

# 基于相控阵雷达组网的多传感器管理算法

白剑林<sup>1</sup>, 霍亮<sup>1</sup>, 刘鹏<sup>2</sup>, 张平定<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051)

**摘要:**信息化条件下的防空作战,建立一体的探测预警网络是夺取信息优势的技术保证,而实现传感器资源科学合理的分配则是提高防空探测预警网络信息获取效率的重要手段。为了充分发挥防空探测预警网络的功能及性能,必须在环境条件容许的情况下,对相控阵雷达组网有限的传感器资源进行科学合理的分配,提高探测预警网络的整体效能,进而提高防空作战效能。针对相控阵雷达组网的多传感器资源管理优化问题,介绍了相控阵雷达的特性和组网的意义,提出了基于相控阵雷达组网的相对熵多传感器管理算法。该算法通过计算传感器对目标的相对熵不确定性,获得每个传感器对每个目标最大的信息量,以此作为代价函数,进行多传感器对多目标的优化分配,仿真结果表明该算法的有效性。

**关键词:**防空作战;多传感器管理;相控阵雷达;组网;相对熵

**中图分类号:** TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)06-0042-05

传感器资源管理问题,特别是相控阵雷达的资源管理问题,其研究起步较晚,目前成熟的方法不多<sup>[1]</sup>。文献[2]提出了基于最大检测概率的传感器搜索策略,这种策略对于搜索单目标成功率较高,但对于多目标则错误率较高;文献[3]、[4]基于分辨力给出了单传感器和多传感器对多目标的资源分配方法,但在定义分辨力时需要先验概率分布;文献[5]基于效能函数提出了一种传感器管理方法,虽简单可行,但某些因素的合理量化尚待进一步研究。文中以信息化防空作战为背景,利用相对熵不确定性的信息增量,提出了一种基于相对熵的相控阵雷达组网多传感器资源管理算法。

## 1 相控阵雷达特性分析

地空导弹武器系统装备的相控阵雷达,实际上是相控阵跟踪测量系统,它同时结合了单脉冲角度跟踪技术和相控阵波束捷变技术,实现了对目标跟踪的优点,它的主要功能特点如下<sup>[6]</sup>:多目标跟踪;跟踪精度高;自主截获能力强;跟踪范围大;跟踪资源控制。

对于地面防空系统,可以将目标分为几类,对威胁不大的目标只需对其进行监视,跟踪数据率与测量精度要求可以低一些;只有对威胁程度较高、需要攻击的目标才保证较高的测量精度与数据率。相控阵跟踪测量雷达进行动态目标跟踪测量的资源控制,可以充分合理地利用雷达资源。

## 2 相控阵雷达网中的资源管理

相控阵雷达组网就是通过对多部不同体制、不同频段、不同极化方式的雷达适当布站,对网内各部雷达的信息,形成“网”状收集与传递,并由中心站综合处理、控制和管理,从而形成一个统一的有机整体。网内

\* 收稿日期:2007-12-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60773209)

作者简介:白剑林(1980-),男,陕西子洲人,博士生,主要从事传感器管理及信息处理研究。

E-mail: baijianlin\_2004@163.com

各雷达的信息汇集至中心站综合处理,得出雷达网覆盖范围内的情报信息、战场区域态势等<sup>[7]</sup>。相控阵雷达组网的意义为:情报资源共享;实现反隐身的目的;实现优势互补;获得更高精度的数据信息;工作方式更加灵活多变。

在相控阵雷达组网融合跟踪系统中,由于相控阵雷达具备的变采样间隔工作方式,大大增加了雷达组网系统中资源管理问题的复杂性,它引入了变采样间隔的时间资源管理问题,以及空间资源和时间资源的联合管理问题。

### 3 基于相对熵的多传感器管理算法

将基于相对熵的传感器管理方法应用在依据模型估计的系统时,根据使用的状态估计方法不同,代价系数计算形式不同,导致传感器对目标的分配方案不同。Kalman 滤波器作为一种在数学结构上比较简单的最优线性递推状态估计算法,在工程实际中得到了广泛地应用。

