文章编号：1673–1522（2012）02-0191–05

2D 雷达与 3D 雷达航迹关联问题研究

熊 伟[1, 2]，孙宇宸[1]，高 峰[1]

（1. 海军航空工程学院电子信息工程系，山东 烟台 264001；2. 中国航天科工集团四院，北京 100854）

摘 要：对 2D 雷达与 3D 雷达的航迹关联问题进行了研究，提出了两种通过升维来达到航迹关联的算法，解决了 2D 雷达与 3D 雷达同地、异地配置的关联问题。通过典型环境下的仿真，体现了算法较好的关联性能和较强的鲁棒性。

关键词：航迹关联；升维；雷达组网

中图分类号：TN957.51 **文献标志码**：A

雷达组网充分利用各个雷达的资源和信息融合优势，借助通信手段连接成网，由中心站统一调配，通过多个雷达之间的协调和性能互补的优势，克服了单个雷达的不确定性，提高了整个组网系统的整体作战能力。但其前提是各个雷达之间数据必须要进行有效的航迹关联。航迹关联是多目标跟踪系统中的关键环节，是进行目标航迹融合、状态估计以及态势评估的基础，航迹关联的是否精确直接影响整个系统的性能[1-5]。

航迹关联模型一般要求同时对 2 部或 2 部以上雷达进行航迹关联，并且雷达的量测维数必须一致。现实的雷达网中装备着大量的 2D 雷达，但又经常存在其他种类和性质的雷达，典型的情况是 2D 雷达与 3D 雷达同时对目标进行观测。如何将 2D 雷达和 3D 雷达的信息进行有效地航迹关联，以便在融合中心获得更为精确的目标状态估计，这是目前许多多雷达系统需要解决的一个重要问题[6-9]。

本文通过建立1部2D雷达与1部3D雷达对目标观测的几何模型，采用2D雷达升维来达到维数匹配的问题，从而解决2D雷达与3D雷达的航迹关联问题。

1 升维法

1.1 赋给仰角升维

1)粗关联。

2D 雷达与 3D 雷达的量测如图 1 所示，设 2D 雷达和 3D 雷达的量测向量分别为：

$(r_{2D}^{i}(k),\theta_{2D}^{i}(k)),i=1,2,\cdots,M$ ，

$(r_{3D}^{j}(k),\theta_{3D}^{j}(k),\varphi_{3D}^{j}(k)),j=1,2,\cdots,N$ 。

式中，M 、N 分别代表2D雷达和3D雷达探测到的目标个数，k 代表时刻。

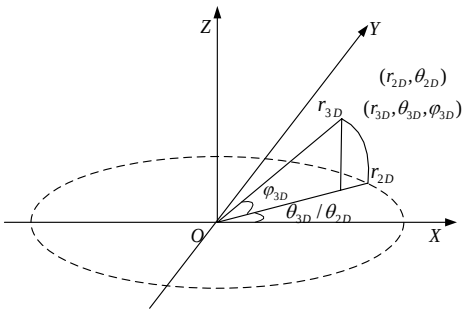


图 1 2 坐标雷达与 3 坐标雷达的量测

由于 2D 雷达缺少俯仰信息，所以先从距离和方位信息着手，进行航迹粗关联，挑选出可能关联的粗关联对。对于 3D 雷达的每一个目标 j，通过距离和方位信息，在 2D 雷达中找到与其粗关联的目标序列 $[i^*]$，设其长度大小为 $s=\text{size}[i^*]$，粗关联的表达式如下：

$$\begin{cases}\left|r_{3D}^{j}(k)-r_{2D}^{i}(k)\right|<\Delta r\\ \left|\theta_{3D}^{j}(k)-\theta_{2D}^{i}(k)\right|<\Delta\theta\end{cases},\tag{1}$$

式中，Δr 和 $\Delta\theta$ 为相关波门，可以通过具体的仿真来确定[10]。

收稿日期：2011-04-13； **修回日期**：2012-02-17

基金项目：国家自然科学基金资助项目（60801049）；国家自然科学基金重点基金资助项目（61032001）

作者简介：熊 伟（1977–），男，副教授，博士。

通过上式在2D雷达中找到与3D雷达粗关联的目标序列$[i^*]$,并把与粗关联目标序列$[i^*]$对应的3D雷达的俯仰信息赋给 2D 雷达的粗关联目标序列，这样，2D 雷达的量测向量就升到三维，与 3D 雷达量测向量形成匹配，为下面的航迹精关联做好了准备。

