

# Study on Air Supplement Deduction Evaluation of Passive Radar

Meiqing Lin<sup>1</sup>, Yuliang Gao<sup>1</sup>, Jianquan Lv<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Information Countermeasure, Air Force Early Warning Academy, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>94895 Troops, Zhangzhou Fujian

Email: lmq8012@tom.com

Received: Sep. 1<sup>st</sup>, 2017; accepted: Sep. 12<sup>th</sup>, 2017; published: Sep. 19<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Air supplement for active radar network is an important aspect of passive radar, and operational effectiveness evaluation is also the basis of operational decision. According to operational coordination decision for passive radar implementing air supplement in condition of complex air situation, operational deduction model and evaluation model are structured for intelligence radar network resisting air target in terms of jammer cover. By operational deduction and evaluation in condition of tactical background based on above models, operational effectiveness quantitative data of passive radar is outputted, and by carrying on comparative analysis and visual performance of effectiveness for before and after jam and compensation, it can provide the basis of command decision. Finally, a simulation example is given and the validity of the model is verified.

## Keywords

Passive Radar, Operational Coordination, Air Supplement, Operational Decision, Operational Effectiveness Evaluation

---

# 无源雷达补盲效果推演评估研究

蔺美青<sup>1</sup>, 高玉良<sup>1</sup>, 吕建铨<sup>2</sup>

<sup>1</sup>空军预警学院信息对抗系, 湖北 武汉

<sup>2</sup>94895部队, 福建 漳州

Email: lmq8012@tom.com

收稿日期: 2017年9月1日; 录用日期: 2017年9月12日; 发布日期: 2017年9月19日

---

## 摘要

无源雷达为有源雷达网补盲是其作战运用的重要方面, 补盲效果评估是作战决策的重要依据。针对复杂

空情条件下无源雷达实施空情补盲的作战协同指挥决策问题,采用计算机仿真方法,构建对空情报雷达网对抗干扰机掩护下空中目标的作战推演模型和补盲效果评估模型。基于该仿真模型进行一定战术背景下的作战推演和评估解算,能够给出无源雷达补盲作战效能量化评估数据,并进行干扰前后、补盲前后两个不同维度的补盲效果对比分析和可视化表现,为复杂空情条件下无源雷达补盲作战决策提供依据。最后,给出了一个仿真实例,验证了模型的有效性。

## 关键词

无源雷达, 作战协同, 空情补盲, 作战决策, 作战效能评估

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

未来信息化作战复杂空情条件下,当有源雷达受到强干扰压制,对空情报雷达网的连续性和稳定性会面临严峻挑战,无源雷达将是非常重要的空情补盲手段。因此,为有源雷达补盲是无源雷达作战运用的重要方面。基于计算机仿真模型开展作战实验是作战运用研究的重要手段,作战效能推演评估是作战实验的重要内容。针对复杂空情条件下无源雷达补盲决策需求,构建补盲作战仿真模型和补盲效果评估模型,开展补盲效果推演评估,支持无源雷达作战补盲指挥决策,对于提升无源雷达战术战法研练水平有现实意义。

目前,针对无源雷达的作战运用研究并不多见,主要包括探测威力、作战部署和作战协同等。朱新权等建立了时差定位无源雷达探测威力量化分析模型,为无源雷达探测威力仿真提供了模型支持[1];蔺美青等构建了无源雷达优化部署模型[2];程东升等建立了无源雷达作战能力分析模型[3];黄超等对无源雷达作战协同问题进行了理论探讨[4];雷中原提出了一种有源雷达与无源雷达协同抗干扰部署优化模型[5]。此外,在要地防空、预警探测和组网雷达等领域的补盲运用、作战效能评估等研究[6][7][8],也为本文的研究提供了很好的参考和借鉴。

以下对无源雷达补盲作战运用问题进行分析梳理,构建空情补盲作战推演模型,包括推演评估流程、模型体系构成和推演数学模型,以及补盲效果评估指标解算模型,用于支持无源雷达补盲效果推演评估和作战指挥决策。

## 2. 无源雷达空情补盲作战运用

所谓补盲,就是在复杂电磁环境下,有源雷达受到电子压制、电子欺骗等情况下,当不明空情条件下预警探测网形成大面积探测盲区时,无源雷达利用其隐蔽性、干扰源定位等优势,弥补探测盲区。

