

海上雷达网探测威力范围仿真分析

卞泓斐¹, 杨根源²

(1. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001; 2. 海军信息化专家委员会, 北京 100073)

摘要: 威力范围是衡量雷达性能和优化雷达网布站的重要指标之一。从雷达基本方程出发, 推导出不同组网形式和数据融合方式下的雷达网探测威力模型, 然后运用 Matlab 语言对该模型进行了可视化仿真分析。仿真结果表明了建立的模型以及可视化方法的可用性, 对于雷达网作战能力分析和布站优化均有着重要的理论意义和应用价值。

关键词: 雷达网; 探测威力; 仿真; 布站优化

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)11-0076-05

Simulation Analysis on Detection Coverage of Marine Radar Network

BIAN Hong-fei¹, YANG Gen-yuan²

(1. Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China;
2. Naval Information Expert Committee, Beijing 100073, China)

Abstract: The detecting coverage is one of the important indexes of radar's performance and of layout optimization of radar stations. Based on the basic equation of radar, the detecting coverage model of radar network applying different network forms and data fusion methods is derived. Then, visualization simulation analysis is carried out with Matlab. The simulation results show the usability of the model as well as the visualization method. The study has important theoretical significance and application value for the combat ability analysis of radar network and station layout optimization.

Key words: radar network; detection coverage; simulation; layout optimization of radar stations

0 引言

所谓海上雷达组网是指将多部舰载雷达或者无源侦察装备适当布站, 各部雷达将探测到的目标信息(包括原始信息以及处理后的点迹、航迹等信息)经信息网络实时汇总并进行信息融合处理, 从而使每部舰艇都能得到整个区域统一的防空态势图^[1]。雷达组网后可以扩大时间、空间、频率的覆盖能力, 然而如何准确评估不同组网方式下雷达的探测威力范围, 从而为海上雷达优化组网提供依据显得尤为重要。本文从雷达方程的基本公式出发, 分析了雷达组网的形式与数据融合的方式, 结合组网形式、数据融合方式建立了不同组网情况下的雷达网威力范围模型, 并通过 Matlab 语言仿真对雷达网的威力范围进行可视化分析及精确计算。

1 海上雷达组网形式

按照发射站与接收站是否分离配置, 雷达组网可分为单基地雷达组网、双/多基地雷达组网和单基地与双/多基地雷达混合组网^[1]。

单基地雷达组网(见图1), 即收发天线共用, 发射机与接收机处于同一地点, 这种方式组网简单并且数据处理相对容易。由于组网后多部雷达共同探测, 因而探测范围会更大, 并且重合探测区内的探测精度也会有所提升。但是单基地雷达组网方式由于每部雷达接收机只能接收本雷达发射机所发射的信号回波, 因而每部雷达都有电磁辐射, 对于雷达网的隐蔽性及抗反辐射导弹和抗干扰能力的改善是有限的。

双/多基地雷达组网(见图2), 即发射机与接收机位置分离, 并且达到时间、空间、相位的同步。这种组网方式具有更高的探测精度及更广的探测范围, 同时由于其发射站与接收站可分离, 只有发射站辐射电磁波, 可以将发射站置于较隐蔽或被保护的位置, 因而雷达网的

隐蔽性、抗反辐射导弹能力及抗干扰能力都有了显著的提升。

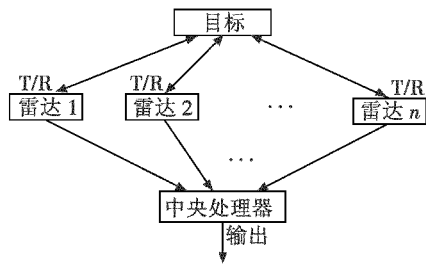


图 1 单基地雷达组网

Fig. 1 Monostatic radar network

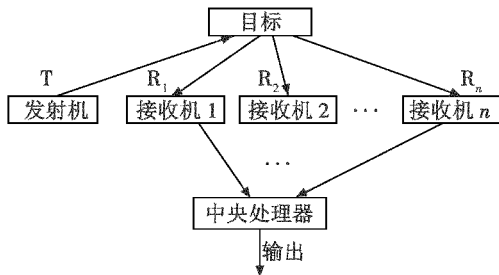


图 2 双/多基地雷达组网

Fig. 2 Bistatic/multistatic radar network

单基地与双/多基地雷达混合组网(见图 3),即不同位置的接收机同时接收单基地雷达发射的回波信号。这种组网方式需要处于异地的接收机与发射机达到时间、空间、相位的同步,因而组网复杂度及雷达网整体性能介于单基地组网雷达与双/多基地组网雷达之间,其工作方式更为灵活,可以根据战场实际情况随时切换组网方式^[1-3]。

