

doi: 10.7690/bgzd.2020.11.004

2D 雷达组网目标高度估计方法

杨军佳, 张 星, 高 强

(陆军炮兵防空兵学院郑州校区, 郑州 450000)

摘要: 为解决 2D 雷达不能测量目标高度参数的问题, 提出一种 2D 雷达组网目标高度估计方法。利用 2 部雷达对同一目标距离和方位角测量的冗余信息进行目标高度的初步估计, 通过定义贴近度、一致性测度、一致性测度均值、一致性测度方差和变异系数来确定不同雷达组合初步估计高度值参与数据融合的权值, 利用不同雷达组合初步估计的目标高度值以及参与数据融合的相应权重进行目标高度的融合估计。基于典型算例对所提算法进行验证。结果表明: 该算法能解决目标高度问题, 具有一定的理论意义和较好的应用价值。

关键词: 2D 雷达组网; 高度估计; 贴近度; 一致性测度; 变异系数

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Target Height Estimation Method in 2D Radar Network

Yang Junjia, Zhang Xing, Gao Qiang

(Zhengzhou Campus, PLA Army Academy of Artillery & Air Defense, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In the case of the problem that the height parameter of target cannot be measured by 2D radar, a height estimation method by 2D radar network is proposed. Firstly, the height of target is estimated preliminarily through the redundant parameter information of the same target measured by two 2D-radars. Secondly, the weight of preliminary height estimation between different groups of radar is calculated by definition of closeness degree and consistency measure and mean of consistency and consistency variance and coefficient of variation. Finally, the height of target is estimated on the basis of the fusion weight and the preliminary height estimation. Typical example is used to validate the proposed estimation method. The result shows that the height of target can be estimated well, and the method has theoretical and practical significance.

Keywords: 2D radar network; height estimation; closeness degree; consistency measure; coefficient of variation

0 引言

雷达作为现代战争中必不可少的情报获取手段, 相关技术一直是各国研究的重点。雷达刚问世时, 只能探测目标的距离和方位角 2 维信息, 并且测量精度差。为了能够对目标进行精确定位, 很多学者对目标高度测量的方法、参数测量精度提升的措施等进行了深入研究, 为雷达相关技术及使用方法的改进奠定了基础。文献[1]针对米波雷达在探测低仰角目标过程中受多径效应影响严重, 导致测高结果易出现较大偏差的问题, 采用组网雷达数据融合技术, 利用分辨率不高但数据稳定性好的方位角信息确定搜索范围, 利用分辨率较高的距离信息获取目标的 3 维位置信息。文献[2]针对三坐标雷达测高系统中由于障碍物遮挡波束或者 RCS 闪烁引起目标高度的突变, 采用自适应四波束顺序比幅测角技术以及滤波处理技术过滤噪声获取平滑的目标高度变化曲线。文献[3]针对航空管理和作战指挥系统的需求, 从集中式框架下融合中心的广义量测方程

出发, 推导了融合中心的更新方程, 并将更新方程中的量测用各部雷达的局部跟踪信息来代替, 从而得出目标 3 维状态的估计。文献[4]针对现有目标高度补偿算法存在模型假设不合理、实际应用效果难以保证的问题, 以目标恒海拔等速运动为前提, 利用协同单元提供的目标指示信息解决了两坐标雷达目标空间状态估计问题。文献[5]通过对回波前沿半功率点雷达测高算法、偏差重心雷达测高算法以及平均高度雷达测高算法进行对比仿真分析, 发现平均高度雷达测高算法测量精度最高。文献[6]针对米波雷达多径效应的影响, 总结归纳了基于时空级联 ML 算法的测高方法、基于改进的时空级联 ML 算法的测高方法, 以及基于精确最大似然算法的测高方法, 梳理了 3 种方法之间的相互关系。文献[7]针对两坐标雷达不能提供目标高度或俯仰信息的问题, 根据雷达天线的“仰角-增益”测试数据, 利用目标点迹属性中的高低波束增益差获取目标高度信息, 同时利用加权平均法进行目标高度值的平滑。

