

警戒模式下多基地声纳配置方法研究

王法栋¹ 李 巍^{2†} 孙长瑜²

(1 中国人民解放军 92493 部队 葫芦岛 125000) (2 中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要 研究了警戒模式下多基地声纳的布阵方法。首先,利用双基地声纳“定位精度几何扩散因子”的几何分布图,提取图中定位误差满足要求的区域。然后,根据该区域的图形特征,提出一种基于正 n 边形作图方法的多基地声纳布阵算法。通过仿真分析可知,利用该算法布阵后,目标的定位性能与贪婪算法布阵后的定位性能基本接近,但是本文算法的运算量远比贪婪算法小,因此它具有更强的实用性。

关键词 多基地声纳,配置方法,定位,正 n 边形。

A deployment algorithm of multistatic sonar for surveillance mode

WANG Fa-Dong¹ LI Yi² SUN Chang-Yu²

(1 Unit 92493 of PLA, Huludao 125000)

(2 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract A deployment algorithm of multistatic sonar for surveillance mode has been studied. At first, the area that the localization error is below the threshold was extracted from the GDOP(Geometrical Dilution of Precision) figure. Then, according to the shape of that area, a deployment algorithm based on regular polygons was put forward. The simulation result shows that the localization performance of this algorithm is similar to that of the greedy algorithm, but this algorithm is more practical for the computational loads are small.

Key words Multistatic sonar, Deployment algorithm, Localization, Regular polygon

1 引言

由于多基地声纳具有“隐蔽自身,先敌发现,先敌打击”的优点,因此正逐步成为各国海军关注的重点。

文献[1]、[2]分析了不同测量量对双基地声纳定位性能的影响,并着重对方位交汇和距离交汇方式下的定位精度进行了分析。文献[3]、[4]讨论了多基地声纳的寻迹方法,包

括最近邻域跟踪器(nearest-neighbor tracker)、多假设跟踪器(multi-hypothesis tracker)、离散多假设跟踪器(distributed multi-hypothesis tracker)等,不同算法的优势各不相同。文献[5]对双基地声纳的散射声场进行了仿真分析。文献[6]、[7]对双基地声纳在主动信号探测情况下的目标特性进行了研究。文献[8]、[9]则以卡西尼卵形线为基础,对双基地声纳的探测范围进行了分析。

2009-01-06 收稿; 2009-02-20 定稿

作者简介:王法栋(1971-),男,山东人,中国人民解放军 92493 部队工程师,研究方向:信号处理。

李巍(1973-),女,助研。

孙长瑜(1954-),男,研究员。

†通讯作者:李巍, E-mail:liyi_731973@yahoo.com.cn

但是,迄今为止,无论是国外还是国内,均没有见到有文献从定位精度方面入手,提出多基地声纳的配置算法。本文针对警戒模式下多基地声纳的布阵问题,提出一种简便的布阵算法,它可实现观测范围内定位误差小、定位性能均匀的目的。算法运算量小,实时性高,具有一定的工程实用性。

2 多基地声纳误差分析

多基地声纳可视为由一组组双基地声纳构成。对于每组双基地声纳,我们用“定位精度几何扩散因子”GDOP (Geometrical Dilution of Precision) 来衡量定位误差与几何分布的关系,其定义为^[10]:

$$G = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (1)$$

其中, σ_x^2 、 σ_y^2 分别表示目标在 x 轴和 y 轴方向测量值的方差, G 表示目标的 GDOP 值。从上式可看出, GDOP 表示测量得到的目标坐标落在以真实目标为圆心,以 GDOP 为半径的圆内的概率非常大。GDOP 值越大,说明测量得到的目标坐标越偏离真实目标。

对于多基地声纳,考虑最简单的线性组合情况,得到目标坐标:

$$\begin{cases} x = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \cdots + a_N x_N \\ y = a_1 y_1 + a_2 y_2 + \cdots + a_N y_N \end{cases}, \quad (2)$$

其中, a_1 、 a_2 、 $\dots$ 、 a_N 为待确定的常数, (x_k, y_k) ($k=1, 2, \dots, N$) 为第 k 组双基地声纳测量得到的目标坐标, N 为双基地声纳的数量。

