

压制干扰下舰艇编队数量对探测能力影响分析

周 程

(南京电子技术研究所 南京 210039)

摘 要: 收发分置的雷达网络隐蔽接收的特点使其在对抗干扰时有着较大的优势。将收发分置的多基地雷达应用到舰艇编队中。首先,分别构建接收站点数量各异、拓扑结构不同的 1 发多收多基地雷达系统;然后,从反截获能力和干扰暴露区出发,评价布站拓扑的探测能力和布站花费并提出 p 指标和 q 指标;最后,通过分析站点数量一定下的大量拓扑,总结使用该数量站点布站时的探测效能。分别研究典型的布站数量,对舰艇编队的布站站点数量提出建议。

关键词: 舰艇编队;截获因子;干扰暴露;站点数量

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

The impact of the number of fleet on detection capability under suppressed jamming

Zhou Cheng

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: The characteristics of the concealed reception of the passive radar network make it have a advantage in the anti-jamming. This paper applies passive radar to ship formations. First, constructing a passive radar system with different receiving stations and different topological structures. Then, proposed p and q indicators, Evaluated the detection capability of the station topology from anti-interception capability, jamming exposed range of the system. At last, summarized the detection performance when using the particularly number of stations, gave advise on the number of station sites for warship formations.

Keywords: fleet; interception factor; jamming exposed range; number of fleet

0 引 言

在海战场中,舰艇编队面对复杂电磁环境,收发分置的多基地雷达对于提高四抗能力和探测能力^[1]有着出色的性能,故多基地雷达成为研究的热点问题,优化拓扑结构^[2-3]、探究网络形式^[4]、高效融合数据^[5]等都是国内外研究的方向,但是,对于雷达布站数量的研究较少。对于此,牛超等^[6]分析布站网络的几何精度因子(geometric dilution of precision, GDOP)^[7]指出通过合理布站可用较少的站数获得比较多站数更好的性能,但其并未涉及具体数量的研究。Ivashko^[8]采用克拉美罗的方法研究了布站数量的问题,但是计算量大且未引入布站效费,即在海战场环境中,增加雷达站点的开销与之带来的探测能力的提升并不相称。故在复杂海战场环境中,多基地雷达的站点数量是一个值得研究的问题,本文通过研究不同站点数量下的不同拓扑结构的反截获能力和干扰暴露区,综合分析得到 4 个典型站点数量下的探测能力和布站花费,对舰艇编队的布站数量给

出建议。

1 多基地雷达系统模型构建和探测范围分析

1.1 系统模型构建

本文构建的模型为受到干扰机干扰的 1 发多收式的多基地雷达。其中干扰机干扰模式为远程支援式干扰,即位于它能够探测到发射信号的最远距离处,也即是在以发射站点为圆心,以干扰机截获雷达距离为半径的弧上运动。应用悲观准则,当它对雷达网络进行压制式干扰时,其主瓣对准发射站点,副瓣增益作用于接收站点。1 发多收式雷达网络由 2 个参量构成拓扑:基线长度 L ,接收站点方位角 θ ,其中夹角 θ 为一向量,其维数等于接收站点数目。基线长度 L 的选择受数据融合时间、地球曲率等因素的约束,考虑到时间同步的要求,各接收站点到发射站基线长度相同, L 为一标量。1 发 3 收模型,如图 1 所示。

1.2 探测范围分析

探测范围定义为不考虑干扰时的探测范围,即理想探

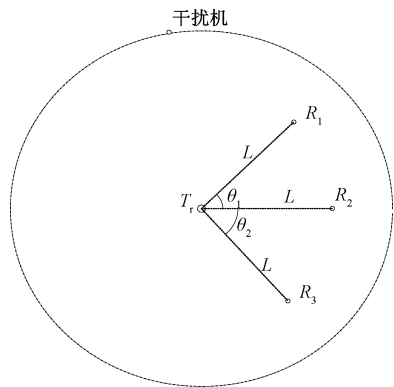


图 1 多基地雷达系统模型

测范围。此节构建表征多基地雷达探测范围的参数,寻找该参数边界条件,得到探测范围。该参数可以选择:对目标的探测概率、对目标的积累能量、探测误差的 GDOP^[9-10]等。考虑到本文的多基地雷达效能分析的普遍性,不限制于具体信号形式,故从积累能量的角度来研究多基地雷达的探测范围。

