

## “爱国者”导弹雷达网检测仿真模型研究\*

肖顺平 王国玉 马剑武

(国防科技大学电子工程学院 长沙 410073)

**摘要** 本文研究了“爱国者”导弹雷达在布网方式下对目标的检测特性,首先讨论了“爱国者”导弹雷达网的检测原理和均衡布站及加权布站的方式,然后给出了“爱国者”导弹雷达网分布式目标检测的仿真模型及仿真结论。

**关键词** “爱国者”导弹, 雷达网, 目标检测, 仿真模型

**分类号** TN 959-1, TP 391. 9

## Simulation Model for Radar Net of Patriot Missile

Xiao Shunping Wang Guoyu Ma Jianwu

(Department of Electronic Technology, NUDT, Changsha 410073)

**Abstract** This paper studies the detection characteristics of radar net in “Patriot” missile system. After discussing the detection principle of the radar net and its stationing mode (balanced and weighed), the authors propose the distributed target detection model of radar net in “Patriot” missile system.

**Key words** “Patriot” missile, radar net, target detection, simulation model

在现代电子战条件下,电磁威胁环境日益复杂,相应的雷达系统工作体制亦日益复杂,这使得雷达攻防仿真研究愈来愈复杂和昂贵。为了提高工作的有效性和经济性,人们很早就利用数字计算机来仿真雷达系统、目标和环境的攻防对抗,导致近 20 年来雷达仿真技术的飞速发展和广泛应用。

为了对阻塞式噪声干扰环境中“爱国者”雷达网对弱目标的探测性能有一个基本的定量评估,需要建立仿真计算数学模型并编制相应的仿真计算机软件。这是取得进一步的仿真分析研究结果或参数指标的最经济有效的方法。这些定量结果将对战术弹道导弹攻防对抗仿真系统的建立以及战术弹道导弹选择何种突防措施有重要参考价值。仿真的基本思路是:运用雷达方程、干扰方程及相控阵天线、电子对抗、信号检测理论,对“爱国者”雷达网、干扰系统和目标环境各部分功能模块建立相应的数学模型,再利用数字计算机和软件系统动态地复现出它们发生作用的机理、过程和效果。

## 1 “爱国者”导弹雷达组网布站方式

当应用两部或两部以上且空间位置互相分离而覆盖范围互相重叠的雷达对目标实施探测与跟踪时,便构成了雷达网系统。“爱国者”雷达网的作战单元为导弹营,导弹营下辖 6 个火力单元(导弹连),每个火力单元的制导雷达可以独立探测目标,也可将其观测数据传送到营指挥中心进行综合处理。“爱国者”雷达在防空系统中通过单站雷达分布式组网和合理的布站结构,从多视角探测目标,不仅扩大了雷达的覆盖范围,而且增强了对弱目标的探测能力,提高了系统可靠性和生存能力,同时对抗有源干扰和抗反辐射导弹有着特殊效能。

图 1 是“爱国者”雷达网检测原理示意图。目标经各个雷达探测后分别得到判决结果信号  $d_1, d_2, \dots, d_N$  ( $N = 6$ ), 这里

$$d_i = \begin{cases} 1 & \text{判定存在目标} \\ 0 & \text{判定无目标} \end{cases}$$

\* 重大试研技术验证项目资助

1998 年 10 月 5 日收稿

第一作者: 肖顺平, 1965 年生副教授

把  $d_i(i= 1, 2, \dots, N)$  传输至分布式检测中心, 由检测中心最终确认目标是否存在, 最终检测结果是  $d_0$ ,  $d_0$  亦为布尔变量, 即

$$d_0 = \begin{cases} 1 & \text{判定存在目标} \\ 0 & \text{判定无目标} \end{cases}$$

“爱国者”雷达网通常采用两种布站方式<sup>[1]</sup>: 均衡布站和加权布站 (如图 2所示) 均衡布站的特点是网内各雷达均匀分布, 以面防御为主, 无重点防御方向; 加权布站的特点是以点防御为主, 网内各雷达沿某一方向层次分布, 重点防御该方向。实战中, 具体采用何种布站

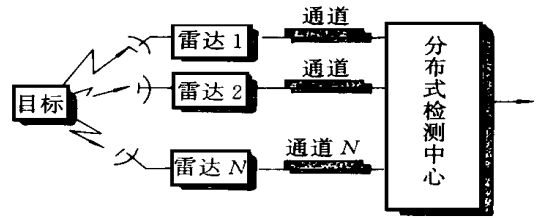


图 1 “爱国者”雷达网检测原理示意图  
Fig. 1 A Diagrammatic Illustration of “PATRIOT” Radar Net Detection Principle

