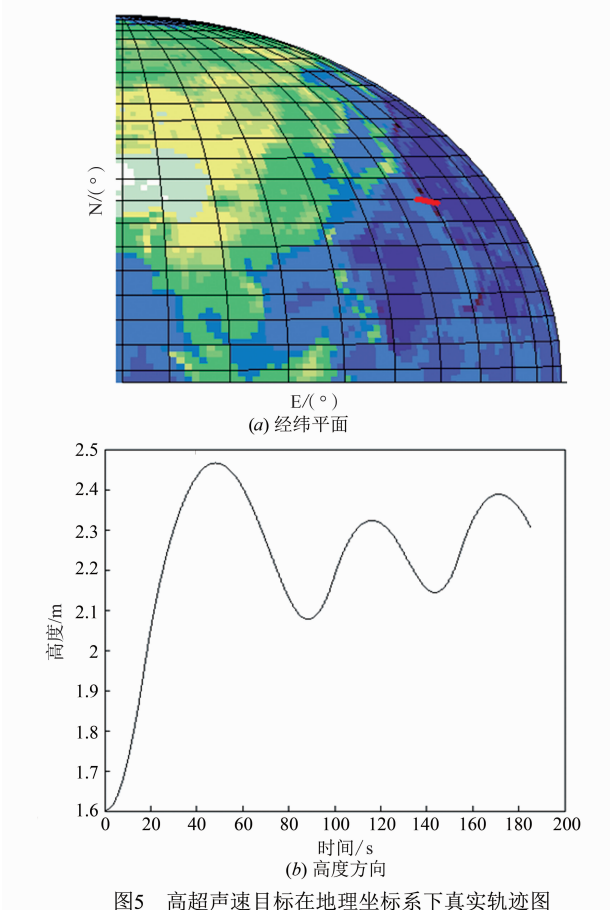
为验证上述分析的合理性, 这里以高超声速飞行



器 X-51A 为例设置仿真环境. 其中, 真实轨迹在地理坐标系下构建, 量测在雷达所处位置的极坐标系获得, 跟踪在地心直角坐标系下进行.

(1) 真实轨迹构建

假定高超声速飞行器的初始地理位置为 $[N30^\circ, E130^\circ, 16\text{km}]$, 初始速度为 $v = 5\text{Ma}$, 初始航向角为 260° , 初始质量为 3600kg , 初始攻角为 1° . 飞行器在推力、阻力、升力和重力的共同作用下做高超声速滑跃式轨迹运动. 飞行器轨迹依据 Sanger 弹道^[16] 构建. 在上述仿真条件下, 依据文献^[16] 所获得的目标真实轨迹如图 5 所示.



(2) 雷达量测获取

双基地雷达 A 和 B 共同对目标进行探测跟踪. 雷达 A 的位置为 $[N33^\circ, E130.5^\circ, 0\text{km}]$, 雷达 B 的位置为 $[N37^\circ, E130.5^\circ, 0\text{km}]$. 雷达 A 和 B 具有相同的性能参数, 其中雷达波长为 $\lambda = 0.1\text{m}$, 线性调频脉冲信号宽度为 $\tau = 600\mu\text{s}$, 带宽为 $B_u = 1.5\text{MHz}$. 雷达 A 的距离、方位和俯仰测量误差分别为 $\sigma_{ra} = 100\text{m}$, $\sigma_{\theta a} = 0.2^\circ$ 和 $\sigma_{\varphi a} = 0.2^\circ$, 雷达 B 的测量误差设定如表 1 所示.

表 1 雷达参数

	σ_{rb}	$\sigma_{\theta b}$	$\sigma_{\varphi b}$
实验 1	100m ~ 400m	0.1°	0.5°
实验 2	100m	0.1° ~ 0.2°	0.5°
实验 3	100m	0.1°	0.1° ~ 1.5°

5.2 仿真结果与分析

图 6 为目标高超声速运动下的跟踪轨迹图. 为便于分析其中, 这里只取 $(0, 40\text{s})$ 这一时间段. 由图 6 可以看出, 雷达 A 和 B 都可以有效实现对高超声速目标的探测跟踪, 但与真实轨迹相比, 雷达 A 和 B 的跟踪结果都存在较大的偏差.