收稿日期: 2020-06-28; 修回日期: 2020-07-08

基金项目: 军内科研项目(LJ20191C020359)

作者简介: 杨军佳(1987—), 男, 河南人, 硕士, 讲师, 从事雷达组网及作战使用研究。E-mail: yangjunjia.love@163.com。

文献[8]针对米波雷达多径效应的影响,利用指向偏离搜索仰角的空域滤波器在搜索仰角及对应的多径反射角处,形成 2 个零陷以对消目标直达回波和多径反射回波,进而对阵列信号进行滤波,通过滤波后信号能量最小值的角度信息估计目标仰角和高度。文献[9]针对三坐标雷达双波束测高精度低及高度突跳问题,提出在满足信号处理能力的情况下,采用四波束测量,并利用回波幅度较大的 2 个波束进行仰角测量。文献[10]针对 2D 雷达不能测量目标高度参数的问题,利用 2 部雷达对同一目标参数测量的冗余信息进行目标高度的初步估计,进而利用支持度函数进行不同雷达组合高度估计值参与数据融合权值的确定。文献[11]利用 2D 雷达方位、距离信息形成组网雷达测定目标高度算法,对不同位置误差、目标高度条件下几何量测理论误差进行分析,并利用滤波算法对组网雷达测高进行了工程化应用。文献[12]针对雷达普遍存在距离和角度量测系统误差工程实际情况,以及现有两坐标雷达目标高度可观测分析和估计技术缺乏对雷达系统误差考虑不足之处,利用 Fisher 信息矩阵,通过求解 CRLB 下限,对系统误差下的两坐标雷达目标高度可观测分析问题进行了研究,并对系统误差、雷达配置对目标高度可观测的影响以及目标高度估计精度等问题进行了分析。文献[13]针对三坐标雷达测高误差大的问题,对天线产生测高误差的机理和解决方案等关键技术进行了深入研究,设计实现了三坐标雷达天线动态测高误差自动修正系统。文献[14]针对三坐标雷达高度测量误差对飞行器状态监测性能的影响,分析了影响测高误差的因素,发现了雷达测高误差具有偏向性及分段性特点,并提出了基于最小二乘多项式拟合的误差修正算法。文献[15]针对形状不规则的平面阵列米波雷达由于各行天线阵元数不同引起较大的测高误差,提出一种增加导向矢量系数的改进最大似然超分辨测高方法。文献[16]基于阵地地形、电磁环境、杂波环境、大气环境和人为导致的系统异常等因素,分析了地面雷达测高误差产生的原因,评估了多种因素对测高精度的影响程度,提出了在实际应用中规避影响因素以改善地面雷达测高精度的建议。笔者以不能直接测量目标高度信息的 2D 雷达作为研究对象,深入分析 2D 雷达组网获取目标高度信息的可能性,并在此基础上,通过引入数据融合的相关知识,对不同 2D 雷达组网获取的目标高度信息进行加权融合,以此得到比较理想的目标高度信息。从而在雷达装备更新

换代的过程中,充分发挥 2D 雷达的应用价值。

1 2D 雷达组网目标高度估计可行性分析

图 1 为 2D 雷达与目标 3 维位置关系。其中:点 A 表示其中一部 2D 雷达,坐标为 (x_A, y_A, z_A) ;点 B 表示另外一部 2D 雷达,坐标为 (x_B, y_B, z_B) ;点 C 表示目标,坐标为 (x_C, y_C, z_C) ;点 D 是目标在 XOY 平面上的投影,坐标为 (x_D, y_D, z_D) ;点 D' 是点 B 向 CD 作垂线,且与 CD 的交点,坐标为 $(x_{D'}, y_{D'}, z_{D'})$;点 E 是过点 D 向 X 轴作垂线,且与 X 轴的交点,坐标为 (x_E, y_E, z_E) ;点 E' 是过点 D' 向过 B 点且与 X 轴平行的线作垂线,且与该线的交点,坐标为 $(x_{E'}, y_{E'}, z_{E'})$;2D 雷达 A 对目标 C 的测量距离为 r_A 、测量方位角为 α ,2D 雷达 B 对目标 C 的测量距离为 r_B 、测量方位角为 β 。