由双基地雷达系统的雷达方程出发,可得目标处接收到发射站点的信号功率密度为:

$$s_t = \frac{P_t G_t}{4\pi r_t^2} \quad (1)$$

式中: P_t 为发射信号功率; G_t 为发射增益; r_t 为目标和发射站的距离。

目标向自由空间散射能量被接收站接收,此时第 i 个站点接收到的目标散射能量为:

$$P_{Ri} = S_{Ri} A_{Ri} = \frac{S_i \sigma \lambda^2 G_{Ri}}{(4\pi)^2 r_{Ri}^2 L_{Ri}} \quad (2)$$

式中: σ 为第 i 个接收基地的目标截面积; λ^2 为信号波长; G_{Ri} 为第 i 个接收站点的接收天线增益; L_{Ri} 为第 i 个接收站点的接收系统损耗; r_{Ri} 为第 i 个接收站到目标的距离。

对于本文构建的多基地雷达模型,接收站点相隔较远,很难保证各站点信号的相关性,故对于信号采用非相参积累,即:

$$p_R = \sum p_{Ri} \quad (3)$$

对于雷达检测,接收站点最小可检测信号功率为:

$$P_{Rmin} = k T_s B_n \cdot \left(\frac{S}{N} \right)_{min} \quad (4)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数; T_s 为接收机噪声温度; B_n 为接收机检波前噪声带宽; $\left(\frac{S}{N} \right)_{min}$ 为最小可检测信噪比。综合式(3)和(4)可知,由下面不等式即可得到雷达的探测范围:

$$P_R \geq P_{Rmin} = k T_s \cdot \left(\frac{S}{N} \right)_{min} \quad (5)$$

图 2 为一发三收和一发四收的典型拓扑的探测范围图。

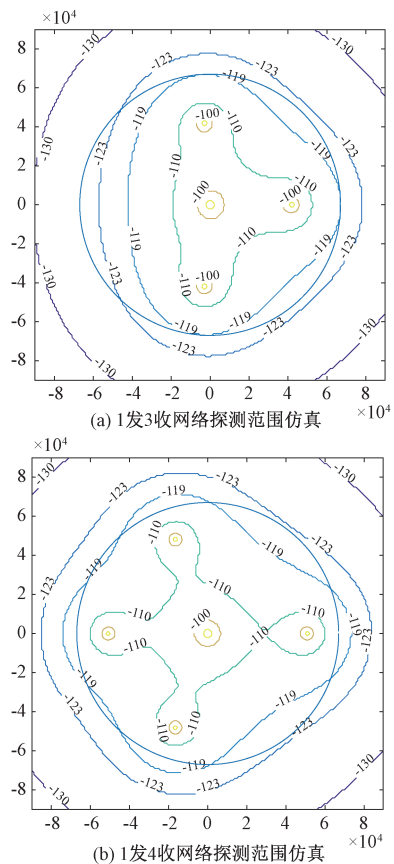


图 2 两种典型拓扑的多基地系统探测范围

其中等高线上的数值表示多基地雷达系统对于该位置目标积累的信号能量的分贝值,式(4)边界条件 P_{Rmin} 由设定参数计算可得为 -123 dB,该等高线内即为该拓扑的探测范围。

2 拓扑的探测能力分析

2.1 反截获能力分析

反截获能力是指雷达发现目标时,干扰机未捕获雷达的区域。此处采用了 Schleher 提出的截获因子 α ^[11]来评价反截获能力。

$$\alpha = \frac{r_l}{r_M} \quad (6)$$

式中: r_l 为干扰机截获雷达并施加干扰的最远距离; r_M 为雷达探测到目标的最远距离^[12]。显然的,当 $\alpha < 1$ 时,雷达在对抗中处于优势, $\alpha > 1$ 则干扰机在对抗中处于优势。干扰机截获雷达距离 r_l 可由式(7)给出。

$$r_l = \left(\frac{P_t G_{tj} G_j \lambda^2 \gamma}{(4\pi)^2 P_{jmin} L_j} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中: P_t 、 G_{tj} 、 G_j ^[13]分别为发射信号功率、发射天线副瓣增益、干扰机接收增益; γ 为侦察接收天线极化与雷达信号极化失配损失; P_{jmin} 为侦察接收机的灵敏度; L_j 为侦察接