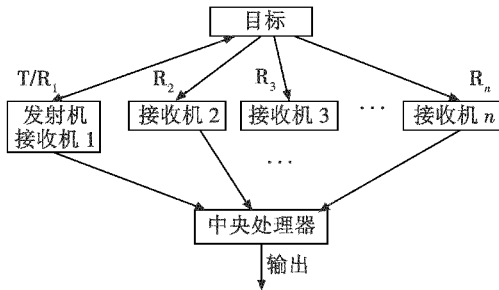


图 3 单(双/多)基地雷达混合组网

Fig. 3 Monostatic (bistatic/multistatic) hybrid radar network

2 海上雷达组网的数据融合方式

海上组网雷达的数据融合,就是利用计算机技术将网内各传感器所获得的信息资源进行检测、互联、校准、相关、估值以及数据联合的多层次信息处理过程。将网内所有雷达探测的数据进行融合处理能够获得比任何一部单一雷达更高的探测精度、更广的探测范围,从而更准确地对目标进行定位、跟踪以及更早地获得威胁和态势评估信息。根据对各雷达测量数据使用情

况的不同,可将数据融合分为集中式和分布式两类^[4]。

图 4 所示的集中式数据融合方式只在雷达网内的中心站设置数据处理器,各雷达将探测到的目标原始信息传送到数据处理中心进行集中处理,形成目标航迹并输出给指挥所。集中式数据融合方式数据容量大,对融合处理中心的数据容量及运算速度都有较高的要求。

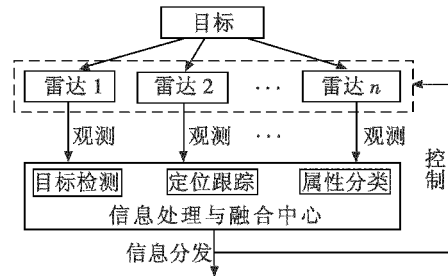


图 4 集中式融合结构

Fig. 4 Centralized fusion structure

图 5 所示的分布式数据融合方式在各雷达内均设有数据处理器,对本雷达的测量数据进行处理后得到各个目标的点迹、航迹,然后将这些航迹传输到雷达网的数据处理中心进行融合处理,最后得到目标融合后的航迹并输出给指挥所。分布式数据融合方式可以降低对通信带宽及数据融合中心的要求。

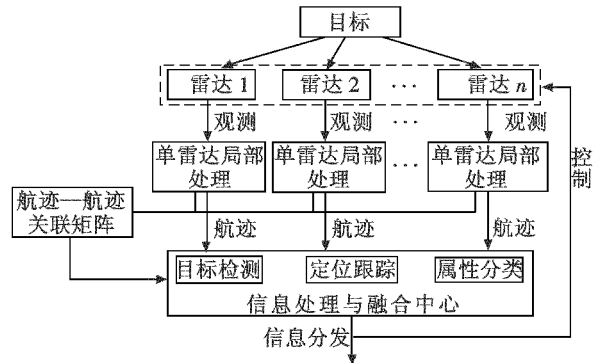


图 5 分布式融合结构

Fig. 5 Distributed fusion structure

对于采用分布式融合的组网雷达系统,其融合中心一般采用秩 K 融合规则。设 $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)$ 是数据融合中心检测某目标时的判别向量(当雷达 i 判定“目标存在时”, $d_i = 1$,反之, $d_i = 0$),则基于秩 K 融合规则的数据融合结果 $R(D)$ 可以表示为

$$R(D) = \begin{cases} 1, & \text{目标存在} & \sum_{i=1}^n d_i \geq K \\ 0, & \text{目标不存在} & \sum_{i=1}^n d_i < K \end{cases}$$

一般情况下,为了提高雷达网的探测范围,使用 $K=1$ 即“OR”规则的数据融合方式,即只要网内一部雷达探测到目标,则组网雷达系统认为探测到目标。

3 组网雷达探测能力分析

3.1 雷达基本方程^[5]