有源雷达和无源雷达在作战性能上各有优势,按照体系化作战运用原则,应当实施有源雷达和无源雷达的作战协同。其中,有源/无源协同抗干扰是作战协同的重要方面,其主要内容如下[4]:

- 1) 协助有源雷达实施干扰源定位。有源干扰对无源雷达来说相当于辐射源,无源雷达能对其实施精确定位,有效弥补有源雷达反干扰能力不足,为连续跟踪掌握空中干扰机提供重要情报补充。

- 2) 辅助识别欺骗式假目标。无源雷达不受转发式和应答式假目标干扰的影响,可以用来识别欺骗式假目标干扰。而且无源雷达不受无源干扰的影响,可以有效避免欺骗式无源假目标对有源雷达造成的影

响。

3) 辅助指挥员制订反干扰决策。无源雷达可精确测定干扰源一次信号的干扰频率、脉冲宽度、重复周期、频带宽度等信息,可有效辅助指挥员准确判定干扰类型,干扰频段及主要干扰方向,甚至可以判断其电子进攻的主要方向有哪些雷达遭受到干扰,为指挥员定下反干扰决策提供依据。

4) 协助跟踪掌握干扰掩护下的重要空中目标。无源雷达基本不受电子干扰的影响,具备对干扰掩护下目标的探测能力,尤其是对无源干扰带、干扰走廊掩护下的空中目标以及机载干扰吊舱、远距离支援干扰掩护下的目标,只要其不完全实施无线电静默,就能准确定位连续跟踪,从而弥补有源雷达在情报保障上的空缺。

无源雷达补盲作战,是指在有源雷达受干扰情况下产生对空观测盲区,不能有效满足重要侦察区域对空警戒作战任务时,通过部署无源雷达进行补盲,确保预警监视体系的作战效能满足作战任务要求,是无源雷达作战运用的重要方面。

### 3. 空情补盲作战推演模型

采用计算机仿真方法构建无源雷达补盲作战推演评估模型,开展无源雷达补盲作战实验,是其战术战法研练的重要途径。

#### 3.1. 作战推演评估流程

无源雷达补盲作战推演流程具体如下:

1) 情报数据加载。情报数据的内容包括空中目标数据和雷达部署配置数据。由于无源雷达作战任务以目标警戒为主,情报数据内容为空中目标活动区域和干扰机活动区域。加载情报数据生成虚拟战场环境,显示空中目标活动区域和雷达探测威力。