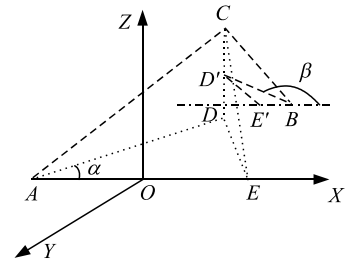


图 1 2D 雷达与目标 3 维位置关系

可以得到:

$$\left. \begin{aligned} z_B &= z_{D'} \\ z_A &= z_D = z_E \\ x_{E'} &= x_E \\ x_C &= x_{D'} = x_D \\ y_C &= y_{D'} = y_D \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

从图 1 中雷达与目标间的位置关系,可以得到:

$$\begin{aligned} &\sqrt{r_A^2 - (z_C - z_D)^2} \cdot \sin(\alpha) = \\ &\sqrt{r_B^2 - (z_C - z_{D'})^2} \cdot \sin(\beta) + (z_{D'} - z_D) \end{aligned} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)可得:

$$\begin{aligned} &\sqrt{r_A^2 - (z_C - z_A)^2} \cdot \sin(\alpha) = \\ &\sqrt{r_B^2 - (z_C - z_B)^2} \cdot \sin(\beta) + (z_B - z_A) \end{aligned} \quad (3)$$

式中,由于 r_A 、 α 、 r_B 、 β 以及 z_A 、 z_B 为已知参数,则可计算出 z_C 的值。

2 2D 雷达组网目标高度融合估计方法

通过分析可知:利用 2 部 2D 雷达获取到的同一目标、同一时间点的距离和方位角信息,可以估算出该目标的高度参数信息。由于雷达对目标距离

和方位角的测量存在误差,导致式(3)计算出的目标高度也存在误差。为了提高目标高度估计精度,将 n 部 2D 雷达两两组合估计的 C_n^2 个目标高度值进行加权融合,以减小距离和方位角测量误差的影响。

2.1 时间统一

为了能够利用 2 部 2D 雷达获取到的同一目标距离和方位角信息估计目标的高度参数,必须将 2 部 2D 雷达关于同一目标距离和方位角参数进行时间统一。

假设 n 部 2D 雷达对其探测范围内的同一目标进行距离和方位角的测量,第 i 部雷达在 t_a 时刻测量的目标参数为 Q_a , t_b 时刻测量的目标参数为 Q_b , 则 t_c 时刻的目标参数采用插值处理,可表示为:

$$Q_c = Q_a + (Q_b - Q_a) / (t_b - t_a) t_c \quad (4)$$

在参数测量信息时间统一时,尽量以采样间隔比较大的参数测量时间为基准,以减小因时间统一引入较大的误差。

2.2 融合估计

在时间统一的基础上,可以依据式(3)计算 n 部 2D 雷达中任意 2 部 2D 雷达组合对同一目标的高度估计。假设 t 时刻第 $i, j (1 \leq i < j \leq n)$ 部 2D 雷达对目标高度的估计值为 h_{ij}^t , 第 $k, l (1 \leq k < l \leq n)$ 部 2D 雷达对目标高度的估计值为 h_{kl}^t 。

定义 1 t 时刻第 i, j 部 2D 雷达对目标高度的估计值 h_{ij}^t 和 h_{kl}^t 之间的贴近期表示为:

$$d_{ij,kl}^t = \min(h_{ij}^t, h_{kl}^t) / \max(h_{ij}^t, h_{kl}^t) \quad (5)$$

则 t 时刻 n 部 2D 雷达两两组合计算的 C_n^2 个目标高度值之间的贴近期矩阵为:

$$D^t = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & d_{12,(n-1)n}^t \\ \vdots & & \vdots \\ d_{(n-1)n,12}^t & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{C_n^2 \times C_n^2} \quad (6)$$