收机的系统损耗。

由式(7)可以算得干扰机截获雷达的距离 r_I , 而 r_M 可由 1.2 节分析得到, 由此可以仿真分析拓扑结构的反截获能力。由于雷达精跟目标时, 雷达的发射波束多为窄波束且对准目标, 认为式(7)中发射天线副瓣增益为定值, 在发射功率一定的情况下, r_I 为一定值, 即图 1、2 中所描述的干扰机位于以发射站为圆心, r_I 为半径的圆上运动。

可以从图 2 直观的看出反截获优势区域, 即 -123 dB 的等高线和干扰机圆的两个交点所围的区域。定义 $\alpha < 1$ 的干扰机方位角集合为 $S_{\text{优}}$, 定义 $\alpha > 1$ 的干扰机方位角集合为 $S_{\text{劣}}$, $p = S_{\text{优}}/S_{\text{劣}}$ 表示反截获优势角度占比, 该指标可以反映给定拓扑结构多基地雷达的反截获能力。图 2(a) p 值可由 Monte Carlo 思想^[14] 仿真计算得到, 经计算, 此时 $p = 0.7285$ 。

2.2 干扰暴露区分析

干扰暴露区是指雷达受到有源干扰时仍能发现目标的区域。同 1.2 节的分析方法, 可以得到多基地雷达第 i 个接收站点接收到的干扰功率和非相参积累后的干扰功率 P_{ji} 和 P_J 分别是:

$$P_{ji} = \frac{p_j \gamma_j \lambda^2 B_r G_{ji}(\theta_{ji}) G_{Ri}(\alpha_i)}{(4\pi)^2 B_j L_j r_{ji}^2 L_{Ri}} \quad (8)$$

$$P_J = \sum P_{ji} \quad (9)$$

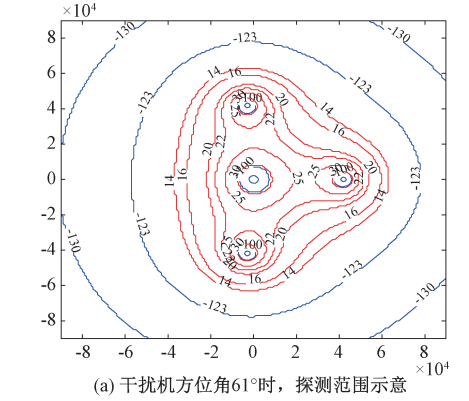
其中 P_j 、 γ_j 、 B_r 、 B_j 、 r_{ji} 分别为干扰机发射功率、干扰信号对雷达天线的极化损失、雷达接收机的工作带宽、干扰信号带宽、干扰机到每个接收基地的距离。如前文所述, 这里所采用的有源干扰为远距离支援干扰, 干扰机的干扰由雷达发射站点的副瓣进入, 干扰机副瓣对接收机施加影响, 则 $G_{ji}(\theta_{ji})$ 和 $G_{Ri}(\alpha_i)$ 分别为干扰机对第 i 个接收站点方向增益, 接收站点对干扰机方向的接收增益, 其中参数 θ_i 、 α_i 分别为干扰机主瓣方向、接收站主瓣方向对干扰机——接收站连线方向的夹角。这个增益值可以从天线方向图中得到, 考虑到本实验不涉及具体天线, 可由式(10)近似^[15] 计算。其中 G 为天线主瓣增益; $\theta_{0.5}$ 为天线的主瓣宽度; θ 为计算方向和主瓣的夹角; K 为常数, 对于方向性好, 增益高的天线 $K = 0.07 \sim 0.10$ 。

$$G(\theta) = \begin{cases} G, & 0 \leq \theta \leq \frac{\theta_{0.5}}{2} \\ K \left(\frac{\theta_{0.5}}{\theta} \right)^2 G, & \frac{\theta_{0.5}}{2} \leq \theta \leq 90^\circ \\ K \left(\frac{\theta_{0.5}}{90^\circ} \right)^2 G, & 90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (10)$$