雷达基本方程将雷达作用距离与发射机、接收机、天线和目标的特性及环境关联起来,可以用于确定特定雷达能够探测到的目标的最大作用距离。如果发射机功率 P_t 由各向同性天线辐射,则距雷达发射机 R_t 处的功率密度等于辐射功率除以半径为 R_t 的假想球的表面积 $4\pi R_t^2$,即

$$\text{距各向同性天线 } R_t \text{ 处的功率密度} = P_t / (4\pi R_t^2) \quad (1)$$

不过,雷达一般都采用定向天线将辐射功率 P_t 集中在某个特定的方向上。定向天线的最大增益 G 可定义为

$$G = \frac{\text{定向天线所辐射的最大功率密度}}{\text{具有相同输入功率的各向同性天线所辐射的功率密度}} \quad (2)$$

于是,发射增益为 G_t 的定向天线在距雷达发射机 R_t 处的功率密度为

$$\text{距定向天线 } R_t \text{ 处的功率密度} = \frac{P_t G_t}{4\pi R_t^2} \quad (3)$$

目标拦截一部分入射能量,再将它向各方向辐射。雷达接收机在距离目标为 R_r 处的辐射功率密度为

$$\text{回到雷达接收机的再辐射功率密度} = \frac{P_t G_t}{4\pi R_t^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R_r^2} \quad (4)$$

式中: σ 为目标的雷达横截面积; R_r 为目标到雷达接收机的距离。

雷达接收机的天线俘获一部分入射到它的回波能量。雷达接收到的功率为入射功率密度与接收天线的有效孔径面积 A_e 的乘积。接收到的信号功率 P_r 为

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R_t^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R_r^2} \cdot A_e \cdot \frac{1}{L} = \frac{P_t G_t A_e \sigma}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2 L} \quad (5)$$

式中, L 为雷达各部分损耗引入的损失系数。

对于接收机的天线,天线增益 G_r 和接收有效面积 A_e 的关系式为

$$G_r = (4\pi A_e) / \lambda^2 \quad (6)$$

式中, λ 为信号波长。

将式(6)代入式(5)得

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2 L} \quad (7)$$

雷达接收到的功率 P_r 必须超过最小可检测信号功率 S_{\min} , 雷达才能可靠地发现目标,当 P_r 正好等于 S_{\min} 时,就可得到雷达发射机、接收机与目标的最大作用距离 $(R_t, R_r)_{\max}$ 。因为超过这个距离,雷达接收的功率 P_r 会进一步减小,就不能可靠地检测到目标。雷达发射机、接收机与目标的最大作用距离为

$$(R_t^2 R_r^2)_{\max} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\min} L} \quad (8)$$

在噪声背景下检测目标,接收机输出端不仅要使信号放大到足够的数值,更重要的是使其输出信号噪声(信噪)比 S_0/N_0 达到所需的数值。通常雷达终端检测信号的质量取决于信噪比。最小可检测信号功率为

$$S_{\min} = k T_0 B_n F_n (S_0/N_0)_{\min} \quad (9)$$

式中: k 为玻耳兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K; T_0 为标准室温,一般取 290 K; B_n 为接收机的噪声带宽; F_n 为接收机的噪声系数。将式(9)代入式(8)得

$$\left(\frac{S_0}{N_0}\right)_{\min} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_0 B_n F_n (R_t^2 R_r^2)_{\max} L} \quad (10)$$

根据式(10),当给定一个最小可检测的输出信噪比 $(S_0/N_0)_{\min}$, 就可以得到雷达发射机、接收机对于目标的最大可探测距离,进而得到雷达的威力范围。

3.2 组网雷达的探测威力计算

3.2.1 分布式单基地雷达组网探测威力

式(10)中,当 $R_t = R_r = R$, $G_t = G_r = G$, 即收发一体的情况,式(10)可变为

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_0 B_n F_n (S_0/N_0)_{\min} L} \right]^{1/4} \quad (11)$$

式(11)表示单基地雷达的基本方程,根据式(11)可得到单基地雷达的威力范围。“OR”规则的分布式组网雷达系统中,组网雷达的威力范围等于网中所有单基地雷达威力范围的叠加^[6], 设第 j 部雷达的威力范围为 V_j , 则组网雷达的威力范围为 $V_{\text{netted}} = \bigcup_{j=1}^N V_j$ 。

3.2.2 分布式多基地雷达组网探测威力

如果雷达系统是双基地或多基地雷达,并且每个接收站可以接收系统中所有发射站发射信号的回波,则每个雷达接收机的侦察探测范围方程为

$$\left(\frac{S_0}{N_0}\right)_{\min} = \sum_{i=1}^M \frac{P_{t_i} G_{t_i} G_{r_j} \sigma_{ij} \lambda_i^2}{(4\pi)^3 k T_0 B_{r_j} F_{r_j} (R_{t_i}^2 R_{r_j}^2)_{\max} L_{ij}} \quad (12)$$