定义 2 t 时刻第 i, j 部 2D 雷达对目标高度的估计值 h_{ij}^t 与其他任意 2 部 2D 雷达对目标高度的估计值之间贴近期的一致性测度表示为:

$$E_{ij}^t = 2 \cdot \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n d_{ij,kl}^t / (n^2 - n) \quad (7)$$

一致性测度 E_{ij}^t 只是反映了在 t 时刻第 i, j 部 2D 雷达对目标高度估计值 h_{ij}^t 与其他任意 2 部 2D 雷

达对目标高度估计值之间的接近程度。为了得到目标高度估计值在融合过程中比较合理的权重值,不能仅依靠某一时刻的一致性测度,而应考虑整个区间的一致性测度。

从统计学的原理入手,运用统计理论中样本均值和方差这 2 个概念来研究某一区间一致性测度所蕴涵的可靠性信息,并以此对目标高度融合估计中的权重进行分配。

定义 3 T 时间区间内第 i, j 部 2D 雷达对目标高度的估计值 h_{ij}^t 与其他任意 2 部 2D 雷达对目标高度估计值之间贴近期的一致性均值表示为:

$$\eta_{ij} = \sum_{t=1}^T E_{ij}^t / T \quad (8)$$

定义 4 T 时间区间内第 i, j 部 2D 雷达对目标高度的估计值 h_{ij}^t 与其他任意 2 部 2D 雷达对目标高度估计值之间贴近期的一致性方差表示为:

$$\delta_{ij} = \left(\sum_{t=1}^T E_{ij}^t - \eta_{ij} \right)^2 / T \quad (9)$$

若 T 时间区间内第 i, j 部 2D 雷达对目标高度的估计值与其他任意 2 部 2D 雷达对目标高度估计值之间贴近期的一致性均值较大,且一致性方差较小,表明第 i, j 部 2D 雷达对目标高度的估计值具有较高的可靠性,在数据融合过程中应具有更高的权重;因此,笔者采用变异系数来描述 2 部 2D 雷达对目标高度估计值的加权系数。

定义 5 T 时间区间内 2 部 2D 雷达对目标高度估计值的变异系数表示为该时间区间内 2 部 2D 雷达对目标高度估计值的一致性均值与方差之比,即

$$\xi = \eta / \delta \quad (10)$$

定义 6 T 时间区间内第 i, j 部 2D 雷达对目标高度的估计值,在 n 部 2D 雷达两两组合计算的 C_n^2 个目标高度估计值数据融合中,所占比重表示为该时间区间内,第 i, j 部 2D 雷达对目标高度的估计值与其他任意 2 部 2D 雷达对目标高度估计值之间贴近期的一致性均值与方差之比,即

$$\omega_{ij} = \xi_{ij} / \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n \xi_{kl} \quad (11)$$

t 时刻 n 部雷达组合目标高度估计值可表示为:

$$h^t = \sum_{1 \leq i < j \leq n} h_{ij}^t \cdot \omega_{ij} \quad (12)$$

2.3 算法流程

依据上述分析,2D 雷达组网目标高度测量方法

的具体流程如图 2 所示。

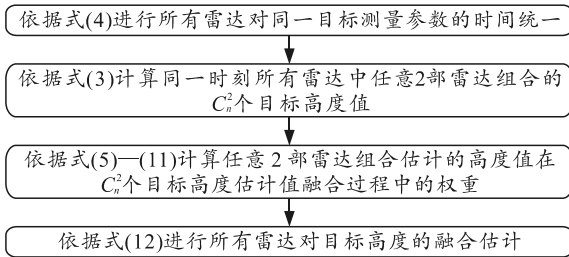


图 2 2D 雷达组网目标高度估计方法流程

3 仿真分析

为简化分析，假设 3 部 2D 雷达的坐标依次为 $(-20\ 000, 0, 0)$ 、 $(20\ 000, 0, 0)$ 、 $(0, -20\ 000, 0)$ ，采样周期均为 1 s，目标初始位置为 $(5\ 000, 20\ 000, 10\ 000)$ ，初始速度为 300 m/s，初始航向为 $\pi/2$ (与 X 轴夹角)、 $\pi/12$ (与 XOY 平面夹角)，目标在 1~10 s 内进行匀加速飞行，加速度为 $60\ \text{m/s}^2$ ，在 10~20 s 内进行匀速飞行。