2) 标绘确定重点侦察区域。标绘的依据是情报数据。可根据作战任务需要针对性地标绘侦察重点区域。

3) 综合态势分析。分析干扰条件下雷达网探测威力变化和探测盲区位置。在三维数字地球上,可实时表现干扰机飞行过程中雷达网探测威力空间的动态变化。

4) 无源雷达部署。根据综合态势分析确定的雷达网探测盲区,以及重点侦察侦察区域,选定恰当的区域部署无源雷达,并配置相关参数。

5) 补盲效果评估。以重点侦察区域的覆盖程度为作战效能的度量准则,统计计算干扰前后、无源雷达部署前后的覆盖系数的变化,量化输出补盲系数等效能指标。

6) 评估数据表现。将评估指标以图表方式直观地呈现出来,对比补盲前后的指标差异,为部署方案取舍提供依据。

7) 判断补盲效果是否满足要求。如果补盲效能达到预期目的,则输出部署方案和评估数据,否则重新进行无源雷达部署,直到找到满意的部署方案为止。

无源雷达补盲作战推演评估流程,如图1所示。

#### 3.2. 模型体系构成结构单位

根据以上流程,无源雷达补盲作战推演评估的模型构成包括虚拟战场环境生成、综合态势分析、评估数据解算和数据管理,如图2所示。

1) 虚拟战场生成模型。用于在数字地球上部署和配置敌方双方作战实体,形成初始作战态势。包括目标活动区域标绘、干扰机航迹标绘和雷达部署配置等。

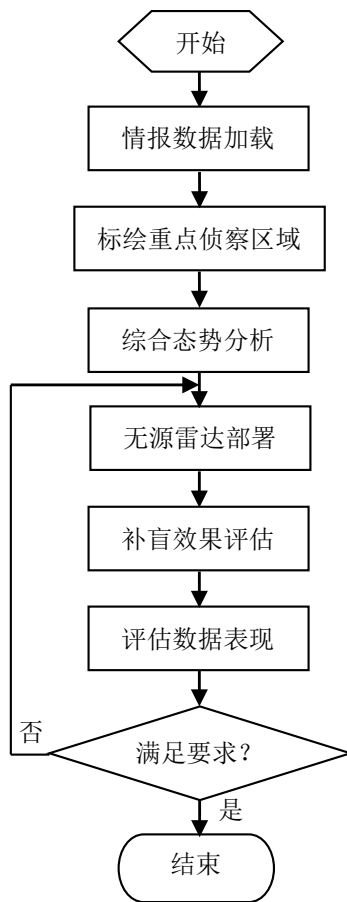


Figure 1. Flow: blind compensation and deduction  
图 1. 补盲作战推演流程

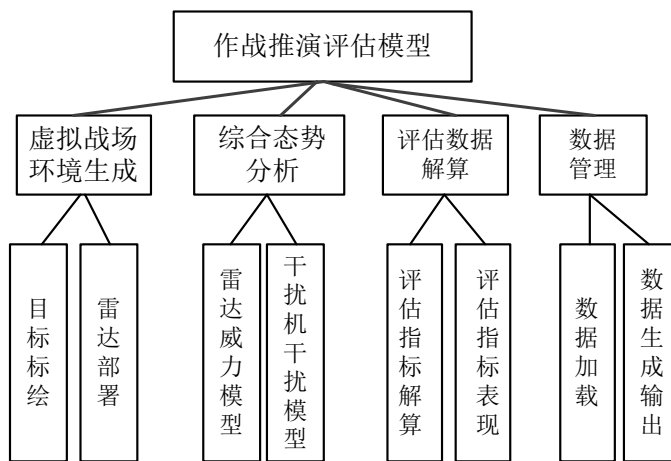


Figure 2. Model composition of deductive evaluation  
图 2. 推演评估模型构成

2) 综合态势分析模型。用于解算和分析作战实体的对抗态势，实时表现作战场景和态势。即实时表现干扰条件下雷达网探测威力空间的变化，能够直观表现探测盲区。包括有源和无源雷达的威力模型，以及干扰机干扰模型等。

3) 评估数据解算模型。用于解算雷达网对重点侦察区域的覆盖程度。通过计算补盲前后的探测覆盖程度变化,求得补盲系数等评估指标的量化值。包括对应评估指标的量化模型,以及评估数据的表现模型。

4) 数据管理模型。用于管理推演评估的输入数据、中间数据和结果数据等,为推演评估提供底层数据支持。包括数据加载、数据输出等。

### 3.3. 作战推演数学模型

由以上模型构成可见,仿真推演涉及的数学模型主要有两类,即态势分析模型和评估指标模型。其中,态势分析模型数据作战推演模型范畴,主要包括探测威力模型和干扰模型[8]。

#### 1) 无干扰条件下雷达探测模型

在无干扰条件下,单雷达在某个高度层上对目标的探测威力理论上是以雷达为圆心,以雷达实际作用距离为半径的一个圆形区域,雷达实际作用距离按下式计算

$$R = \min(R_{\max}, R_s) \quad (1)$$

式中,  $R_s$  是雷达直视距离,  $R_{\max}$  为雷达对目标的最大作用距离,单位为 km。

$R_{\max}$  由雷达方程计算。考虑传播因子  $F(\theta)$  以后的雷达方程为

$$R = \left[ \frac{nP_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{s\min}} \right]^{1/4} \quad (2)$$

$$P_{s\min} = kT_0 B_n F_n (S/N_0)_1 = 4.002 B_n F_n (S/N_0)_1 \times 10^{-21} \quad (3)$$

式中,  $(S/N_0)_1$  为单个脉冲检测信噪比;  $P_t$  为雷达发射功率;  $G$  为雷达天线增益;  $\lambda$  为雷达工作波长;  $\sigma$  为目标雷达截面积;  $k$  为玻耳兹曼常数,取值  $1.38 \times 10^{-23}$  焦耳/度;  $T_0$  为以绝对温度表示的等效接收机输入噪声温度(一般取 290 K);  $B_n$  为接收机等效噪声带宽;  $F_n$  为有效噪声系数;  $n$  为 1 次扫描中脉冲积累数,计算方法为

$$n = \frac{\theta_{0.5}}{\Omega} f_r \quad (4)$$

式中,  $\theta_{0.5}$  为雷达天线半功率波瓣宽度( $^\circ$ ),  $\Omega$  为雷达扫描角频率( $^\circ$ /s);  $f_r$  为雷达脉冲重复频率(Hz,取均值)。