2)精关联。

按上述方法进行粗关联判决,3D 雷达航迹集合中的 1 条航迹可能与 2D 雷达航迹集合中的多条航迹粗关联成功。然而，每一个量测只能有 1 个源。也就是说,3D 雷达航迹集合中的 1 条航迹至多只能与 2D 雷达航迹集合中的 1 条航迹关联，反之亦然。因此，在粗关联成功之后，将进行航迹精关联，以确保信息相关的准确率。

升维后,2D 雷达与 3D 雷达的粗关联对表示为：

$(r_{2D}^{i^*}(k),\theta_{2D}^{i^*}(k),\varphi_{3D\to 2D}^{i^*}(k))$ 、

$(r_{3D}^{j}(k),\theta_{3D}^{j}(k),\varphi_{3D}^{j}(k))$。

把 2D 雷达与 3D 雷达的粗关联对转换到直角坐标系下，得到目标的量测向量分别为：

$(x_{2D}^{i^*}(k),y_{2D}^{i^*}(k),z_{3D\to 2D}^{i^*}(k))$ 、

$(x_{3D}^{j}(k),y_{3D}^{j}(k),z_{3D}^{j}(k))$。

在每一组粗关联对中找出唯一的精关联对，以达到 2D 雷达与 3D 雷达航迹关联的目的。

假设 2D 雷达与 3D 雷达对同一目标的状态估计误差是统计独立的，利用检验统计量 $\alpha_{3D,2D}^{j,i^*}(k)$ 对粗关联对进行精关联检测。

$$\alpha_{3D,2D}^{j,i^*}(k)=(X_{3D}^{j}(k)-X_{2D}^{i^*}(k))'\cdot (P_{3D}^{j}(k)+P_{2D}^{i^*}(k))^{-1}\cdot(X_{3D}^{j}(k)-X_{2D}^{i^*}(k)), \quad (2)$$

式中：X 是状态估计向量；P 是状态估计误差协方差。

这里我们构建关联矩阵如下：

2D 雷达

$$i^*=1 \quad 2 \quad \cdots \quad s$$

$$\text{3D 雷达}\begin{matrix} j=1 \\ 2 \\ \vdots \\ N \end{matrix}\begin{bmatrix} \alpha_{3D,2D}^{1,1} & \alpha_{3D,2D}^{1,2} & \cdots & \alpha_{3D,2D}^{1,s} \\ \alpha_{3D,2D}^{2,1} & \alpha_{3D,2D}^{2,2} & \cdots & \alpha_{3D,2D}^{2,s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{3D,2D}^{N,1} & \alpha_{3D,2D}^{N,2} & \cdots & \alpha_{3D,2D}^{N,s} \end{bmatrix}$$

在关联矩阵中，粗关联不成功的元素项设为 $+\infty$。

在关联矩阵的每一行找出最小的元素且该元素要小于使用 χ^2 分布获得的某一门限,作为每一个粗关联组最终的唯一精关联对，若最小的元素大于门限值，则表明该粗关联组中没有与 3D 雷达关联的航迹；若小于门限值的最小元素不止一个，则取使航迹间位置差矢量序列的平均范数最小的 i^* 为最终关联对，即选择使下式成立的 i^* 为 j 的关联对，

$$i^*=\arg\min_{i^*\in\{i^{*1},i^{*2},\cdots,i^{*q}\}}\frac{1}{K}\left(\sum_{k=1}^{K}\left\|\Delta X_{i^*,j}(k)\right\|\right), \quad (3)$$

式中：$\Delta X_{i^*,j}(k)$ 为航迹在 k 时刻的位置差；$\{i^{*1},i^{*2},\cdots,i^{*q}\}$ 是使 $\alpha_{3D,2D}^{j,i^*}$ 相等的航迹 i^* 的编号集合。

赋给仰角升维由于在粗关联中要用到 2D 雷达与 3D 雷达距离和方位信息的比较，所以该法只适用于 2D 雷达与 3D 雷达同地配置的情况。

1.2 估算仰角升维

同样，这里假设2D雷达的量测向量为 $(r_{2D}^{i}(k),\theta_{2D}^{i}(k)),i=1,2,\cdots,M$，3D雷达的量测向量为 $(r_{3D}^{j}(k),\theta_{3D}^{j}(k),\varphi_{3D}^{j}(k)),j=1,2,\cdots,N$，其中，$M$、$N$ 分别代表2D雷达和3D雷达探测到的目标个数，k 代表时刻(见图2)。