为便于对比 3 部雷达组网目标高度估计与其中任意 2 部雷达组合目标高度估计的效果，参照统计理论中标准差的概念，定义高度估计精度为某一时间段 $[t_1, t_2]$ 内估计的高度值 h^t 与目标真实高度值 h_{real}^t 之差平方和的算术平方根，具体可表示为：

$$\delta_h = \sqrt{\sum_{t \in [t_1, t_2]} (h^t - h_{\text{real}}^t)^2} \quad (13)$$

3.1 有效性检验

3 部雷达的距离测量精度依次为 50、80、100 m，方位测量精度依次为 0.1° 、 0.15° 、 0.2° ，500 次蒙特卡罗仿真的高度估计精度曲线如图 3 所示，高度估计精度频数分布直方图及拟合曲线如图 4 所示。

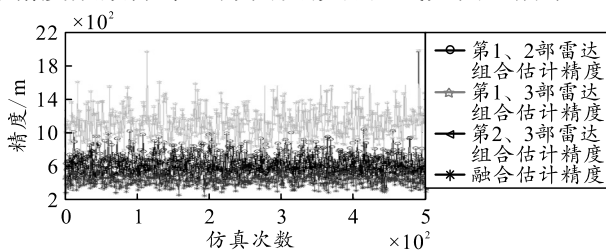
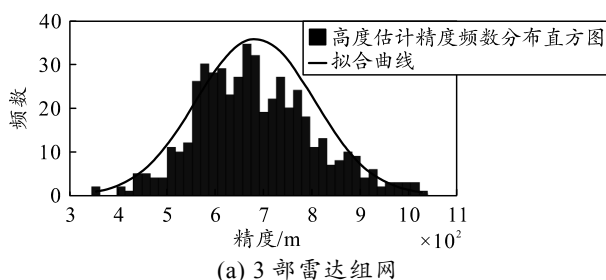
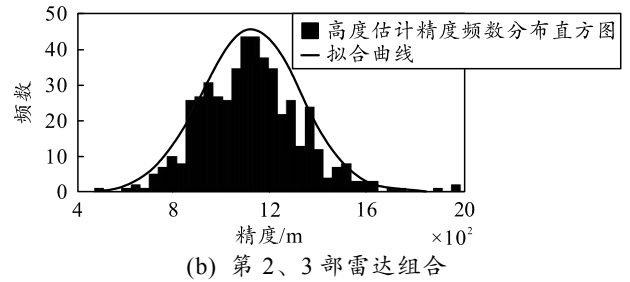


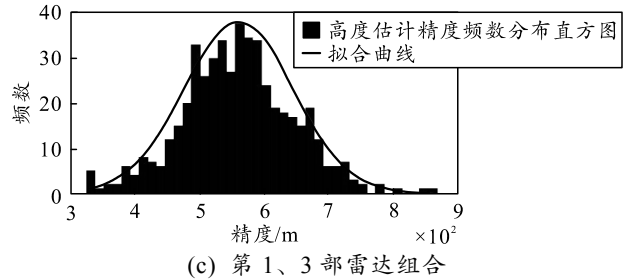
图 3 500 次仿真高度估计精度



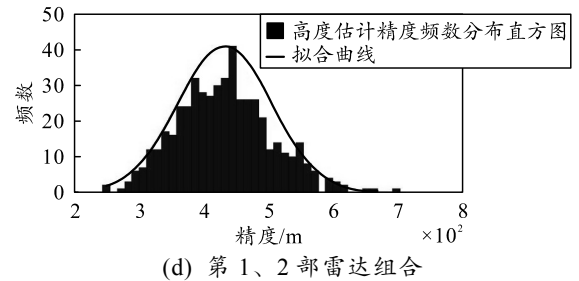
(a) 3 部雷达组网



(b) 第 2、3 部雷达组合



(c) 第 1、3 部雷达组合



(d) 第 1、2 部雷达组合

图 4 高度估计精度频数分布直方图及拟合分布

从图 3、图 4 可以明显看出：采取任意 2 部雷达都能够对目标高度进行估计，只是估计精度不同。其中，第 1、3 部雷达组合高度估计精度较高，第 1、2 部雷达组合高度估计精度次之，第 2、3 部雷达组合高度估计精度最差。但是，采用文中方法后，3 部雷达对于目标高度的融合估计精度比任何 2 部雷达组合高度估计精度都高。