式中: $(S_0/N_0)_{\min}$ 为检测目标信号所需的最小输出信噪比; P_{t_i} 为第 i 个发射站的发射功率; G_{t_i} 为第 i 个发射站的天线增益; G_{r_j} 为第 j 个接收站的天线增益; λ_i 为第 i 个发射站发射信号的波长; σ_{ij} 为目标相对于第 i 个发射站和第 j 个接收站的雷达截面积(RCS); k 为玻耳兹曼常数; T_0 为标准室温; B_{r_j} 为噪声带宽; F_{r_j} 为噪声系数; R_{t_i} 为第 i 个发射站和目标之间的距离; R_{r_j} 为第 j 个接收站和目标之间的距离; L_{ij} 为第 i 个发射站和第 j 个接收站之间的系统损耗; M 为发射站的个数。

根据式(12)可得到第 j 个接收站可探测范围的大小。同理,“OR”规则的分布式组网雷达系统中,组网雷达的威力范围等于网中所有单基地雷达威力范围的叠加, 设第 j 部雷达的威力范围为 V_j , 则组网雷达的威力范围为 $V_{\text{netted}} = \bigcup_{j=1}^N V_j$ 。

3.2.3 集中式多基地雷达组网探测威力

集中式多基地雷达组网情况下,每一部雷达接收机可以接收到系统中所有发射机发射信号的回波,并且将探测到的目标信息汇集到数据融合中心进行叠加处理,此时系统可以看成由 $M \times N$ (M 为发射站的个数, N 为接收站的个数) 个收发单元构成,此时的雷达方程为

$$\left(\frac{S_0}{N_0}\right)_{\min} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{P_{t_i} G_{t_i} G_{r_j} \sigma \lambda_i^2}{(4\pi)^3 k T_0 B_{r_j} F_{r_j} (R_{t_i}^2 R_{r_j}^2)_{\max} L_{ij}} \quad (13)$$

式中各符号含义同上。由式(13)便可得到集中式组网雷达的探测威力范围。

由式(11)~式(13)便可得到分布式单基地雷达组网、分布式多基地雷达组网、集中式多基地雷达组网不同情况下的实际探测威力。

4 组网雷达探测威力仿真

现假设组网雷达系统由两个发射站和两个接收站构成,即 $M = N = 2$,并且两个发射站的参数完全相同。具体参数为 $P_t = 20 \text{ kW}$, $G_t = 30 \text{ dB}$,发射信号的波长 $\lambda = 0.9 \text{ m}$;两个接收站的参数也完全相同,具体参数为 $G_r = 30 \text{ dB}$, $F_n = 3 \text{ dB}$, $B_n = 9 \text{ Hz}$;目标的雷达截面积 $\sigma = 10 \text{ m}^2$;系统损耗 $L = 10 \text{ dB}$;系统的最小检测信噪比 $(S_0/N_0)_{\min} = 13 \text{ dB}$ 。下面考虑不同雷达组网系统及不同部署情况下组网雷达的威力范围^[7-9]。

部署 1 考虑将发射站 1 与接收站 1 部署于同一点 $R_1(x_1 = 0, y_1 = 40000, z_1 = 0)$,将发射站 2 与接收站 2 部署于同一点 $R_2(x_2 = 0, y_2 = -40000, z_2 = 0)$,仿真得到不同组网方式下的雷达系统威力如图 6~图 8 所示。图中:“•”为发射站所在位置;“○”为接收站所在位置;“⊙”表示发射站、接收站位于同地。