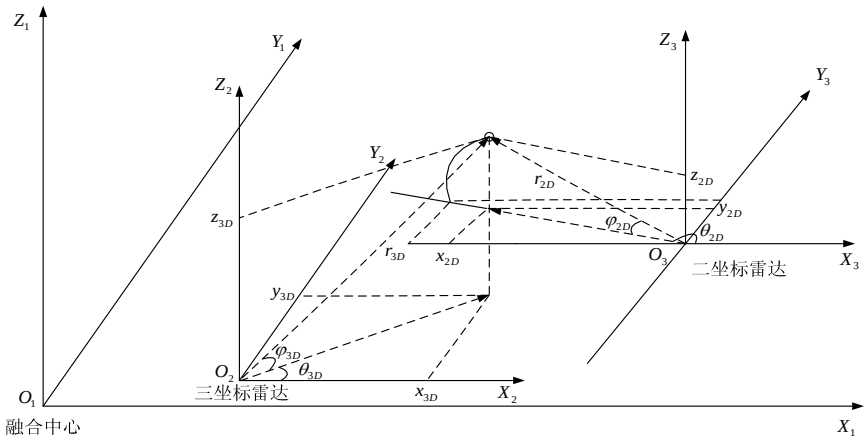


图 2 估算仰角与估算高度模型图

对 k 时刻同一个目标来说，它在地球坐标系下的位置是固定不变的。因此，可以利用这一特性来估算出2D雷达目标测量所缺的俯仰角。

假设3D雷达在地球坐标系下的坐标为 (X_{3D},Y_{3D},Z_{3D})，2D雷达在地球坐标系下的坐标为 (X_{2D},Y_{2D},Z_{2D})，对于3D雷达 k 时刻的每一个目标 j ($j=1,2,\cdots,N$)，估算出该时刻2D雷达中所有目标的俯仰角，估算俯仰角的表达式：

$$\begin{cases} r_{3D}^{j}(k)\sin\left(\varphi_{3D}^{j}(k)\right)+Z_{3D}=r_{2D}^{1}(k)\sin\left(\varphi_{2D}^{1}(k)\right)+Z_{2D} \\ r_{3D}^{j}(k)\sin\left(\varphi_{3D}^{j}(k)\right)+Z_{3D}=r_{2D}^{2}(k)\sin\left(\varphi_{2D}^{2}(k)\right)+Z_{2D} \\ \vdots \\ r_{3D}^{j}(k)\sin\left(\varphi_{3D}^{j}(k)\right)+Z_{3D}=r_{2D}^{M}(k)\sin\left(\varphi_{2D}^{M}(k)\right)+Z_{2D} \end{cases}。\quad (4)$$

解式(4)得

$$\begin{cases} \varphi_{2D}^{1}(k)=\arcsin\left(\dfrac{r_{3D}^{j}(k)\sin\left(\varphi_{3D}^{j}(k)\right)+Z_{3D}-Z_{2D}}{r_{2D}^{1}(k)}\right) \\ \varphi_{2D}^{2}(k)=\arcsin\left(\dfrac{r_{3D}^{j}(k)\sin\left(\varphi_{3D}^{j}(k)\right)+Z_{3D}-Z_{2D}}{r_{2D}^{2}(k)}\right) \\ \vdots \\ \varphi_{2D}^{M}(k)=\arcsin\left(\dfrac{r_{3D}^{j}(k)\sin\left(\varphi_{3D}^{j}(k)\right)+Z_{3D}-Z_{2D}}{r_{2D}^{M}(k)}\right) \end{cases}。\quad (5)$$