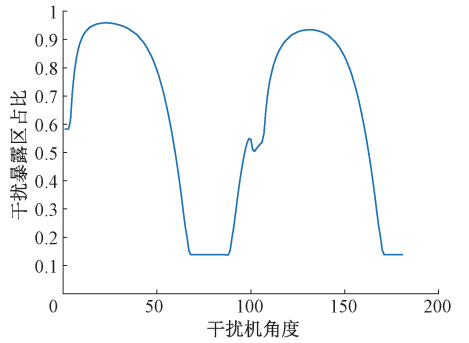
和 1.2 节分析相同, 从能量角度来看, 当接收站的雷达的非相参积累能量满足式(11), 即可计算出多基地雷达系统在受到远距离支援式压制干扰时的探测范围, 即可得此种拓扑下雷达的干扰暴露区^[16]。

$$\frac{P_R}{P_{rj} + kT_n B_n} \geq \left(\frac{S}{J} \right)_{\min} \quad (11)$$

对于图 2(a)所示的 1 发 3 收的多基地雷达系统, 可以分析其干扰暴露区如图 3 所示。



(a) 干扰机方位角 61° 时, 探测范围示意图



(b) q 值随干扰机角度变化

图 3 干扰暴露区分析

干扰机相对发射站方位角不同时, 其干扰暴露区也有所不同。其中图 3(a)为干扰机方位角为 61° 时, 该多基地雷达系统干扰暴露区和探测区域的示意图, 其中等高线 14 dB 表示式(10)中的 $\left(\frac{S}{J} \right)_{\min}$, 其所围区域 S_1 表示干扰暴露区; 等高线 -123 dB 所围区域 S_2 代表着 1.2 节的探测范围, 随着站点的增加毫无疑问探测范围会增加, 即 S_2 可视作布站花费。可见受到压制干扰时, 雷达网络的有效探测面积大大缩小。定义 $q = S_1/S_2$ 表示干扰暴露区占比, q 可以表明该种拓扑对于某一方位角干扰源的对抗能力, q 越大, 表示此时抗干扰能力越好, 并通过 S_2 在 q 中引入了布站花费。图 3(b)是干扰机方位角位于 $0^\circ \sim 180^\circ$ 时, q 值的变化情况, 可见当干扰机位于 $[12^\circ, 50^\circ] \cup [127^\circ, 141^\circ]$ 时, $q \approx 1$, 而当干扰机位于 $[79^\circ, 100^\circ] \cup [170^\circ, 180^\circ]$ 时, $q \approx 0.2$ 。前者抗干扰效果远好于后者。

3 站点数量对探测能力影响分析

第 2 节分析了某一固定拓扑的探测能力, 从反截获能力和干扰暴露区两个方面去评价拓扑的探测能力, 并得到了 p 和 q 两个评价指标。本节分析不同站点数量的探测能力, 得到站点数量和测效能之间的关系。在典型的站点数量下, 利用 MATLAB 软件仿真得到大量该数量下的不同拓扑, 并计