3.2 优越性检验

按照上述实验条件，将文献[10]所述方法以及经典的加权平均方法与文中方法进行对比，500 次蒙特卡罗仿真后，对 3 种不同方法的高度估计精度频数进行数理统计和正态分布拟合，可得 500 次仿真结果的拟合均值如表 1 所示。

表 1 3 种方法高度估计精度正态分布拟合结果

方法	文中方法	文献[10]方法	加权平均方法
拟合均值	433.215 2	438.388 5	456.809 2

表中，3 种方法的优劣顺序依次为：文中方法、文献[10]方法、经典的加权平均方法。

3.3 进一步分析

为了进一步分析文中方法对于不同雷达组合高度估计精度的优劣，设置实验 2—5，具体参数如表

2 所示。

表 2 3 部雷达距离和方位测量精度

实验	雷达 1		雷达 2		雷达 3	
	距离精度/m	方位精度/(°)	距离精度/m	方位精度/(°)	距离精度/m	方位精度/(°)
2	50.00	0.10	50.00	0.15	50.00	0.20
3	80.00	0.10	80.00	0.15	80.00	0.20
4	50.00	0.10	80.00	0.10	100.00	0.10
5	50.00	0.20	80.00	0.20	100.00	0.20

依据表 2 中 4 种实验条件进行 500 次蒙特卡罗仿真，仿真结果如图 5 所示。

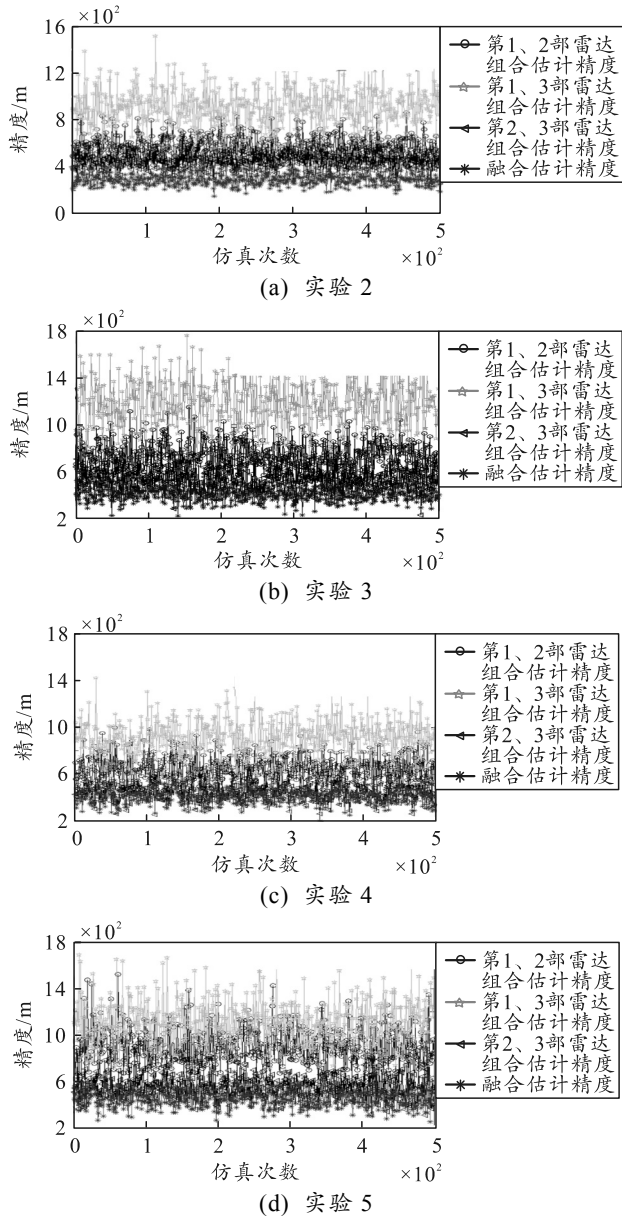


图 5 不同实验 500 次仿真高度估计精度

从图 5 中仿真结果可以看出：

1) 高度估计精度与雷达的距离测量精度以及方位角测量精度有关。同一实验中，2 部 2D 雷达之间的参数测量精度差异越小，其两者进行高度组合

估计的精度越高；不同实验之间，2 部 2D 雷达的距离和方位角测量精度越高，其两者进行高度组合估计的精度越高。

2) 进行加权融合后的高度估计精度明显优于任意 2 部 2D 雷达组合对目标的高度估计精度。主要原因是：依据越靠近真实值的数据出现概率应该是最大的大数定律，通过计算不同高度值之间的一致性测度，可以比较科学地确定不同高度值参与融合的权重。

4 结束语

笔者针对不能提供目标高度信息的 2D 雷达在装备更新换代过程中被大量淘汰的实际情况，通过分析 2 部 2D 雷达对同一目标进行探测，利用不同雷达对同一目标距离和方位参数测量的冗余信息，依据空间几何关系，计算得出目标的高度信息。针对利用存在参数测量误差的不同雷达对同一目标高度信息进行估计时出现较大误差的情况，依据越靠近真实值的数据出现概率应该是最大的大数定律，通过定义不同数据之间的贴进度、一致性测度、一致性均值、一致性方差以及变异系数来确定不同雷达组合获取到的同一目标高度信息的可信程度，进而通过加权融合的方式获得可信度较高的目标高度信息。依据笔者提供的目标高度估计方法，能够得到较精确的目标高度信息，为装备更新换代过程中 2D 雷达的价值发挥提供理论参考。