在估算出 k 时刻3D雷达目标 j 相对于2D雷达各个目标的俯仰角之后，2D雷达目标的量测向量就表示为 $\left(r_{2D}^{i}(k),\theta_{2D}^{i}(k),\varphi_{2D}^{i}(k)\right),i=1,2,\cdots,M$。由在地球坐标系下，对 k 时刻同一目标的位置是固定不变的特性，把 k 时刻3D雷达目标 j 的极坐标信息转换到直角坐标系下为 $\left(x_{3D}^{j}(k),y_{3D}^{j}(k),z_{3D}^{j}(k)\right)$，再转换到地球坐标系下，得到3坐标雷达目标 j 的量测向量为 $\left(x_{3D_G}^{j}(k),y_{3D_G}^{j}(k),z_{3D_G}^{j}(k)\right)$，在地球坐标系下经滤波最终得到3D雷达的滤波值 $\left(X_{3D}^{j}(k),Y_{3D}^{j}(k),Z_{3D}^{j}(k)\right)$；然后把2D雷达目标的量测向量 $\left(r_{2D}^{i}(k),\theta_{2D}^{i}(k),\varphi_{2D}^{i}(k)\right),i=1,2,\cdots,M$ 转换到直角坐标系下为 $\left(x_{2D}^{i}(k),y_{2D}^{i}(k),z_{2D}^{i}(k)\right),i=1,2,\cdots,M$，再转换到地球坐标系下，得到2坐标雷达 M 个目标量测向量为 $\left(x_{2D_G}^{i}(k),y_{2D_G}^{i}(k),z_{2D_G}^{i}(k)\right)$，在地球坐标系下经滤波最终得到2D雷达的滤波值 $\left(X_{2D}^{i}(k),Y_{2D}^{i}(k),Z_{2D}^{i}(k)\right),i=1,2,\cdots,M$。

在得到 k 时刻3D雷达目标 j 的滤波值与2D雷达目标 M 个滤波值后就可以作关联了，2D雷达 M 个目标的滤波值符合关联规则的，则认为该2D雷达目标与3D雷达的目标 j 关联。关联时利用检验统计量 $\alpha_{3D,2D}^{j,i}(k)$ 进行关联检测，

$$\alpha_{3D,2D}^{j,i}(k)=(X_{3D}^{j}(k)-X_{2D}^{i}(k))'\cdot (P_{3D}^{j}(k)+P_{2D}^{i}(k))^{-1}\cdot(X_{3D}^{j}(k)-X_{2D}^{i}(k))。\quad (6)$$

当 $\alpha_{3D,2D}^{j,i}(k),i=1,2,\cdots,M$ 没有小于使用 χ^2 分布获得的某一门限时，则认为 3D 雷达的目标 j 与任何 2D 雷达目标都不关联，即 3D 雷达目标 j 漏关联。否则，选取使 $\alpha_{3D,2D}^{j,i}(k)$ 最小的 i^* 作为 j 的关联对。当最小的 i^* 不止一个时，则取使航迹间位置差矢量序列的平均范数最小的 i^* 为最终关联对，同式(3)。

在完成3D雷达目标 j 的航迹关联后，再重复利用上述方法进行3D雷达其他目标与2D雷达的航迹关联。

从上述的推导可以看出，估算仰角升维既适用于2D雷达与3D雷达同地配置的情况，也可适用于两者异地配置的情况，在不考虑地球曲率影响距离的情况下，有较强的适应性[11]。

2　仿真

2.1　仿真环境

考虑一部2D雷达与一部3D雷达同地配置的情况，坐标均为(2 000 m, 3 000 m, 5 000 m)，三维空间中 20 架战机进行匀速直线运动，战机的初始 x 、y 、z 位置均在 10 000 ~ 30 000 m 间产生，战机的初始速度在 40~100 m/s 间均匀分布，初始方位角在 0 ~ 2π间均匀分布，初始俯仰角在 0 ~ π/2 间均匀分布。假设 2D 雷达的测距和测方位角误差为 $\sigma_{2D}^{r}=180$ m、$\sigma_{2D}^{\theta}=0.018$，3D 雷达的测距、测方位角和测俯仰角误差为 $\sigma_{3D}^{r}=150$ m、$\sigma_{3D}^{\theta}=0.015$ 、$\sigma_{3D}^{\varphi}=0.015$，不考虑雷达系统误差的影响，2 部雷达的采样间隔均为 $T=2$ s，用蒙特卡洛方法进行 50 次仿真，每次仿真时长为 $N=40$ s。仿真时使用搭载 Pentium(R) Dual-core E2210 CPU、NVIDIA GeForce 9400 GT 显卡，装有 Microsoft Windows XP Professional Service Pack 3 系统的电脑。

2.2　仿真结果与分析

图3给出了仿真环境，20架战机在两部雷达的监视区域内做匀速直线运动；图4、5、6分别给出了仿真环境下，2D雷达与3D雷达两种航迹关联算法的正确、错误与漏关联概率，从图中可以看出，估算仰角升维的正确关联概率要高于赋给仰角升维，达到0.988 8左右。此外它的漏关联概率均为0，但是赋给仰角算法的正确关联概率也非常高，相比较估算仰角升维，只下降了1.557 4%。