算得到于之对应的 p 和 q 指标,分析数据,得到结论。

3.1 p 指标和 q 指标分析

1)分析 p 指标。分别计算得到 1 发 2 收、1 发 3 收、1 发 4 收、1 发 5 收,4 种站点数量下大量拓扑对应的 p 指标如图 4 所示。

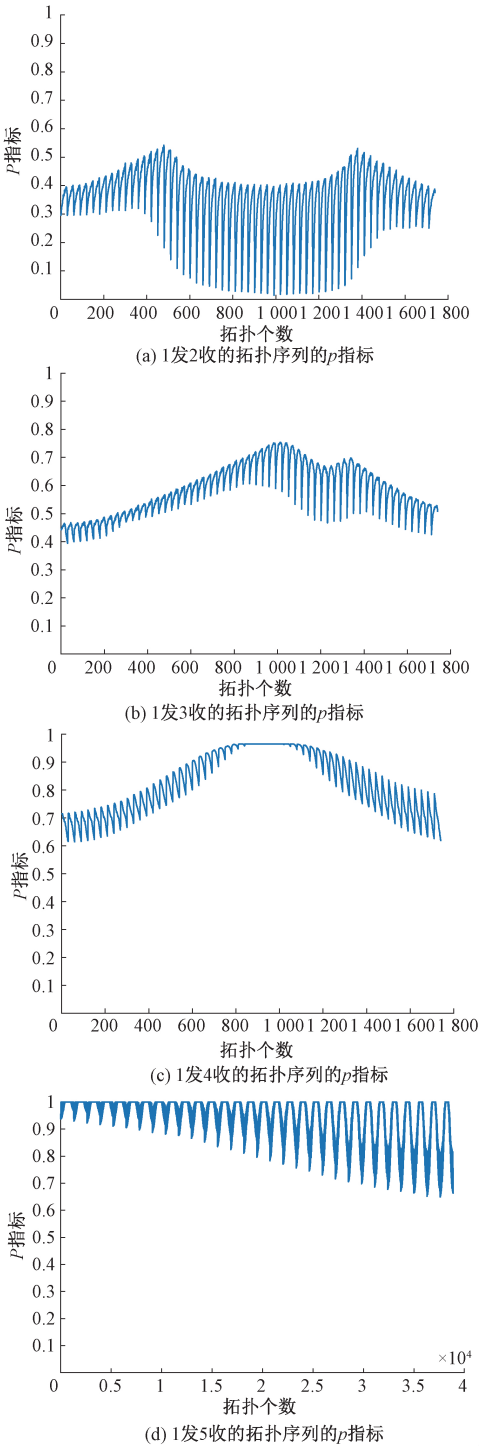


图 4 4 种组网体制的 p 指标分析

多,反截获优势角度占比,即 p 指标越来越大,并整体分布于由低到高的 4 个条带:0~0.45、0.45~0.65、0.65~0.9、0.9~1。求得 4 种情况下 p 指标的均值如表 1 所示。

表 1 4 种体制下的 p 指标均值

体制	1 发 2 收	1 发 3 收	1 发 4 收	1 发 5 收
p	0.359 9	0.583 6	0.825 4	0.940 7

p 指标均值也位于条带之内,可见使用 p 指标均值代表某站点数量下的反截获优势角度有其合理性,故我们采用如表 1 中的数据来表征各站点数量下的反截获能力。

2)分析 q 指标。与 p 指标不同,对于特定拓扑,由于每一个干扰机方位角对应着不同的干扰暴露区占比,最终形成如图 3(b)所示的 q 指标随干扰机角度变化图。有必要对该图进行分析,找到各站点数量和干扰暴露区占比的内在联系,以得到各站点数量下 q 指标的合理表示如图 5 所示。