考虑大气层引起的电波折射,雷达的直视距离为

$$R_s = 4.12 \left[ \sqrt{h_t} + \sqrt{h_r} \right] \quad (5)$$

式中,  $h_t$  为雷达天线高度,单位为 m;  $h_r$  为目标高度,单位为 m。

#### 2) 干扰条件下雷达探测模型

干扰条件下,雷达在某个方向上的最大探测距离  $R$  的求解方程为

$$\begin{cases} SNR_{\min} = \frac{P_t G_t^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} / J \\ J = kT_0 B_n F_n + \sum \frac{P_j G_j(\varphi) G_t(\theta) \lambda^2}{(4\pi)^2 R_j^2} \cdot \gamma_j \cdot \frac{B_n}{B_j} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $P_t$  为雷达的发射功率,单位为 W;  $G_t$  为雷达天线增益;  $\sigma$  为目标的雷达截面积,单位为  $m^2$ ;  $\lambda$  为

雷达的工作波长，单位为 m； $P_j$  为干扰机在某频率的发射功率，单位为 W； $G_j$  为干扰机天线在雷达方向的增益； $G_r(\theta)$  为雷达天线在干扰机方向的增益(方向性系数)； $\gamma_j$  为干扰信号与雷达信号的极化失配损失系数(通常干扰信号为圆极化)，当雷达天线为线极化， $\gamma_j = 0.5$ ； $R_j$  为干扰机距雷达的距离，单位为 m； $B_r$  为雷达接收机带宽； $B_j$  为干扰带宽； $SNR_{\min}$  为雷达检测信号所需的最小信干比。

## 4. 补盲效果评估指标模型

### 4.1. 补盲效果评估方法

依据以上无源雷达作战推演评估流程，补盲效果评估是部署决策的重要环节。

由于补盲的目的是弥补预警探测盲区，提升对空情报雷达网作战效能，指挥决策人员将关注两个维度的内容，包括空情维和补盲作战维。如图 3 所示。对以上两个维度进行，构成四个评估内容，包括干扰前补盲前、干扰前补盲后、干扰后补盲前和干扰后补盲后。通过对比分析两个维度四个评估内容对应的对空情报雷达网的作战效能的变化，为作战指挥提供依据。

### 4.2. 补盲效果评估指标

补盲效果评估指标包括补盲系数、覆盖系数、增值系数和重叠系数。其中，补盲系数是补盲效果量化的主要指标。

#### 4.2.1. 补盲系数

补盲系数，是指责任区内没有被有源雷达覆盖而被无源雷达覆盖到的面积,与责任区面积之比，是对无源雷达的补盲效果的直接度量。计算公式为

$$B = \frac{\left( \left( \bigcup_i S_{r,i} \right) - \left( \bigcup_i S_{n,i} \right) \right) \cap S_0}{S_0} \tag{7}$$

其中， $S_{r,i}$  为第  $i$  部雷达对于责任区的覆盖面积； $S_{n,i}$  为第  $i$  部有源雷达对于责任区的覆盖面积； $S_0$  为责任区面积。

量化方法：通过将责任区网格化，遍历所有网格，判断是否被有源雷达覆盖，若没有则进一步判断是否被任意一个无源雷达覆盖，若是则确定为补盲网格。统计补盲网格数和责任区网格数，两者的比值即为补盲系数。

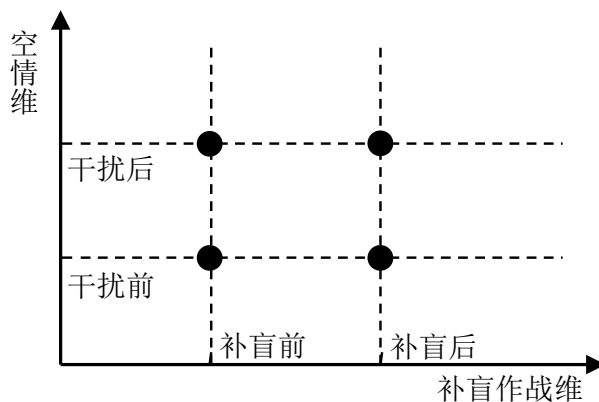


Figure 3. Evaluation content of blind effect  
图 3. 补盲效果评估内容



### 4.2.2. 覆盖指数

覆盖指数，是指责任区内被雷达网覆盖到的面积与责任区的面积之比，是雷达网探测效能的基本度量[7]。计算公式为

$$C = \frac{\left(\bigcup_i S_{r,i}\right) \cap \left(\bigcup_i S_{n,i}\right) \cap S_0}{S_0} \quad (8)$$