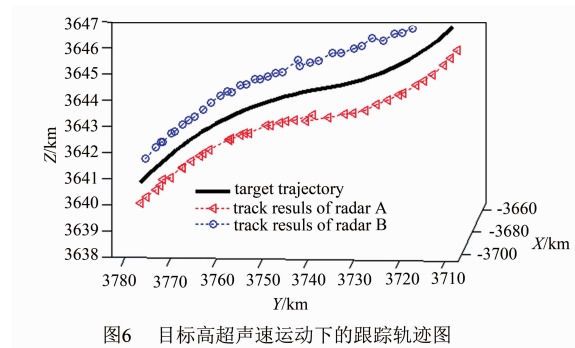


图 7 为不同雷达距离测量误差下的正确关联概率图. 由图 7 可以看出, 在目标高超声速运动的条件下, 随着雷达 B 距离测量精度的提高 (σ_{rb} 的减小), 雷达 A 和 B 数据关联的正确关联概率反而对应减小.

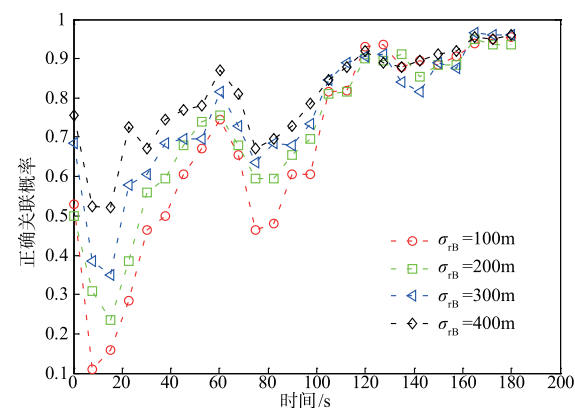


图 8 为不同雷达方位测量误差下的正确关联概率

图. 由图 8 可以看出,在目标高超声速运动的条件下,随着雷达 B 方位测量精度的提高($\sigma_{\theta B}$ 的减小),雷达 A 和 B 数据关联的正确关联概率呈逐渐减小的趋势变化.

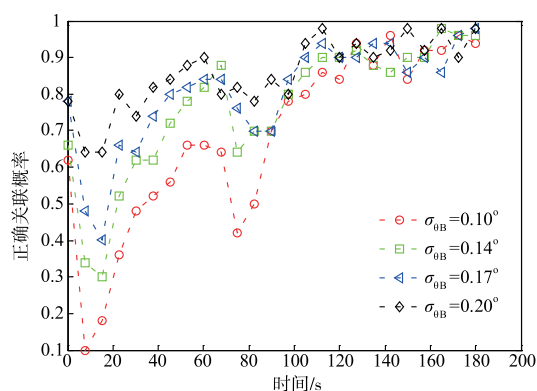


图8 不同雷达方位测量误差下的正确关联概率图

图 9 为不同雷达俯仰测量误差下的正确关联概率图. 由图 9 可以看出,在目标高超声速运动的条件下,随着雷达 B 俯仰测量精度的提高($\sigma_{\varphi B}$ 的减小),雷达 A 和 B 数据关联的正确关联概率呈逐渐减小的趋势变化.

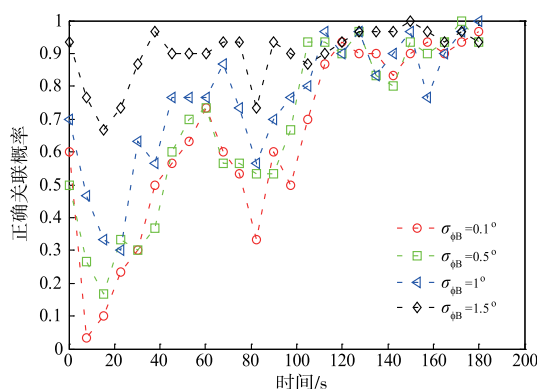


图9 不同雷达俯仰测量误差下的正确关联概率图

综上所述,在目标高超声速运动的条件下,随着雷达 B 测量精度的提高,雷达 A 和 B 数据关联的正确关联概率反而呈逐渐减小的趋势变化.

6 分析与讨论

6.1 结果分析

在目标高超声速运动的条件下,由于高动态距离时延偏差的影响,不同雷达所测得的目标轨迹具有较大的偏差(即存在稳态偏差 Δ_{AB}). 而常规的关联判决机制却是建立在这一稳态偏差 Δ_{AB} 为 0 的假设下. 为此,在目标高超声速运动的条件下,如果仍采用常规的关联算法进行判决,不可避免地会引入较大的错误关联概率.