假设各组双基地声纳测量得到的目标坐标是无偏的。那么,对于多基地声纳,由于要求估计也是无偏的,因此可将 $a_1 + a_2 + \cdots + a_N = 1$ 作为约束条件。有

$$E(x) = (a_1 + a_2 + \cdots + a_N)x = x \quad (3)$$

$$E(y) = (a_1 + a_2 + \cdots + a_N)y = y \quad (4)$$

此时,多基地声纳的 GDOP 值为:

$$G = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (5)$$

利用拉格朗日乘数法,进一步推得:

$$a_1 = \frac{E}{G_1^2}, \quad a_2 = \frac{E}{G_2^2}, \quad \dots, \quad a_N = \frac{E}{G_N^2} \quad (6)$$

$$E = \left(\frac{1}{G_1^2} + \frac{1}{G_2^2} + \cdots + \frac{1}{G_N^2} \right)^{-1} \quad (7)$$

其中 G_k^2 ($k=1, 2, \dots, N$) 是第 k 组双基地声纳测量得到的目标坐标的 GDOP 值平方。则可知:

$$G = \left(\frac{1}{G_1^2} + \frac{1}{G_2^2} + \cdots + \frac{1}{G_N^2} \right)^{-1/2} \quad (8)$$

$$G < \sqrt{\min(G_1^2, G_2^2, \dots, G_N^2)} \quad (9)$$

从上面的分析可看出,多基地声纳的定位性能必然优于其中任何一组双基地声纳,因此多基地声纳正越来越受到人们的关注。

但是,如何布设多基地声纳才能达到既节约成本,定位效果又好的目的呢?本文针对此问题,在下面提出了一种基于警戒模式的多基地声纳配置方法。

3 多基地声纳配置方法

3.1 算法模型

实际工作中,事先通常无法知道目标出现的位置。因此,需要在一个大范围内布设警戒网络,既保证能检测到此范围内的每个角落,也保证此范围内的整体定位误差较小。观测模型如图 1 所示,图中 S 为发射点,以

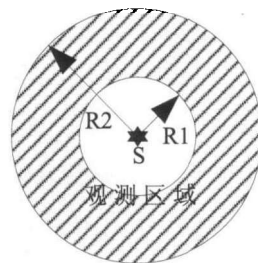


图1 警戒模式下的观测模型

R2 为半径的圆内所有区域为观测区域。由于多基地声纳是一种收、发分置的声纳,所以接收点不能太靠近发射点,因此本文假设接收点只能布放在图 1 中的阴影部分。

将图 1 所示的观测区域划分为一个个网格,选取代价函数

$$c = b_1 \cdot n_1 + b_2 \cdot n_2 + \cdots + b_M \cdot n_M \quad (10)$$

其中, c 表示代价函数, n_k ($k=1,2,\cdots,M$) 表示观测区域内 GDOP 值位于某一区间的网格点个数, b_k 为权系数, M 为划分的 GDOP 值域区间总个数。

警戒模式下的布阵目标是保证观测区域内的整体定位误差较小。因此,应根据 GDOP 值的大小确定公式 (10) 中的权系数。当 n_k 对应的 GDOP 值大时,选取小的权系数;当 n_k 对应的 GDOP 值小时,选取大的权系数。那么,公式 (10) 中代价函数最大时对应的接收点位置即为最优的布阵位置。

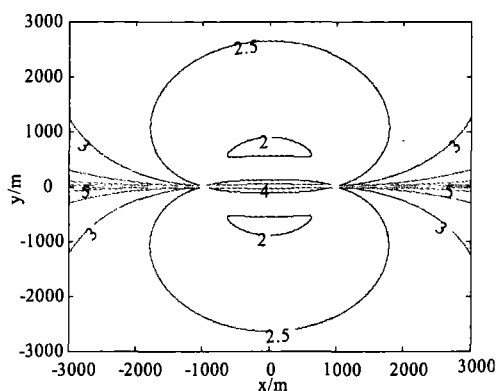
该问题是一个多项式复杂程度的非确定性问題 (NP, Non-deterministic Polynomial), 此类问题均能通过遍历法得到最优解。但是,随着网格点个数和接收点个数的增加,遍历法的运算量呈指数增长,实际很难实现。因此我们必须寻找更简洁的布阵算法。