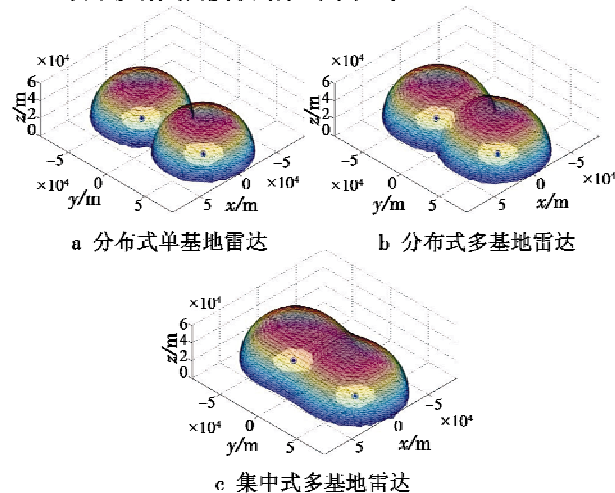


图 6 部署 1 的雷达系统威力图

Fig. 6 Detection coverage of radar network in Deployment 1

通过计算可得分布式单基地雷达组网的威力范围为 $4.387 \times 10^5 \text{ km}^3$,分布式多基地雷达组网的威力范围为 $5.305 \times 10^5 \text{ km}^3$,集中式多基地雷达组网的威力范围为 $5.692 \times 10^5 \text{ km}^3$;分布式单基地雷达组网的最高探测高度为 $4.776 \times 10^4 \text{ m}$,分布式多基地雷达组网的最高探测高度为 $5.092 \times 10^4 \text{ m}$,集中式多基地雷达组网的最高探测高度为 $5.207 \times 10^4 \text{ m}$;取高度 $z = 1000 \text{ m}$ 时分布式单基地雷达组网的平面威力范围为 $1.365 \times 10^6 \text{ km}^2$,分布式多基地雷达组网的平面威力范围为 $1.523 \times 10^6 \text{ km}^2$,集中式多基地雷达组网的平面威力范围为 $1.579 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。

部署 2 考虑一种更为普遍的系统部署方式,即系统的发射站和接收站分散、异地部署,假设各站的坐标为:发射站 1 的 $R_1(x_1 = 40000, y_1 = -40000, z_1 = 0)$,发射站 2 的 $R_2(x_2 = 40000, y_2 = 40000, z_2 = 0)$,接收站 1 的 $R_{r1}(x_{r1} = -40000, y_{r1} = -40000, z_{r1} = 0)$,接收站 2 的 $R_{r2}(x_{r2} = -40000, y_{r2} = 40000, z_{r2} = 0)$,仿真得到不同组网方式下的雷达系统威力如图 7 所示。

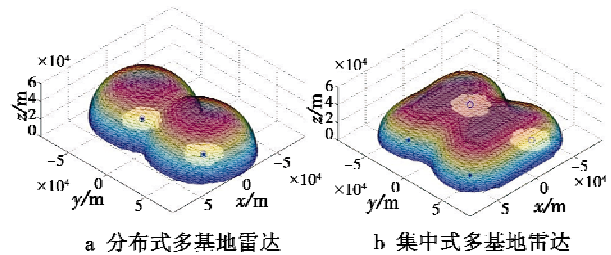


图 7 部署 2 的雷达系统威力图

Fig. 7 Detection coverage of radar network in Deployment 2

通过计算可得分布式多基地雷达组网的威力范围为 $3.677 \times 10^5 \text{ km}^3$,集中式多基地雷达组网的威力范围为 $5.159 \times 10^5 \text{ km}^3$;分布式多基地雷达组网的最高探测高度为 $3.441 \times 10^4 \text{ m}$,集中式多基地雷达组网的最高探测高度为 $3.870 \times 10^4 \text{ m}$;取高度 $z = 1000 \text{ m}$ 时分布式多基地雷达组网的平面威力范围为 $1.571 \times 10^6 \text{ km}^2$,集中式多基地雷达组网的平面威力范围为 $1.808 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。

部署 3 发射站、接收站空间部署同部署 2,考虑不同间距时的雷达网探测威力。假设各站的坐标为:发射站 1 的 $R_1(x_1 = 50000, y_1 = -50000, z_1 = 0)$,发射站 2 的 $R_2(x_2 = 50000, y_2 = 50000, z_2 = 0)$,接收站 1 的 $R_{r1}(x_{r1} = -50000, y_{r1} = -50000, z_{r1} = 0)$,接收站 2 的 $R_{r2}(x_{r2} = -50000, y_{r2} = 50000, z_{r2} = 0)$,仿真得到不同组网方式下的雷达系统威力如图 8 所示。

通过计算可得分布式多基地雷达组网的威力范围为 $2.593 \times 10^5 \text{ km}^3$,集中式多基地雷达的威力范围为 $3.479 \times 10^5 \text{ km}^3$;分布式多基地雷达组网的最高探测高度为 $2.771 \times 10^4 \text{ m}$,集中式多基地雷达组网的最高探测高度为 $2.891 \times 10^4 \text{ m}$;取高度 $z = 1000 \text{ m}$ 时分布式双