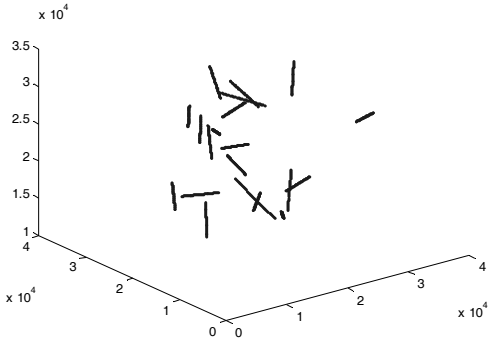


图 3　仿真环境

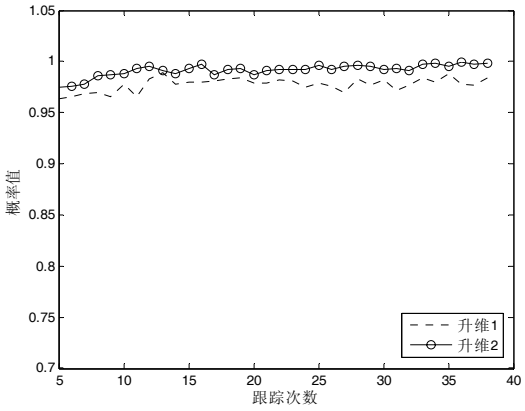


图 4　正确关联概率

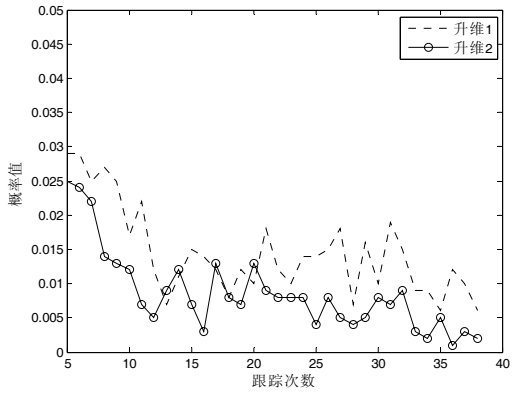


图 5　错误关联概率

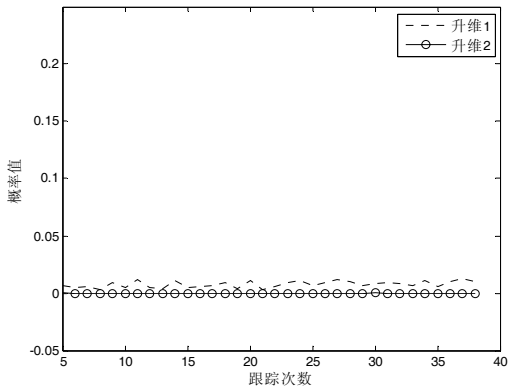


图 6　漏关联概率

图7给出了目标批数为20时两种算法耗时比较图，图8给出了算法耗时随目标批数变化图。从图中可以看出估算仰角升维的耗时要大于赋给仰角升维，实时性略不如赋给仰角升维。

图4~8中，升维1代表赋给仰角升维，升维2代表估算仰角升维。

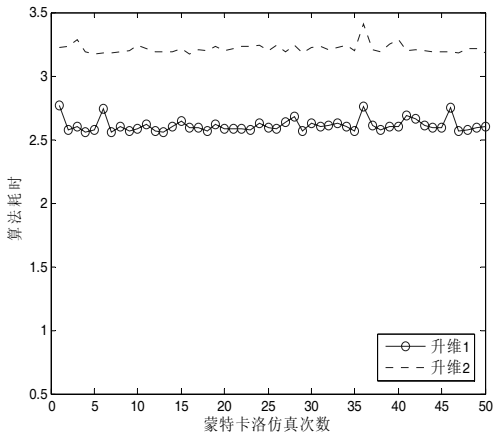


图 7　算法耗时比较图

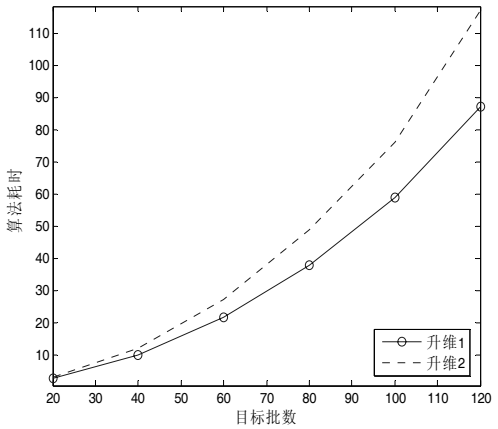


图 8　算法耗时随目标批数变化图

表1给出了两种航迹关联算法随目标个数增加的关联概率，从表中可以看出两种关联算法随目标个数的增加下降都很小，相邻目标批数级之间，降幅最大的只有1.32%，两种算法均能维持较好的关联性能，即使是在目标非常密集(120批)的情况下，它们的正确关联概率最低的也能达到92%以上，具有较强的鲁棒性。

表1　降维法与升维法的航迹关联概率

目标批数	赋给仰角升维			估算仰角升维		
	正确关联概率	错误关联概率	漏关联概率	正确关联概率	错误关联概率	漏关联概率
20	0.973 4	0.018 8	0.007 8	0.988 8	0.011 2	0
40	0.964 7	0.029 6	0.005 7	0.975 6	0.024 4	0
60	0.952 8	0.043 0	0.004 2	0.963 0	0.037 0	0
80	0.941 9	0.054 8	0.003 3	0.951 5	0.048 5	0
100	0.933 1	0.064 3	0.002 6	0.940 3	0.059 7	0
120	0.920 0	0.077 9	0.002 1	0.928 8	0.071 2	0

4　总结

本文针对在工程应用中2D雷达没有俯仰观测，无法直接进行2D雷达和3D雷达航迹关联的问题，通过利用2D雷达升维，以达到维数匹配的目的，从而实现2D雷达和3D雷达的航迹关联。仿真结果表明，本文提出的算法均具有较好的关联效果，且有较强的鲁棒性。但是，如何把升维带来的误差引入到2D雷达和3D雷达的航迹关联中，以进一步提高航迹关联的准确性，是进一步要研究的问题。

参考文献：

[1] BAR-SHALOM Y, WILLIAM D B. Multitarget-Multi-sensor Tracking, Applications and Advances[M]. New York: Artech House, 2001:143-147

[2] BAR-SHALOM Y. A Tutorial on Multitarget-Multi-sensor Tracking and Fusion[C]//IEEE National Radar Conference. New York, 1997.