为简化分析,本文只考虑多基地声纳中各双基地声纳的数据不进行融合的情况。此时,双基地声纳的误差分布完全独立,不会相互作用。

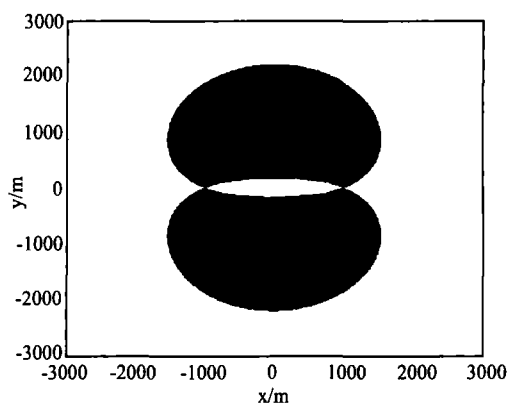
首先,对于一组双基地声纳,可得到如图 2a 所示的 GDOP 几何分布图,图中发射、接收点坐标分别为 $(-1000, 0)$ 、 $(1000, 0)$ (单位: m), 观测区域为 $x \in (-3000, 3000)$ 、 $y \in (-3000, 3000)$ 。目标可位于观测区域内任意位置,每个位置对应的 GDOP 值如图 2a 所示。由于 GDOP 值非常离散,所以图 2a 展示的是 GDOP 值取以 10 为底的对数后得到的等高线图。从图 2a 可看出,基线附近和发射/接收点的侧边区定位误差非常大,基本

无法实现准确定位;另外,如果目标在基线正上方相对基线由近及远运动,那么它的定位误差将由大变小后再变大。

通过对图 2a 进行提取,可得到如图 2b 所示的黑色图形,黑色区表示误差满足要求的区域。从图 2b 可看出,多基地声纳的布阵问题能简化为:在观测区域内,如何利用尽可能少的接收点,实现黑色图形的均匀布放,并保证观测区域内黑色区域所占比例最大。



(a) GDOP 几何分布图



(b) 误差满足要求的区域

图2 GDOP几何分布图提取方法示意

3.2 算法实现

为简化分析,假设在待观测的海域范围内海洋环境基本平稳,接收点性能基本一致,各接收点采用的定位方法也一样。那么,可近似认为各接收点的测量误差基本相同。由此可知,各组双基地声纳得到的黑色区域面

积相等、形状一样。

本文算法借鉴了贪婪算法的基本思想，即暂不考虑全局最优，而只考虑局部最优。那么，对于一组双基地声纳，可调整发射点到接收点的基线长度，使得黑色图形的面积最大化。然后，按照图 3 所示的方法，利用得到的黑色图形作正 n 边形，就可很容易地确定接收点的布放位置。

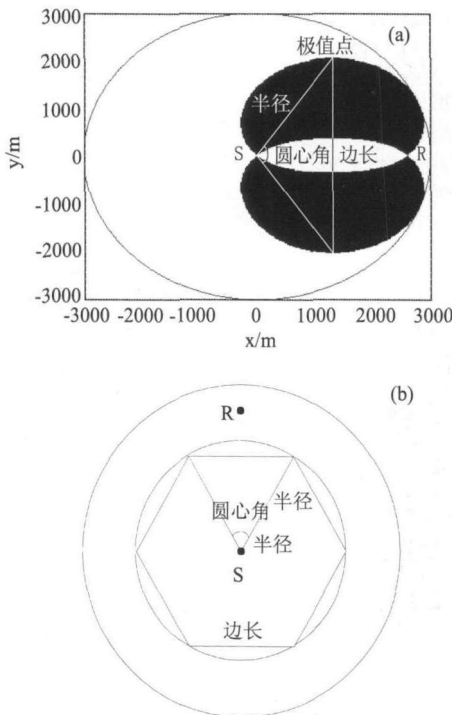


图3 接收点布放示意图

对于正 n 边形，其边、角有如下关系：

$$\text{边长} = 2 \times \text{半径} \times \sin(\text{圆心角}/2)$$

从上式可看出，当正 n 边形的边长数量增多时，边长长度变短。因此，当从图 3(a)找到黑色图形的极值点后，就可确定图 3(a)中“边长”的长度，由此可确定正 n 边形所需的边长数量。最后，由正 n 边形的边长数量可确定接收点的个数和位置，此位置近似认为是接收点的次最优布阵位置。