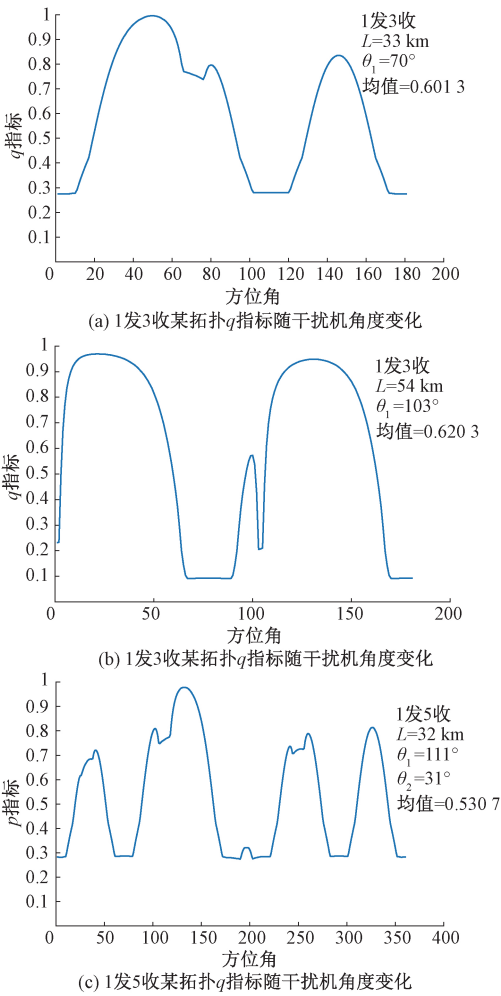


图 5 3 种典型拓扑下的 q 指标分析

观察图 5 可以发现,站点数量的不同,带来了 q 指标均值的不同。由图 5 可以看出 1 发 3 收拓扑下的 q 指标均值

由图 4 可以看出,整体趋势上随着接收站点数量的增

大于 1 发 5 收的 q 指标均值。合理猜想是 q 指标对干扰机方位角取均值的结果和站点数量有关,即同一站点数量下大量不同拓扑的 q 指标均值可以反映该站点数量的多基地雷达系统的抗干扰能力以及布站花费,现验证如图 6 所示。

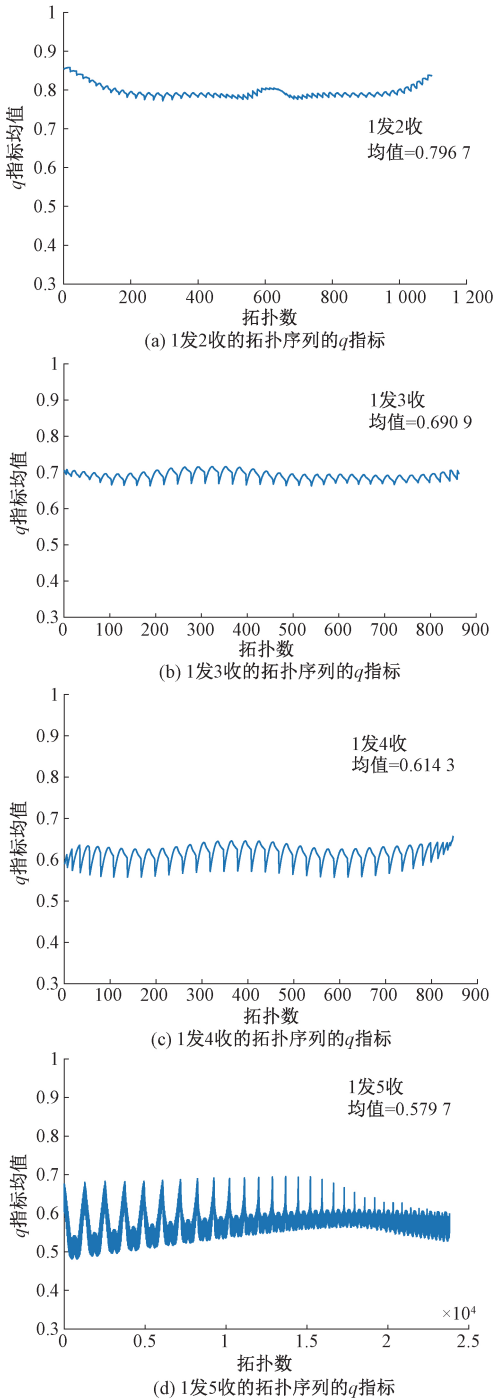


图 6 4 种模型拓扑下 q 指标分析

由图 6 可以看出,同 p 指标均值相似,同一布站数量下的不同拓扑之间的 q 指标均值也随着站点数量的不同而分布在高低不同的条带上;相反的是,随着站点数量的增多, q