参考文献：

- [1] 夏添, 沈一鹰, 刘永坦, 等. 基于虚拟平面的米波组网雷达测高算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(6): 1476-1482.
- [2] 刘伟超, 成思邈, 齐放, 等. 一种电扫描三坐标雷达测高系统设计[J]. 现代雷达, 2017, 39(1): 9-11.
- [3] 严俊坤, 戴奉周, 刘宏伟, 等. 基于分布式两坐标雷达网络的目标三维跟踪算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(5): 1055-1061.
- [4] 崔亚奇, 熊伟, 何友. 基于目标指示的两坐标警戒雷达目标高度补偿状态估计[J]. 电子学报, 2015, 43(3): 475-482.
- [5] 肖雷, 周秀珍. 宽波束雷达测高算法[J]. 舰船电子对抗, 2018, 41(3): 104-106.
- [6] 赵永波, 霍炯, 朱玉堂, 等. 阵列米波雷达测高方法及性能分析[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(12): 3205-3211.
- [7] 陈磊, 方青. 一种基于波束增益差的两坐标雷达估高方法[J]. 舰船电子对抗, 2015, 38(4): 33-35.

- [8] 吴剑旗, 杨雪亚. 一种基于空域滤波的米波雷达测高新方法[J]. 现代雷达, 2015, 37(3): 1-4.
- [9] 刘玉杰, 刁丹丹, 张涛, 等. 一种改进的三坐标雷达测高方法[J]. 现代电子技术, 2014, 37(5): 16-18.
- [10] 杨军佳, 时银水, 王世军, 等. 基于支持度函数的 2D 雷达组网目标高度估计方法[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(11): 84-88.
- [11] 郭徽东, 裴雷. 2D 雷达组网对空中目标高度估计仿真[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(5): 77-80.
- [12] 龚诚, 崔亚奇, 刘思琪. 系统误差情况下两坐标雷达目标高度可观测分析[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(10):

70-73.