实际工作中，有时测量误差较大，导致黑色区域面积最大时，黑色图形的边界无法

与观测区域的边界相切，这会造成观测区的外围环形区测量误差非常大。另外，也可能由于测量误差较大，导致基线附近的白色区面积太大，黑色区面积细小，最终造成整个观测区内误差偏大。

针对上述两种情况，可对算法进行修正。一方面，双基地声纳调整基线长度时，应保证黑色图形始终能和观测区边界相交，在此前提条件下实现黑色区面积的最大化；另一方面，当基线附近的白色区面积太大时，应使正 n 边形的边长小于图 3(a)中的“边长”，即让不同组双基地声纳的黑色区域有一定重叠，这样可减少观测区域内的整体定位误差。

算法流程如图 4 所示，图中 L_N 表示正 N 边形的边长长度。

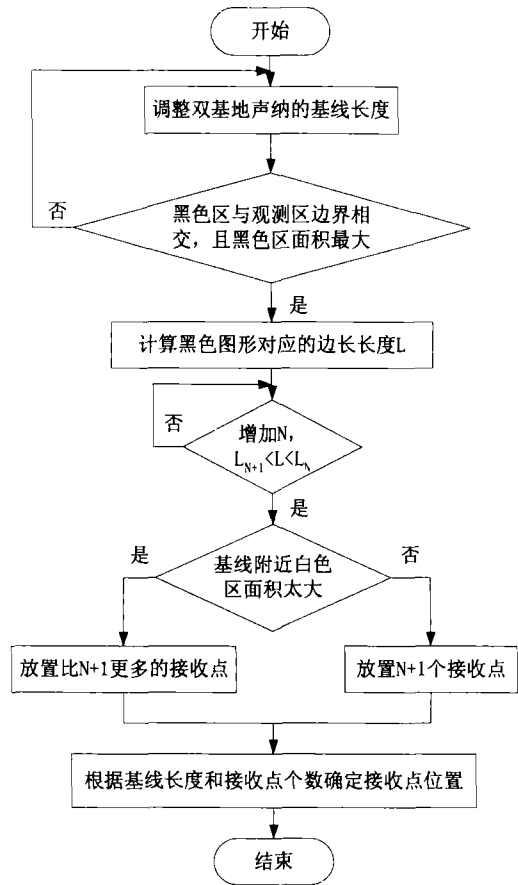


图 4 算法流程

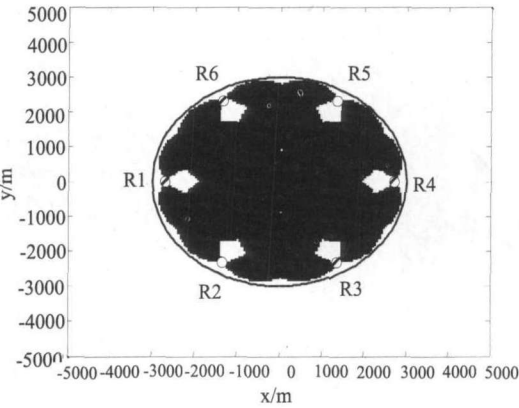
3.3 仿真结果

假设观测区域的半径为 3km，接收点可布放在环宽为 2km 的圆环内，每 50m 间隔一个点进行仿真。采用内置 Pentium(R) D CPU 2.8GHz 2.79GHz 的计算机，利用 matlab