指标会下降,这意味着在站点数量增加时,多基地雷达系统探测范围相较于未受干扰时被干扰机压缩的更为严重。

由以上分析, q 指标均值作为不同数量站点的多基地雷达系统干扰暴露区衡量指标有其合理性,可以选择。

3.2 由 p 指标、 q 指标到探测能力

反截获能力和干扰暴露区占比均是多基地雷达系统至关重要的探测能力,即一个多基地雷达系统其 p 指标和 q 指标均能达到标准。由 3.1 节可以发现,站点数量的增加会导致 p 指标均值上升和 q 指标均值的下降。现提出受到压制干扰情况下探测能力指标 $A_{ability}$:

$$A_{ability} = p \cdot q \tag{12}$$

由该指标计算可得 4 种不同站点数量的多基地雷达系统探测能力如表 2 所示。

表 2 多基地雷达系统探测能力

体制	1 发 2 收	1 发 3 收	1 发 4 收	1 发 5 收
$A_{ability}$	0.286 8	0.403 3	0.507 0	0.545 3

由表 2 可以算出其探测能力的增加量分别为 0.116 5、0.103 7、0.038 3,即增加站点数量所带来的探测能力的提升越来越少。可以发现接收站点由 2 增加到 4,带来的探测能力的提升都较为显著,分别提升了 40.6%和 25.7%,而接收站点由 4 增加到 5,其探测能力只提升了 7.9%。

若假设每增加一个接收站所耗费的成本是一定的,可推得 1 发 4 收的多基地雷达系统的效费比最高。

4 结 论

本文聚焦于在远距离支援式压制干扰下舰艇编队多基地雷达系统的探测能力问题,重点研究了布站的雷达数量对于探测能力的影响。首先使用反截获优势角度占比和干扰暴露区占比来描述多基地雷达系统的探测能力,并通过干扰暴露区占比引入了布站花费,然后通过研究一定站点数量的雷达系统下的大量不同拓扑,得到了反映不同布站数量的多基地雷达系统探测能力的指标 $A_{ability}$,从探测能力和布站效费出发解决了舰艇编队多基地雷达参与组网数量的问题。

研究表明,在耗费一定的情况下,1 发 4 收的多基地布站形式效费比最高。本文对一发多收布站方式下多基地雷达布站数量对于探测效能的影响已做研究;而多发多收情况下,雷达布站数量对于探测效能的影响有待进一步研究。

参考文献

[1] 沈伟,徐斐,邢文革,等.布站方式对舰艇编队探测能力的影响分析[J].现代雷达,2017,39(2):23-28.
[2] 曲长文,王昌海,冯奇,等.时差无源定位系统多机编队动态布站优化[J].舰船电子工程,2017,37(3):38-43.
[3] 江翔.无源时差定位技术及应用研究[D].成都:电子科技大学,2008.

[4] 李金洲. 基于多接收站的辐射源定位新方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2014.

[5] 辛召强. 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.

[6] 牛超, 张永顺. 基于 GDOP 的多基地雷达布站优化研究[J]. 现代防御技术, 2013, 41(3):125-131.

[7] 潘焯炆, 郭洁, 张林颖, 等. 基于自适应遗传算法的优化布站方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(6):62-64.

[8] IVASHKO I. Radar networks performance analysis and topology optimization[D]. Delft: Delft University of technology, 2016.

[9] CHAN Y T, HO K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,1994,42(8): 1905-1915.

[10] 赵琨, 何青益. 基于 GDOP 的三站时差定位精度分析[J]. 无线电工程, 2012, 42(5):15-17,33.

[11] 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.

[12] 黄鹏刚. 低截获概率雷达技术研究[J]. 现代电子技术, 2003, 26(18):24-25.

[13] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2012.

[14] RUBINSTEIN R Y. Simulation and the monte carlo method[C]. Simulation and the Monte Carlo Method. Newyork:John Wiley & Sons, 2008;167-168.

[15] 沈阳, 陈永光, 李修和. 双基地雷达干扰暴露区的计算与仿真分析[J]. 现代雷达, 2003, 25(11):4-6.

[16] MAHAFZA B R. 雷达系统分析与设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2008.

作者简介

周程, 硕士研究生, 主要研究方向为海基网络化雷达探测。
E-mail:2081616885@qq.com