基地雷达的平面威力范围为 $1.257 \times 10^6 \text{ km}^2$, 集中式双基地雷达的平面威力范围为 $1.453 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。

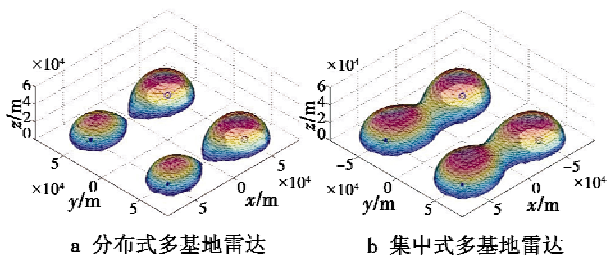


图 8 部署 3 的雷达系统威力图

Fig. 8 Detection coverage of radar network in Deployment 3

从以上仿真图形及结果可以看出, 尽管发射机与接收机的各项参数均相同, 但不同的组网方式及部署方式下雷达网的探测威力是不同的。同一部署方式下集中式多基地雷达组网的探测范围最广, 这是因为这种组网方式下不仅各接收机可以接收所有发射信号的回波, 而且各接收信号统一由数据处理中心叠加处理, 增强了接收端信号的强度。同一组网方式下若采取不同的部署方式则探测威力也会有很大的差别, 如图 6c、图 7b、图 8b 都是两个发射站、两个接收站采取分布式多基地的方式组网, 但其探测威力及最高探测高度却有较大的差别, 因此, 在实际使用中应当根据特定的监视区域来合理设置网络雷达系统的布站。

5 结束语

本文根据雷达方程推导出多基地雷达探测能力的数学模型, 结合不同的雷达组网形式及数据融合方式建立了相应的探测威力模型, 运用 Matlab 语言对模型进行了可视化仿真及量化计算, 得出不同组网方式下的雷达网探测能力三维立体图及探测空间体积、高度和指定高度层探测平面面积的准确数学度量。该模型结构简单、运算速度快, 仿真结果表明该模型能够较为精确地描绘出雷达网的探测威力, 可为雷达布站及防空作战中探测区域的确定提供参考。

参考文献

[1] 朱丽莉, 王朝晖. 制导雷达组网技术研究[J]. 现代雷达, 2003, 25(7): 1-3, 20. (ZHU L L, WANG Z C. Study of the guidance radar netting technology[J]. Modern Ra-

dar, 2003, 25(7): 1-3, 20.)

- [2] 杨涛. 组网雷达系统“四抗”效能评估方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008. (YANG T. Study on evaluation method of “four countering” efficiencies of networked radars[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.)
- [3] 花汉兵. 雷达组网的特点及其关键技术研究[J]. 现代电子技术, 2007, 30(23): 33-35. (HUA H B. Study on characteristics and critical technologies of radar networking[J]. Modern Electronics Technigue, 2007, 30(23): 33-35.)
- [4] 沈晓峰. 网络化雷达的数据融合方法与仿真研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013. (SHEN X F. Research on the data fusion method and simulation based on radar network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.)
- [5] SKOLNIK M I. 雷达系统导论[M]. 3 版. 左群声, 徐国良, 马林, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2010. (SKOLNIK M I. Introduction to radar systems[M]. 3rd ed. Translated by ZUO Q S, XU G L, MA L, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.)
- [6] 吴海涛, 高园. 雷达网中探测范围及雷达数目的讨论[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(s1): 32-35. (WU H T, GAO Y. Discuss the detection range and the number of radar under the radar network[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(s1): 32-35.)
- [7] 李明亮, 姜秋喜, 丁锋. 网络雷达的威力范围仿真[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(5): 503-506. (LI M L, JIANG Q X, DING F. The detection coverage simulation of the network radar[J]. Journal of CAEIT, 2009, 4(5): 503-506.)
- [8] 尹安治, 安怀忠. 战场防空侦察监视系统建模与评估[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(3): 137-139. (YIN A Z, AN H Z. Simulation and evaluation of air defense reconnaissance and surveillance system in the battlefield[J]. Fire Control and Command Control, 2008, 33(3): 137-139.)
- [9] 孟慧军, 袁修久, 张敬卓, 等. 双基地雷达探测范围的三维可视化研究[J]. 计算机工程, 2012, 38(7): 224-226. (MENG H J, YUAN X J, ZHANG J Z, et al. Research on 3D visualization of bistatic radar detection range[J]. Computer Engineering, 2012, 38(7): 224-226.)

本刊国内邮发代号为 36-693 欢迎订阅