与此同时,由于高动态距离时延偏差的影响,常规关联算法所建立的判决函数将不再服从卡方统计分布,而是服从具有一定非中心参量的非中心卡方分布. 这时,由于判决函数与判决机制的不匹配,导致了本文

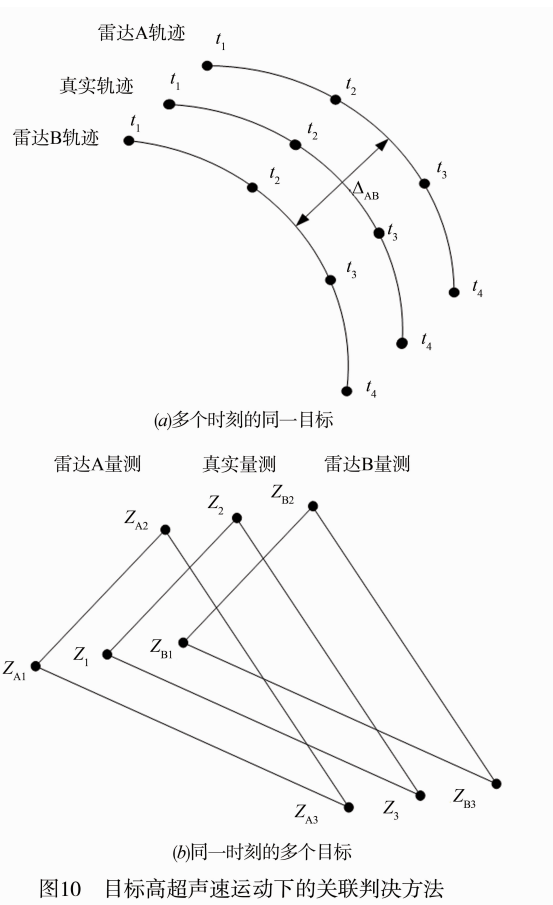


图10 目标高超声速运动下的关联判决方法

所提的随着雷达测量精度的提高,不同雷达数据关联的正确关联概率反而下降的奇怪现象.

6.2 解决方法讨论

在目标高超声速运动的条件下,为解决常规关联算法所存在的不足,这里分别就单目标和多目标两种情况进行讨论.

(1)单目标情况. 如图 10(a)所示,在目标高超声速运动的条件下,尽管雷达 A 和 B 所获得的目标轨迹与真实轨迹相比具有较大的偏差,但是轨迹 A 和轨迹 B 的形状却是相同的. 为此,可利用同一目标在多个时刻的轨迹相似性进行关联统计判决.

(2)多目标情况. 如图 10(b)所示,在同一观测时刻,尽管雷达 A 和 B 对目标的量测与目标真实位置存在较大的偏差,但是多个目标在雷达 A 中的拓扑结构与在雷达 B 中的拓扑结构是相同的. 为此,可利用多个目标在同一时刻的空间拓扑相似性进行关联统计判决.

7 结论

本文结合统计学的思想研究了目标高超声速运动下的多 LFM 雷达数据关联问题,分析了目标高超声速运动对多 LFM 雷达数据关联的影响,并得出了在目标高超声速运动的条件下,随着传感器雷达测距和测角

误差的减小,不同雷达数据关联的正确关联概率反而下降这一结论.

附录

在对 p_B 、 p_{AB} 和 p_{BA} 求解的过程中,将式(20)~式(25)分别代入式(32)、式(33)和式(34),经简化可得:

$$p_B = r_B^4 \sigma_{rB}^2 \sigma_{\theta B}^2 \sigma_{\varphi B}^2 (\cos^2 \theta_B \cos \varphi_B \sin^2 \varphi_B + \sin^2 \theta_B \cos \varphi_B \sin^2 \varphi_B + \cos^2 \theta_B \cos^3 \varphi_B + \sin^2 \theta_B \cos^3 \varphi_B)^2 \quad (a1)$$

$$p_{ab} = p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 + p_5^2 + p_6^2 + p_7^2 + p_8^2 + p_9^2 + p_{10}^2 \quad (a2)$$