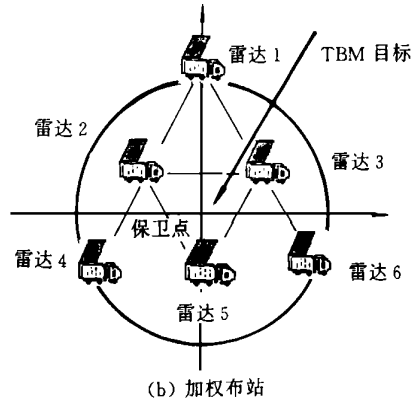
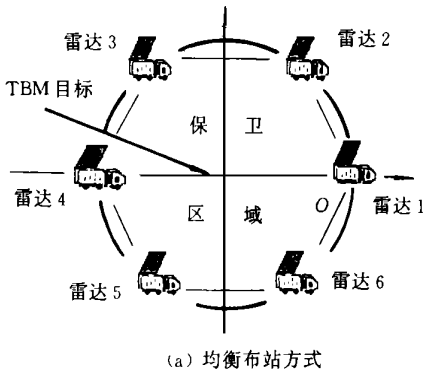


图 2 “爱国者”雷达网布站方式和目标进攻方位图

Fig. 2 The Stationing Mode for “PATRIOT” Radar Net and Target Attack Direction Diagram

方式取决于火力分配, 保卫区域类型, 防空目的, 对象和所处的外部自然环境等诸因素

## 2 雷达网分布式检测数学模型<sup>[1, 2, 3]</sup>

在本文中把“爱国者”雷达网作为一种同类型非相干网络来处理, 即认为雷达网中各单站雷达性能完全相同, 各自独立工作, 把测得的目标信息送至分布式检测中心进行处理, 来提高目标检测概率和测量精度。本文在检测中心采纳 Neyman-Pearson 准则进行数据综合处理, 这是一种概率融合模型<sup>[2]</sup>。

考虑二元假设检验问题:

$$\begin{cases} H_0 & \text{目标不存在} \\ H_1 & \text{目标存在} \end{cases} \quad \begin{cases} d_i = 1 & \text{判定“目标存在”} \\ d_i = 0 & \text{判定“目标不存在”} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N$$

其中  $N$  为检测器的个数。设检测中心的输入向量为  $D = (d_1, d_2, \dots, d_N)$ , 它可以有  $n = 2^N$  种可能的实现, 记为  $D_i, i = 1, 2, \dots, n$ , 则  $H_0$  对  $H_1$  的  $N-P$  最佳随机判决定义如下:

$$W(D) = \begin{cases} 1 & \text{若 } T(D) > t \\ V & \text{若 } T(D) = t \\ 0 & \text{若 } T(D) < t \end{cases}$$

这里  $W(D)$  是条件概率, 如给出检测中心的观测值为  $D$ , 就以此概率接受  $H_1$ ;  $T(D)$  表示似然比:

$$T(D) = \frac{P(D|H_1)}{P(D|H_0)} = \frac{\prod_{k \in S_1} P d_k \prod_{k \in S_0} (1 - P d_k)}{\prod_{k \in S_1} P f_k \prod_{k \in S_0} (1 - P f_k)}$$

这里  $S_1$  是判定目标存在的检测器组,  $S_0$  是判定目标不存在的检测器组。由于输入空间是离散的, 随机化是必需的。随机化常数  $V$  的门限  $t$  必须适当选择, 以使检测概率

$$P_d = P(T(D) > t|H_1) + \overline{V}P(T(D) = t|H_1)$$

和虚警概率

$$P_f = P(T(D) > t|H_0) + \overline{V}P(T(D) = t|H_0)$$

满足 NP 准则:

$$P_f \leq \Gamma \quad \text{和} \quad P_d = \max P_d(\overline{W})$$

这里  $\Gamma$  是预先指定的系统虚警概率上限。不失一般性, 列出所有可能的  $D$  的实现  $D_i, 1 \leq i \leq n = 2^N$ , 使得

$$T(D_1) \leq T(D_2) \leq \dots \leq T(D_n)$$

因此下式成立

$$P(T(D) > t|H_0) = \begin{cases} 1 & \text{若 } t < T(D_1) \\ \lambda_i & \text{若 } T(D_i) \leq t \leq T(D_{i+1}), i = 1, 2, \dots, n-1 \\ 0 & \text{若 } t \geq T(D_n) \end{cases}$$

$$\lambda_i = \begin{cases} 1 - \sum_{j=1}^i P(D_j|H_0) & \text{若 } 1 \leq i \leq n \\ 1 & \text{若 } i = 0 \end{cases}$$

$$t = \begin{cases} T(D_i) & \text{若 } \lambda_i \leq t \leq \lambda_{i-1}, i = 1, \dots, n \\ 0 & \text{若 } t = 1 \end{cases}$$

容易证明:

由上两式可得到

$$V = \frac{\Gamma - P(T(D) > t|H_0)}{P(T(D) = t|H_0)}; \quad V = \begin{cases} \frac{(\Gamma - \lambda_i)}{\sum_{\{D_j: T(D_j) \leq t\}} P(D_j|H_0)} & \text{若 } \lambda_i \leq t \leq \lambda_{i-1}, i = 1, \dots, n \\ \text{任意} & \text{若 } t = 1 \end{cases}$$