#### 3.1 Kalman 滤波器

假设有  $m$  个传感器,第  $i$  个传感器的目标状态模型为<sup>[8]</sup>

$$\mathbf{x}_i(k+1) = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{G}_i \mathbf{w}_i(k) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{A}_i$  为  $n \times n$  状态转移矩阵;  $\mathbf{G}_i$  为  $n \times m$  输入转移阵;  $\mathbf{x}_i(k)$  为  $n$  维目标状态向量且初值为  $x_{i0}$ , 方差为  $X_{i0}$ ;  $\mathbf{w}_i(k)$  为  $m$  维模型噪声,服从  $N(0, \mathbf{Q}_i)$  的高斯白噪声,  $\mathbf{Q}_i$  为协方差矩阵。

观测模型为

$$\mathbf{z}_i(k) = \mathbf{H}_i \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{G}_i \mathbf{v}_i(k) \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{H}_i$  为  $m \times n$  的传感器测量矩阵;  $\mathbf{z}_i(k)$  为  $m$  维测量向量;  $\mathbf{v}_i(k)$  为二维的测量噪声,  $\mathbf{v}_i(k)$  服从  $N(0, \mathbf{R}_i)$ ,  $\mathbf{R}_i$  为协方差矩阵;  $\mathbf{w}_i(k)$  和  $\mathbf{v}_i(k)$  相互独立。

融合中心的状态和方差的更新为<sup>[9]</sup>

$$\hat{\mathbf{x}}_i(k+1|k+1) = P_i(k+1|k+1) \{ P_i^{-1}(k+1|k) \hat{\mathbf{x}}_i(k+1|k) + \sum_{j=1}^M [ \tilde{P}_j^{-1}(k+1|k+1) \tilde{\mathbf{x}}_j(k+1|k+1) - P_j^{-1}(k+1|k) \hat{\mathbf{x}}_j(k+1|k) ] \} \quad (3)$$

$$P_i^{-1}(k+1|k+1) = P_i^{-1}(k+1|k) + \sum_{j=1}^M [ \tilde{P}_j^{-1}(k+1|k+1) - P_j^{-1}(k+1|k) ] \quad (4)$$

融合中心综合利用了所有传感器从目标获得的信息,从而克服了单个传感器只能从目标获得有限信息的缺点,提高了对目标的跟踪能力。

#### 3.2 相对熵原理

若随机变量  $x$  在假设  $H_1$  和  $H_2$  下的概率分别为  $p_1(x)$  和  $p_2(x)$ , 则  $p_2(x)$  对  $p_1(x)$  的相对熵为<sup>[9-10]</sup>

$$I(p_2, p_1) = \int p_2(x) \log \frac{p_2(x)}{p_1(x)} dx \quad (5)$$

式(1)表明了观察者对随机变量  $x$  的了解由分布  $p_1(x) \rightarrow p_2(x)$  时所获得的信息量,此时  $p_1(x)$  相当于先验概率分布,  $p_2(x)$  则是观察后所得到的后验概率分布。如果观察者通过实验所能获得的最大相对熵为  $I(p_m, p_1)$ , 则:

$$U(p) = I(p_m, p_1) - I(p_2, p_1) \quad (6)$$

表示尚未获得的信息,这个信息就是  $x$  的概率分布  $P(x)$  中所蕴含的不确定性。若  $x$  为  $N$  维的高斯分布, 则有:

$$\begin{aligned} U(p) &= I(p_m, p_1) - I(p_2, p_1) = \\ &= \int p_m(x) \log \frac{p_m(x)}{p_1(x)} dx - \int p_2(x) \log \frac{p_2(x)}{p_1(x)} dx = \\ &= 1 - \frac{1}{2} \text{tr} \{ P_1^{-1} [ P_2 - P_M + (X_2 - X_1)(X_2 - X_1)' - (X_M - X_1)(X_M - X_1)' ] \} + \\ &= \frac{N}{2} \log(2\pi e) + \frac{1}{2} \log(|P_2|) \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $P_1$ 、 $P_2$ 和  $P_M$  分别为  $p_1(x)$ 、 $p_2(x)$  和  $p_M(x)$  的方差;  $X_1$ 、 $X_2$ 和  $X_M$ , 分别为  $p_1(x)$ 、 $p_2(x)$  和  $p_M(x)$  的平均值。