量化方法：将责任区网格化，遍历所有网格点，判断是否被任意一个雷达覆盖到，若覆盖到了则覆盖网格数加 1，覆盖指数即为覆盖的网格数除以责任区所占的网格数。

### 4.2.3. 增值系数

增值系数，是指责任区之外被雷达覆盖到的面积与责任区面积之比，是雷达网探测覆盖的溢出性的度量[7]。计算公式为

$$G = \frac{\left(\bigcup_i S_{r,i}\right) \cup \left(\bigcup_i S_{n,i}\right) \cap \bar{S}_0}{S_0} \quad (9)$$

量化方法：将雷达网可能探测的区域网格化，对每个网格判断是否不在责任区内且被任意一个雷达覆盖到，若覆盖到了则增值网格数加 1，增值指数即为增值网格数除以责任区网格数。

### 4.2.4. 重叠系数

重叠系数，是指责任区内被雷达覆盖到的区域，平均被多个雷达所覆盖到，是雷达网探测覆盖的稳固性的度量[7]。计算公式为

$$O = \frac{\left(\left(\sum_i S_{r,i}\right) + \left(\sum_i S_{n,i}\right)\right) \cap S_0}{\left(\bigcup_i S_{r,i}\right) \cap \left(\bigcup_i S_{n,i}\right) \cap S_0} \quad (10)$$

量化方法：对每个被覆盖的网格，统计覆盖该网格的雷达数量，若大于 1 则将其标记为重叠网格。统计重叠网格数，重叠网格数与责任区网格数的比值为重叠系数。

## 5. 仿真示例

仿真战术背景：在南海方向部署 3 部有源雷达。3 架干扰机带 L 波段干扰吊舱，掩护 F16 飞机在南海海域执行巡逻任务。

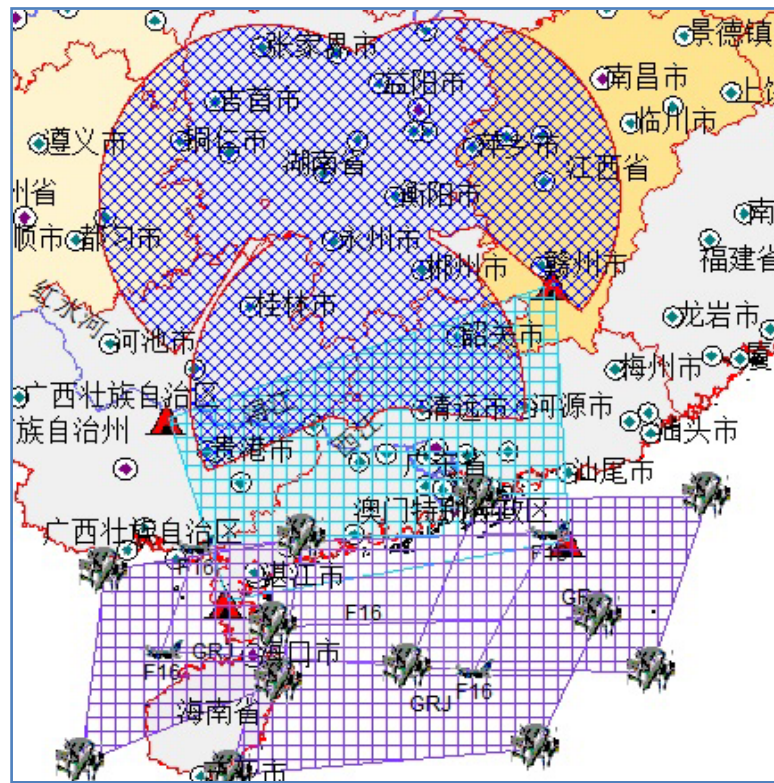
通过仿真平台导入空情数据，进行综合态势分析，结果如图 4(a)所示。

根据雷达网的盲区位置 and 变化情况，针对标绘的重点侦察区域，确定无源雷达的部署区域，在该区域选取符合部署约束条件的较优部署方案。补盲后作战态势如图 4(b)所示。部署约束条件如表 1 所示。