其中

$$p_1^2 = r_A^2 \sigma_{rA}^2 \sigma_{\theta A}^2 \sigma_{\varphi A}^2 \sigma_{rB}^2 (\cos^2 \theta_A \cos^2 \varphi_A \sin \varphi_B + \sin^2 \theta_A \cos^2 \varphi_A \sin \varphi_B - \cos \theta_A \cos \varphi_A \sin \varphi_A \cos \theta_B \cos \varphi_B - \sin \theta_A \cos \varphi_A \sin \varphi_A \sin \theta_B \cos \varphi_B)^2 \quad (A3)$$

$$p_2^2 = r_A^2 \sigma_{rA}^2 \sigma_{\varphi A}^2 \sigma_{\theta B}^2 (\cos^2 \theta_A \sin^2 \varphi_A \sin \theta_B \cos \varphi_B + \cos \theta_A \cos^2 \varphi_A \sin \theta_B \cos \varphi_B - \sin \theta_A \sin^2 \varphi_A \cos \theta_B \cos \varphi_B - \sin \theta_A \cos^2 \varphi_A \cos \theta_B \cos \varphi_B)^2 \quad (A4)$$

$$p_3^2 = r_A^4 \sigma_{\theta A}^2 \sigma_{\varphi A}^2 \sigma_{rB}^2 (\cos \theta_A \cos^2 \varphi_A \cos \theta_B \cos \varphi_B + \sin \theta_A \cos^2 \varphi_A \sin \theta_B \cos \varphi_B + \cos \theta_A \cos^2 \varphi_A \sin \theta_B \sin \varphi_B + \sin \theta_A \cos^2 \varphi_A \sin \theta_B \sin \varphi_B)^2 \quad (a5)$$

$$p_4^2 = r_A^2 r_B^2 \sigma_{rA}^2 \sigma_{\theta A}^2 \sigma_{\varphi B}^2 (\cos^2 \theta_A \cos^2 \varphi_A \cos \varphi_B + \sin^2 \theta_A \cos^2 \varphi_A \cos \varphi_B + \cos \theta_A \cos \varphi_A \sin \varphi_A \cos \theta_B \sin \varphi_B + \sin \theta_A \cos \varphi_A \sin \varphi_A \sin \theta_B \sin \varphi_B)^2 \quad (a6)$$

$$p_5^2 = r_A^2 r_B^2 \sigma_{rA}^2 \sigma_{\varphi A}^2 \sigma_{\theta B}^2 (\cos \theta_A \sin^2 \varphi_A \sin \theta_B \cos \varphi_B + \cos \theta_A \cos^2 \varphi_A \sin \theta_B \sin \varphi_B + \sin \theta_A \sin^2 \varphi_A \cos \theta_B \sin \varphi_B + \sin \theta_A \cos^2 \varphi_A \cos \theta_B \sin \varphi_B)^2 \quad (a7)$$

$$p_6^2 = r_A^2 r_B^2 \sigma_{rA}^2 \sigma_{\varphi A}^2 \sigma_{\theta B}^2 (\cos \theta_A \sin^2 \varphi_A \cos \theta_B \cos \varphi_B + \cos \theta_A \cos^2 \varphi_A \cos \theta_B \cos \varphi_B + \sin \theta_A \sin^2 \varphi_A \sin \theta_B \cos \varphi_B + \sin \theta_A \cos^2 \varphi_A \sin \theta_B \cos \varphi_B)^2 \quad (a8)$$

$$p_7^2 = r_A^2 r_B^2 \sigma_{rA}^2 \sigma_{\theta A}^2 \sigma_{\theta B}^2 (\cos \theta_A \cos \varphi_A \sin \varphi_A \sin \theta_B \cos \varphi_B + \sin \theta_A \cos \varphi_A \sin \varphi_A \cos \theta_B \cos \varphi_B)^2 \quad (a9)$$

$$p_8^2 = r_A^2 r_B^2 \sigma_{rA}^2 \sigma_{\theta A}^2 \sigma_{\theta B}^2 (\cos \theta_A \cos \varphi_A \sin \varphi_A \sin \theta_B \cos \varphi_B + \sin \theta_A \cos \varphi_A \sin \varphi_A \cos \theta_B \cos \varphi_B)^2 \quad (a10)$$

$$p_9^2 = r_A^4 r_B^2 \sigma_{\theta A}^2 \sigma_{\varphi A}^2 \sigma_{\varphi B}^2 (\cos \theta_A \cos^2 \varphi_A \cos \theta_B \sin \varphi_B + \sin \theta_A \cos^2 \varphi_A \sin \theta_B \sin \varphi_B + \cos^2 \theta_A \cos \varphi_A \sin \theta_B \cos \varphi_B$$

$$+ \sin^2 \theta_A \cos \varphi_A \sin \theta_B \cos \varphi_B)^2 \quad (a11)$$

$$p_{10}^2 = r_A^4 r_B^2 \sigma_{rA}^2 \sigma_{\varphi A}^2 \sigma_{\theta B}^2 (\cos \theta_A \cos^2 \varphi_A \sin \theta_B \cos \varphi_B + \sin \theta_A \cos^2 \varphi_A \cos \theta_B \cos \varphi_B)^2 \quad (a12)$$

这时,由式(a1)~(a12)可知,随着雷达 A 测量精度的提高(σ_{rA}^2 、 $\sigma_{\theta A}^2$ 或 $\sigma_{\varphi A}^2$ 的减小), p_B 保持不变, p_{AB} 和 p_{BA} 呈逐渐减小的趋势变化.