- [13] 王敏, 杨江平, 郭戈, 等. 三坐标雷达测高误差修正系统设计及实现[J]. 军械工程学院学报, 2017, 29(2): 79-83.
- [14] 冯涛, 李吉, 杜旭, 等. 三坐标雷达测高误差数据统计分析与修正[J]. 空军预警学院学报, 2015, 29(4): 258-261.
- [15] 谢腾飞, 杨雪亚. 平面阵列米波雷达超分辨率测高技术研究[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(2): 164-167.
- [16] 孔凡泉, 胡丙华. 影响地面雷达测高精度的因素[J]. 现代电子技术, 2014, 37(7): 35-37.

(上接第 4 页)

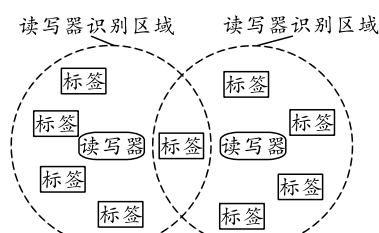


图 4 多读写器碰撞

4 结束语

笔者设计了基于 RFID 技术的导弹装备信息化管理方案, 在装备管理中引入电子铅封技术, 探索了 RFID 系统频率选择、编码方式、防碰撞策略等关键问题的解决方案。在导弹装备管理中运用 RFID 技术, 可以有效解决传统方法工作繁琐、效率低下、出错率高和安全风险大等问题。随着 RFID 技术的不断成熟, 在部队装备管理中的运用势必会越来越广泛, 是未来部队信息化建设的一个发展方向。在进行理论研究的基础上, 笔者将对系统的具体实现, 包括硬件配置、软件系统开发等进行深入研究, 通过实际运用来检验 RFID 技术在装备信息化管理中的适用性和优越性。

参考文献:

- [1] 宁焕生, 王睿. RFID 重大工程与国家物联网[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 169-173.
- [2] 任少杰, 郝永生. 基于 RFID 的导弹装备管理方法研究[J]. 包装工程, 2018, 36(15): 153-158.
- [3] 张立新, 沈云秋, 李锦冬. 基于 RFID 技术的导弹武器

装备管理与保障应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(1): 122-128.

- [4] 顾保国, 赵国庆, 叶彬, 等. 基于 RFID 技术的装备保障管理方法研究[J]. 测控技术, 2018, 37(增刊): 296-299.
- [5] 曹小阳. 基于物联网 RFID 技术的智能仓储系统的设计与实现[J]. 现代信息科技, 2017, 1(5): 75-77.
- [6] 陈媛媛, 张恒龙. 基于物联网 RFID 智能化仓库系统设计[J]. 电子科技, 2014, 27(9): 68-70.
- [7] 舒晓斌, 李国厚. 物联网在物流智能仓储系统中的应用研究[J]. 信息与电脑, 2018, 1(6): 143-147.
- [8] 戚伟. RFID 系统防碰撞算法的分析[J]. 淮南职业技术学院学报, 2012, 12(46): 22-24.
- [9] 杨晓娇, 吴必造. RFID 系统中的碰撞问题研究[J]. 电脑知识与技术, 2017, 13(1): 276-278.
- [10] 王立群, 昝志勇, 丁莉静, 等. 采用 RFID 标签的智能铅封技术研究[J]. 水电能源科学, 2012, 20(10): 183-185.
- [11] 曾志辉, 鄧富标. 基于 RFID 技术的电子铅封管理系统研究[J]. 电子器件, 2017, 40(1): 183-187.
- [12] 张霖, 巴继东, 熊伟. 基于电子铅封的石油运输车辆监控系统[J]. 计算机系统应用, 2016, 25(2): 105-110.
- [13] 何伟健, 陆江成, 周灿煜, 等. 基于时隙分组的超高频 RFID 防碰撞算法[J]. 计算机工程, 2018, 44(6): 283-287.
- [14] 姜明泉, 高保友, 李亚楠, 等. 射频铅封管理系统在加油站的应用[J]. 石油库与加油站, 2012, 21(3): 20-22.
- [15] 许吉斌, 李少波, 潘伟杰, 等. 特色食品的 RFID 编码策略研究及应用[J]. 计算机工程与技术, 2013, 34(2): 716-720.