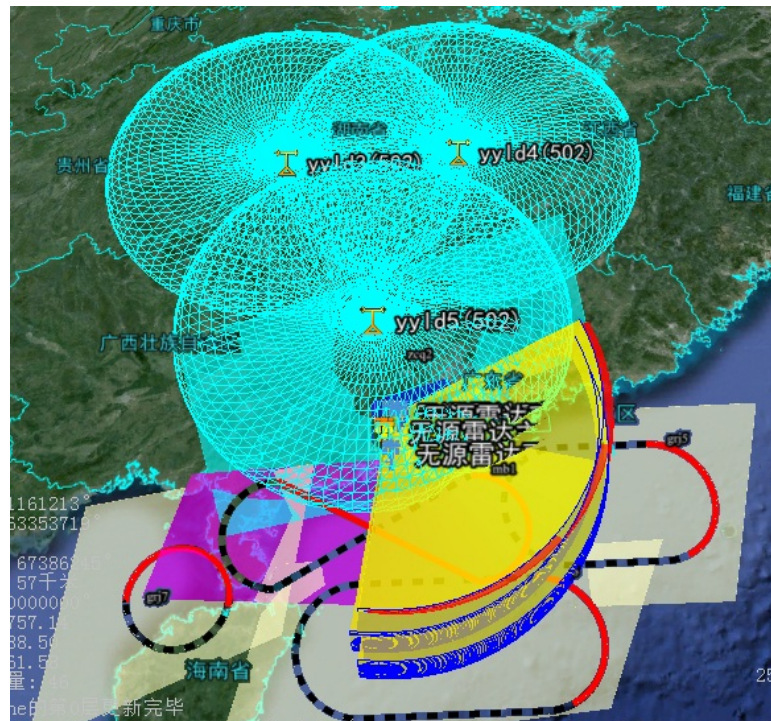
对以上四个评估内容，分别进行评估解算，并采用柱状图方式对量化数据进行对比分析。补盲系数计算结果为 0.08，初步判断补盲效果一般。其他指标解算结果，如图 5 所示。

## 6. 结论

无源雷达为有源雷达补盲是其作战运用的重要方面，也是其战斗力生成的主要依托。特别是在未来信息作战复杂空情条件下，无源雷达是雷达网实施抗干扰作战运用的重要手段和途径。采用计算机仿真



(a)

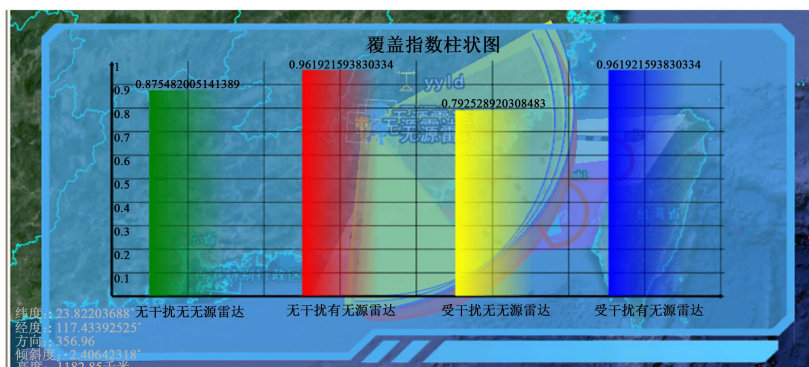


(b)

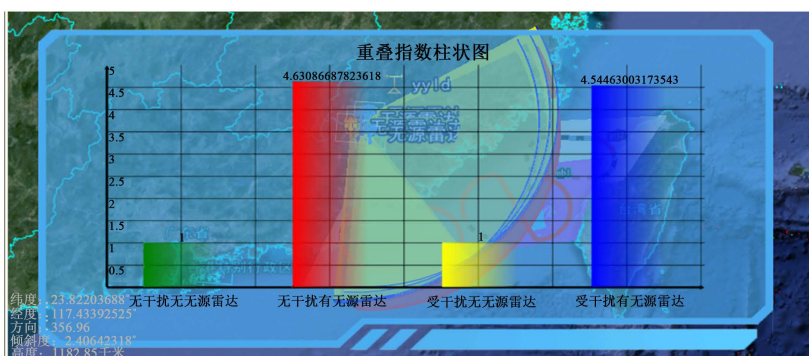
**Figure 4.** Operational situation of radar chain in condition of interference. (a) The two dimensional situation before the blind; (b) After blind, three-dimensional situation