参考文献

- [1] Bar-Shalom Y, Kirubarajan T, Gokberk C. Tracking with classification-aided multiframe data association [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2005, 41(3): 869-875.
- [2] Sathyan T, Sinha A, Kirubarajan T, et al. MDA-based data association with prior track information for passive multitarget tracking [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2008, 47(1): 539-544.
- [3] Bar-Shalom Y, Chen H M. Multisensor track-to-track association for tracks with dependent errors [A]. Proc of 43rd International Conference on Decision and Control [C]. Paradise Island, Bahamas, 2004. 2674-2678.
- [4] Bar-Shalom Y, Chen H M. Track association and fusion with heterogeneous local trackers [A]. Proc of 46th International Conference on Information Fusion [C]. New Orleans, USA, 2007. 1-2.
- [5] Kaplan M K, Bar-Shalom Y, Blair W D. Assignment costs for multiple sensor track-to-track association [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2008, 44(2): 655-663.
- [6] Qi L, Dong K, Liu Y. Anti-bias track-to-track association algorithm based on distance detection [J]. IET Trans Radar, Sonar and Navigation, 2017, 11(2): 269-276.
- [7] Zhang Z C, Guan X, Guo Q, et al. Radar emitter signal recognition based on k nearest neighborhood method [J]. Electronic Warfare, 2009, 129(6): 31-35.
- [8] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013. He Y, Xiu J J, Zhang J W, et al. Radar Data Processing With Applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013. (in Chinese)
- [9] Saville M A, Jackson J A, Fuller D F. Rethinking vehicle classification with wide-angle polarimetric SAR [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2014, 29(1): 41-49.
- [10] Brink C. X-51A flight test status update [A]. IEEE Proc of the 43rd Annual International Symposium of the Society of Flight Test Engineers [C]. USA: IEEE, 2012. 406-423.
- [11] 陈伯孝. 现代雷达系统分析与设计 [M]. 西安: 西安电

- 子科技大学出版社,2012.
- Chen B X. Modern Radar System Analysis and Design [M]. Xian: Xidian University Press, 2012. (in Chinese)
- [12] Kumar Y D, Prasad A M. ECG abnormalities detection using doppler shift method [A]. IEEE Proc of the 4th International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies [C]. USA: IEEE, 2014. 493 - 497.
- [13] Okello N N, Challa S. Joint sensor registration and track-to-track fusion for distributed trackers [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40 (3): 808 - 823.
- [14] Siegel A F. The noncentral chi-square distribution with zero degrees of freedom and testing for uniformity [J]. Biometrika, 2009, 66(1): 381 - 386.
- [15] Press S J. Linear combinations of non-central chi-square variates [J]. The Annals of Mathematical Statistics, 2010, 37(2): 480 - 487.
- [16] 宗群, 田苓, 窦立谦. 基于 Gauss 伪谱法的临近空间飞行器上升段轨迹优化 [J]. 宇航学报, 2010, 31(7): 1776 - 1781.

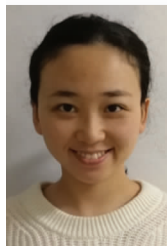
Zong Q, Tian L, Dou L Q. Ascent phase trajectory optimization for near space vehicle based on gauss pseudospectral method [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(7): 1776 - 1781. (in Chinese)

作者简介



张翔宇 男, 1986 年 8 月出生, 山西太原人. 2015 年毕业于海军航空工程学院电子与信息工程系. 现为讲师, 从事机动目标跟踪方面的有关研究.

E-mail: zxy627289467@sina.com



黄婧丽 (通信作者) 女, 1987 年 10 月出生, 山西太原人. 2016 年毕业于海军航空工程学院控制工程系, 现为讲师, 从事导航、跟踪等方面的研究.

E-mail: huangjingli_hy@163.com