在目标跟踪中,目标的不确定性  $U(P)$  越大,意味着已获得的关于该目标的信息越少,越需要对它进行更多的观察。因此可将  $U(P)$  作为代价函数,实现多传感器对多目标的自动分配。

### 3.3 传感器对目标的最优分配

在一个多传感器跟踪系统中,假设有  $s$  个传感器和  $t$  个跟踪目标。对跟踪目标分配传感器的原则是保证整个跟踪系统所能得到的跟踪目标的不确定性最大,即所获得的信息最大。设基本传感器的编号从  $1-s$ , 记第  $i$  个传感器对第  $j$  个目标的基于相对熵对随机变量不确定性的度量  $U_{ij}(p)$  作为  $G_{ij}$ , 由最优线性分配思想有

$$\max C = \sum_{i=1}^{2^s-1} \sum_{j=1}^t G_{ij} x_{ij} \quad (8)$$

约束条件为

$$\sum_{i=1}^{2^s-1} x_{ij} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, t \quad (9)$$

$$\sum_{i \in J(k)} \sum_{j=1}^t x_{ij} \leq \tau_k \quad k = 1, 2, \dots, s \quad (10)$$

$$x_{ij} \geq 0, \text{对所有的 } i, j \text{ 均成立。} \quad (11)$$

这里的  $\tau_k$  表示第  $k$  个传感器所能跟踪目标的最大个数。 $J(k)$  为包含传感器  $k$  的所有传感器组合编号构成的整数集合,每个整数集合  $J(k)$  中含有  $2^{j-1}$  个整数。在线性优化中,每个  $x_{ij}$  要么为 1, 要么为 0。当  $x_{ij} = 1$  时,表示第  $i$  个传感器被分配给第  $j$  个跟踪目标。

## 4 算例仿真

在多部相控阵雷达组网中,将相控阵雷达 1 和相控阵雷达 2 看作传感器 1 和传感器 2,实现对 5 个目标的跟踪。则有:  $s=2, 2^s-1=3$ , 传感器 1 可同时跟踪 2 个目标,传感器 2 可同时跟踪 3 个目标。用  $S_1$  和  $S_2$  表示两个基本传感器,  $S_3 = \{S_1, S_2\}$  表示虚拟传感器组。 $J(1) = \{1, 3\}, J(2) = \{2, 3\}$ 。采用 CA 模型跟踪 5 个目标,采样周期  $T=1$  s,跟踪 100 s。目标状态模型的矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} 0.5T & 0 \\ T & 0 \\ 0 & 0.5T \\ 0 & T \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

被跟踪目标 1, 2, 4, 5 作匀速直线运动,模型噪声分别为

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 1.4^2 & 0 \\ 0 & 1.4^2 \end{bmatrix} \quad Q_2 = \begin{bmatrix} 1.4^2 & 0 \\ 0 & 1.4^2 \end{bmatrix} \\ Q_4 = \begin{bmatrix} 1.3^2 & 0 \\ 0 & 1.3^2 \end{bmatrix} \quad Q_5 = \begin{bmatrix} 1.5^2 & 0 \\ 0 & 1.5^2 \end{bmatrix}$$

目标 3 在前 10 s 作匀速直线运动,而后以  $\omega = 0.03$  rad/s 作匀速圆周运动,噪声模型为

$$Q_3 = \begin{bmatrix} 1.6^2 & 0 \\ 0 & 1.6^2 \end{bmatrix}$$

5 个跟踪目标的模型如图 1 所示。2 个传感器的测量噪声分别为

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1.2^2 & 0 \\ 0 & 1.2^2 \end{bmatrix} \quad R_2 = \begin{bmatrix} 1.4^2 & 0 \\ 0 & 1.4^2 \end{bmatrix}$$

与顺序搜索方法相比,传感器 1 搜索跟踪目标的顺序为 (1, 4), (2, 5), (3, 6); 而传感器 2 搜索顺序为 (2, 5), (3, 6), (4, 7), 以此类推。图 2 - 图 6 给出了目标 1 - 5 的跟踪效果,其中长虚线为相对熵跟踪,实线为顺序搜索跟踪。