**图 4.** 干扰条件雷达网作战态势。(a)补盲前二维态势；(b)补盲后三维态势

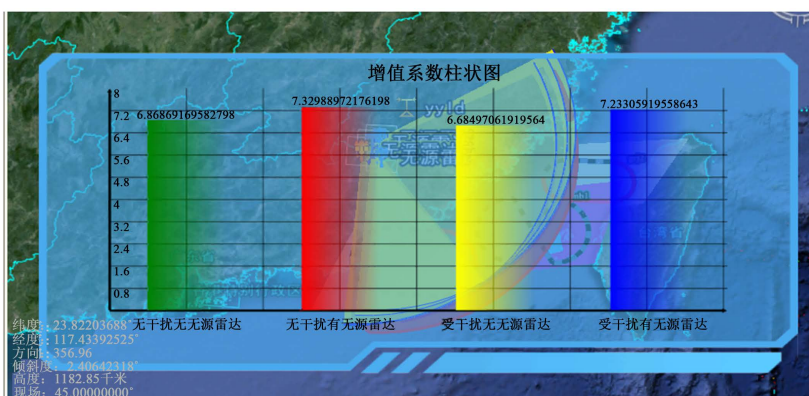




(a)



(b)



(c)

Figure 5. Representation: quantified results of blind effect. (a) The index bar chart is covered; (b) Overlapping exponential bars; (c) Value added column diagram

图 5. 补盲效果量化结果表现。(a)覆盖指数柱状图; (b)重叠指数柱状图; (c)增值系数柱状图

Table 1. Constraint condition of passive radar operational preparations

表 1. 无源雷达作战部署约束条件

序号	名称	取值
1	共视率下限	0.5
2	主辅站间距	40 km
3	辅站间距	10 km
4	主站架高上限	30 m
5	辅站架高上限	30 m

方法, 构建无源雷达作战推演和补盲效能评估模型, 支持无源雷达战术战法研练, 是推动该型装备作战运用研究的重要途径。

本文针对无源雷达补盲作战运用问题, 构建了无源雷达空情补盲作战推演模型, 包括推演评估流程、模型构成和推演数学模型, 设计了补盲效果评估方法, 以及对应评估指标解算模型和计算机量化方法, 并通过有战术背景的仿真示例进行了模型有效性验证。本文的研究为无源雷达补盲作战运用研究提供了较完备的思路方法, 对推动无源雷达作战实验研究进程有促进意义。下一步的工作包括: 基于辐射源特征的建模和验证; 基于目标战术运用的模型验证等。

## 资助信息

军队某专项。

## 参考文献 (References)

- [1] 朱新权, 俞志强, 等. 时差定位无源雷达探测威力量化分析研究[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(1): 55-59.
- [2] 蔺美青, 杨建强, 万建岗. 面向效能优化的无源雷达作战部署方法研究[J]. 空军预警学院学报, 2013, 27(2): 132-136.
- [3] 程东升, 李侠, 万山虎. 多站无源探测系统实际作战能力综合分析[J]. 现代雷达, 2009, 31(7): 12-16.
- [4] 黄超, 陈文, 杨荣华. 无源雷达与地面有源雷达作战协同问题研究[J]. 空军装备, 2008(5): 15-17.
- [5] 雷中原. 有源雷达与无源雷达协同抗干扰部署优化模型研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2016, 30(2): 20-25.
- [6] 李相民, 刘立佳, 朱邵强, 等. 要地防空阵地网低空补盲部署模型及优化[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(8): 74-77.
- [7] 张川, 解付强, 陈云翔, 等. 预警探测体系作战效能评估框架[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(12): 84-87.
- [8] 陈永光, 李修和, 沈阳. 组网雷达作战能力分析与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [csa@hanspub.org](mailto:csa@hanspub.org)