最后, 具有门限  $t$  和随机性常数  $V$  的检测概率如下:

$$P_d = h + (\Gamma - \lambda_i) \frac{\sum_{\{D_j: T(D_j) \leq t\}} P(D_j|H_1)}{\sum_{\{D_j: T(D_j) \leq t\}} P(D_j|H_0)} \dots \quad \text{若 } \lambda_i \leq t \leq \lambda_{i-1}$$

这里  $\lambda_i$  在上面定义, 且

$$h = \begin{cases} 1 - \sum_{j=1}^i P(D_j|H_1) & \text{若 } 1 \leq i \leq n \\ 1 & \text{若 } i = 0 \end{cases}$$

通常, 在输入量等于门限时, 随机化常量  $V \geq 0.5$  判决  $H_1$  为真;  $V < 0.5$  时, 判决  $H_0$  为真。

### 3 雷达网目标检测和确认仿真模型

随着时间的推进, 计算出雷达网检测概率  $P_d$  后, 随机产生一服从  $[0, 1]$  均匀分布的随机数  $P_0$ 。若  $P_0 \leq P_d$ , 则表示发现目标; 反之, 没发现目标, 时间继续推进。目标确认方式为: 当检测发现目标时, 连续检测  $m$  次; 当有  $k$  次发现目标时 ( $m \geq k$ ), 确认发现目标。  $m$  与  $k$  之间的选择关系为:  $k_{\text{opt}} = 1.5 \sqrt{m}$ , 仿真中, 取  $m = 4, k = 3$ 。

### 4 结束语

通过对“爱国者”导弹雷达网检测系统的分析综合和仿真计算, 我们得到了如下一些基本结论: ① 雷达组网分布式检测特性主要取决于各雷达的检测性能和检测融合中心的工作模式, 即其判决准则; ② 对各工作模式, 网内各雷达的检测概率差别越小, 融合后系统检测性能的改善就越好。从这个意义上讲, 雷达网的布局方式具有相当重要的意义。③ 在雷达网内, 雷达数目的增加可以提高整体检测性能,

但并非越多越好, 必须在性能与成本之间选择一个折衷方案, 通过仿真发现, 当  $N > 6$  时, “爱国者” 雷达网检测性能的改善并不显著: ④ 另外, 使用  $N-P$  判决准则时通过增加组网雷达部数, 可以做到既改善系统虚警概率, 又提高系统检测性能

## 参考文献

- 1 E Conte, E D'Adda, A Farina and M Longo. Multistatic radar detection: Synthesis and comparison of optimum and sub-optimum receiver. *IEE Proc Pt F*, 1983, 130 (6): 484-494
- 2 M Barkat and P K Varshney. Decentralized CFAR Signal Detection. *IEEE Trans*, 1989, AES-25 (2): 141-149
- 3 胡卫东. 多传感器数据融和的理论与方法研究 [博士学位论文]. 国防科技大学, 1997
- (上接第 40 页)
- 14 L F Polkaci and L M L Delcambre. The object flow for discrete event simulation. *Intl Journal of Computer Simulation (Special Issue on Object-Oriented Simulation)*, G. W. Zobrist, ed., Norwood, NJ: Ablex Publ. Comp., 1995
- 15 J Rumbaugh et al. *Object-Oriented Modeling and Design*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991
- 16 S Shacter and S Mellor. *Object LifeCycles: Modeling the World in States*. NJ: Yourdon Press, 1992
- 17 A A Tron. Simulation nets: A simulation modeling and validation tool. *Simulation*, Aug. 1985, 45: 71-75
- 18 D K Bak. Performance evaluation and optimal decomposition of hierarchical distributed simulation. Ph. D. dissertation, Dep. Comput. Sci., Wayne State Univ., Detroit, MI, 1985
- 19 A I Conception and B P Zeigler. DEV S formalism: A framework for hierarchical model development. *IEEE Trans. Software Eng.*, vol. 14, Feb. 1988, 228-241
- 20 T G Kin and S B Park. The DEV S formalism: Hierarchical modular systems specification in C++ . in proc. 1992 European Simulation Multiconf., York, England, 1992, 152-156
- 21 K E Gorlen, S M Orlow, and P S Plexich. Data Abstraction and Object-Oriented Programming in C++ . Reading, MA: Addison-Wesley, 1990
- 22 Y Wang. Discrete-event simulation in a massively parallel computer. Ph. D. dissertation, Dep. Elec. Eng., Univ. Arizona, Tucson, 1992
- 23 J R Nichol, C T Wilkes, and F A Manok. Object Orientation in heterogeneous distributed computing systems. *IEEE Computer*, June 1993, 57-67
- 24 C J Coomber and R E Childs. A graphical tool for the prototyping of real-time systems. *ACM Software Eng. Notes*, Apr. 1990, 15: 70-82
- 25 G Agha. *Actors: A Model of Concurrent Computation in Distributed Systems*. Cambridge, MA: M. I. T. Press, 1986
- 26 D Jefferson. Virtual time. *ACM Trans. Programming Style and Languages and Syst.* 7: 404-425, 1985
- 27 A Sentenij, P Salle, and G Lampah. Simulation with actors using time-referenced message-passing. in Proc. SCS European Simulation Multiconf., 1989, 109-114