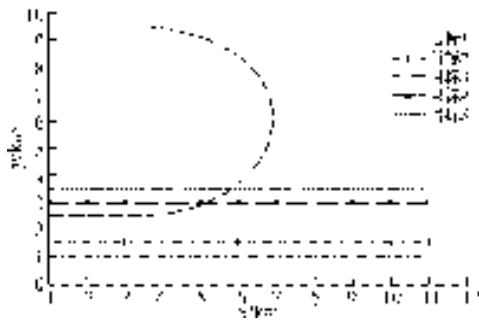


图1 目标运动模型  
Fig.1 Target model

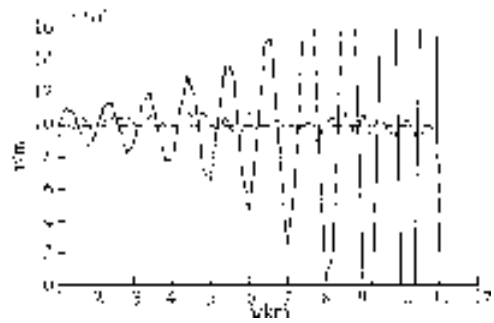


图2 目标1的位置跟踪图  
Fig.2 Position tracking of target 1

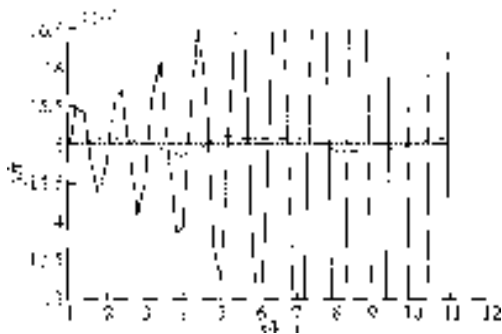


图3 目标2的位置跟踪图  
Fig.3 Position tracking of target 2

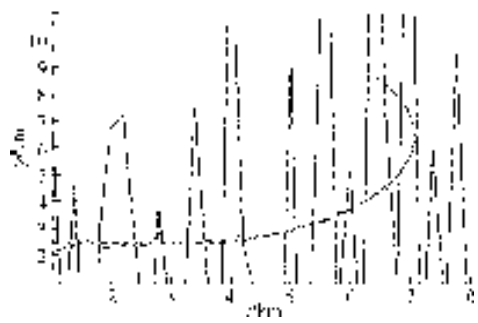


图4 目标3的位置跟踪图  
Fig.4 Position tracking of target 3

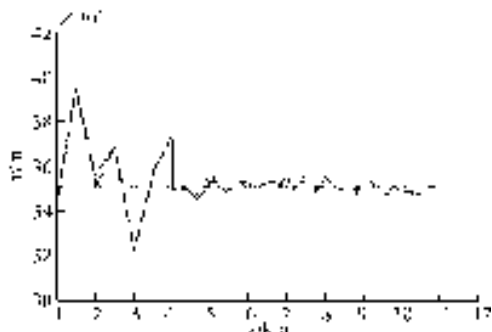


图5 目标4的位置跟踪图  
Fig.5 Position tracking of target 4

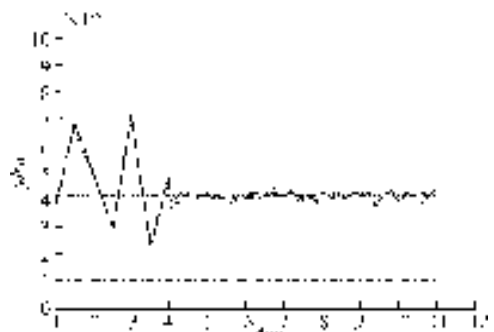


图6 目标5的位置跟踪图  
Fig.6 Position tracking of target 5

从仿真结果可以看出,对于目标3,由于从匀速直线运动转变为匀速圆周运动,其相对熵不确定性较大,因此用本文方法可以及时对其进行传感器的分配,跟踪效果优于顺序搜索方法。仿真结果还表明,用本方法对5个跟踪目标可以进行实时的传感器分配,使跟踪效果得到明显改善。