[3] 何友. 分布式多传感信息融合算法研究[D]. 北京: 清华大学, 2006:83-87.

[4] 何友，王国宏，陆大绘，等. 多传感器信息融合及应用[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2000:128-183.

[5] 王本才，何友，王国宏，等. 双战无源均值定位算法精度分析[J]. 四川兵工学报, 2010,31(4):78-81.

[6] 徐毓，李锋. 不同维状态的多传感器航迹融合[J]. 传感技术报, 2004,17(2):117-121.

[7] 何友，熊伟. 带反馈分布式不同维传感器状态估计技术[J]. 宇航学报, 2003,24(6): 574-578.

[8] 张殿程，江晶，陆泳舟. 两坐标与三坐标雷达配准方法及其应用分析[J]. 空军雷达学院学报，2009,23(6): 391-398.

[9] 高蕊，秦超英，张希彬. 不同维状态的多传感器 MAP 航迹融合方法[J]. 昆明理工大学学报，2006,31 (3):117-120.

[10] 文云峰，石章松，王芳. 基于多假设的航迹关联方法研究[J]. 舰船科学技术, 2011,49(2)

[11] 朱红绯. 地球曲率对双基地雷达定位精度影响的计算机仿真[C]//中国自动化学会第十六届青年学术年会. 北京: 解放军出版社, 2001:641-644.

Research on the Track Association Problem between 2D Radar and 3D Radar

XIONG Wei[1, 2]，SUN Yu-chen[1]，GAO Feng[1]

（1．Department of Electronic and Information Engineering，NAAU，Yantai Shandong 264001，China；
2．The Fourth Research Academy of CASIC，Beijing 100854，China）

Abstract: In this paper, the track association problem between 2D radar and 3D radar was discussed, two sorts of track association algorithm was put forward based on dimension-ascended measure, which solved track association problem while 2D radar and 3D radar were located in the same place and different places. Under the simulation of typical environment, its preferable track association performance and robust city were showed.

Key words: track association; rising dimension-ascended; net of radars