### 5 结束语

文中主要分析了防空作战相控阵雷达的特性,阐述了相控阵雷达网中的资源管理,提出了基于相对熵的多传感器管理算法,最后结合仿真算例证明了算法的有效性。在实际应用中,不仅需要性能好的传感器管理算法,而且需要更加灵活的传感器管理结构,以提高系统的自适应性和鲁棒性。

### 参考文献:

[1] 张博,陆阿坤.基于NFI直推式学习算法的故障诊断方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2007,8(2):18-21.  
ZHANG Bo, LU Akun. Fault Detection Based on Transductive Reasoning Method of Neural-fuzzy Inference[J]. Journal of Air

- Force Engineering University; Natural Science Edition, 2007, 8(2): 18 - 21. (in Chinese)
- [2] Hernandez M L, Kirubarajan T, Bar Shalom Y. Multisensor Resource Deployment Using Posterior Cramer - rao Bounds [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(2): 399 - 416.
- [3] Ng G W, Ng K H. Sensor Management - what, Why and How [J]. Information Fusion, 2000, 7(1): 67 - 75.
- [4] McIntyre Gregory A, Hintz Kenneth J. Sensor Measurement Scheduling an Enhanced Dynamic, Preemptive Algorithm [J]. Optical Engineering, 1998, 7(23): 517 - 523.
- [5] Leen Kiat Soh, Costas Tsatsoulis. Adaptive Resource Management Algorithms for Periodic Tasks in Dynamic Real - Time Distributed Systems [EB/OL]. [2002 - 4 - 9]. <http://www.go.com>.
- [6] Liu Xianxing, Pan Quan, Zhang Hongcai. Study on Algorithm of Sensor Management Based on Functions of Efficiency and Waste [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2000, 13(1): 39 - 44.
- [7] Xiong N, Svensson P. Multi - sensor Management for Information Fusion: Issues and Approaches [J]. Information Fusion, 2002, 9(3): 163 - 186.
- [8] Wang Guohong, He You, Yang Zhi. Adaptive Sensor Management in Multisensor Data Fusion System [J]. Chinese Journal of Electronics, 1999, 2(8): 136 - 139.
- [9] Leen Kiat Soh. A Negotiation - based Coalition Formation Model for Agents with Incomplete Information and Time Constraints [EB/OL]. [2004 - 6 - 1]. <http://www.go.com>.
- [10] XiaoQin Zhang, Victor Lesser, Rodion Podorozhny. New Result on Cooperative, MultiStep Negotiation over A Multi - dimensional Utility Function [EB/OL]. [2003 - 5 - 23]. <http://www.go.com>.

(编辑:田新华)

## An Algorithm Based on Phased - array Radar Network of Multi - sensors Management

BAI Jian - lin<sup>1</sup>, HUO Liang<sup>1</sup>, LIU Peng<sup>2</sup>, ZHANG Ping - ding<sup>1</sup>

(1. Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China; 2. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** In the air defense warfare under information - based condition, establishing detect & surveillance network is the technical guarantee of capturing informational preponderance. Meanwhile, realizing scientific and reasonable allocation of sensors resource is the important method of promoting the efficiency in gaining the air defense detect & surveillance network information. In order to make full use of the function and the performance of air defense detect & surveillance network, we have to allocate the limited sensors resource scientifically and reasonably in the phased - array radar network so as to improve the whole effectiveness of detect & surveillance network and furthermore to improve air defense warfare effectiveness. In view of the phased - array radar network multi - sensors resource management optimization problem, the phased - array radar characteristic and the network significance are introduced, and a relative entropy multi - sensors management algorithm based on phased - array radar network is proposed. By using this algorithm, each sensor to each goal greatest information content is obtained by calculating the sensor - to - goal indetermination of relative entropy, then taking this as the price function, the multi - sensors to the multi - goals optimized assignment is performed, and the simulation result indicates that this algorithm is valid and effective.

**Key words:** air defense warfare; multi - sensors management; phased - array radar; network; relative entropy