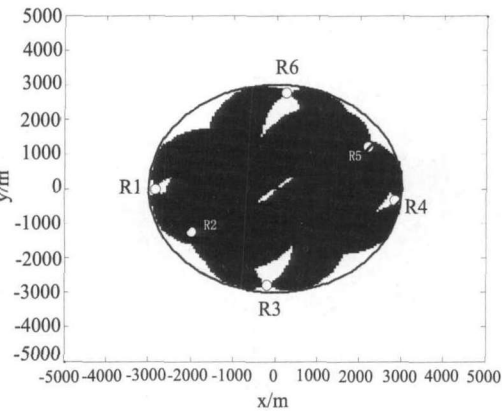
软件进行计算。将本文算法与遍历法和贪婪算法进行比较，可得到如表 1 所示的统计结果。图 5 则画出了在测量误差组合 2 的情况下，采用本文算法和贪婪算法得到的接收点布放图。

表 1 仿真结果统计

测量误差组合 1（布放 4 个接收点）		测量误差组合 2（布放 6 个接收点）		
	运算量	黑色区面积÷观测区面积	运算量	黑色区面积÷观测区面积
本文算法	耗时约 1 分钟，GDOP 的计算次数约为： 40*11289	86.9%	耗时约 1 分钟，GDOP 的计算次数约为： 40*11289	86.05%
贪婪算法	耗时约两天一夜，GDOP 的计算次数约为： 40128*11289	90.71%	耗时约两天两夜，GDOP 的计算次数约为： 60192*11289	87.76%
遍历法	GDOP 的计算次数约为： 4.0490e+016*11289		GDOP 的计算次数约为： 6.1070e+024*11289	



(a) 本文算法



(b) 贪婪算法

图5 接收点布放图（表1组合2）

从表 1 和图 5 可看出，在接收点个数一样的情况下，本文算法比贪婪算法的黑色区覆盖面积略小一点儿，但本文算法的运算量明显更小。而遍历法在网格间隔 50m 的情况下，运算量非常大，根本无法计算。因此，本文的算法非常有吸引力。

如果进一步将各接收点的测量数据按照（6）式进行数据融合，那么观测区域内的整体定位误差必定会更小。此处仍以上面的仿真条件为例，假设前面的误差门限为 T_{max} ，为比较定位性能，下面对门限进行细分，有 $T_1 < T_2 < \dots < T_{max}$ 。我们将分别统计位于不同门限区间的观测区面积占总观测区面积的比例，表 2 列出了本文算法和贪婪算法的统计结果。从表 2 可看出，数据融合后，观测区内的整体定位误差明显减小，本文算法与贪婪算法在定位均匀性方面难分伯仲。

所以，在实际工作中，可将 T_{max} 作为极限情况下的门限，然后利用本文算法计算接收点的布放位置。本文算法的定位性能与贪婪算法相比不相上下，但却能极大地减少运算时间，因此具有很强的实用性。

表 2 数据融合后误差分布统计结果

门限区间		$\leq T_1$	$(T_1, T_2]$	$(T_2, T_3]$	$(T_3, T_4]$	$(T_4, T_5]$	$(T_5, T_{max}]$	$> T_{max}$
测量误差组合 1	本文算法	24.92%	33.5%	21.08%	14.14%	3.3%	1.45%	1.61%
	贪婪算法	18.8%	37.26%	24.9%	12.73%	4.54%	0.89%	0.89%
测量误差组合 2	本文算法	19.29%	51.53	21.53%	5.76%	1.12%	0.67%	0.11%
	贪婪算法	22.89%	42.87%	24.41%	8.4%	1.09%	0.23%	0.11%

4 总结

警戒模式下，如何布放多个接收点才能实现观测区内定位性能均匀、定位误差小的目的？如果布阵算法选择不恰当，运算量将非常大。

通过分析双基地声纳的 GDOP 几何分布图可知，误差满足要求的区域为连续区域，而且图形边界具有圆弧形状。因此，根据该区域的图形特征，可找到图形的极值点，由此能确定两极值点间的距离，即“边长”长度。然后，利用正 n 边形的边、角关系，以及“边长”长度，容易得到一个正 n 边形。最终可由正 n 边形确定所需要的接收点个数和位置。

通过仿真分析可知，本文提出的算法在定位均匀性上与贪婪算法接近。但是，本文的算法运算量非常小，实时性强，更具有工程实现意义。

参 考 文 献

[1] Stefano Coraluppi. Multistatic Sonar Localization. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31(4): 964-974.

[2] 张小凤, 赵俊渭, 王荣庆等. 双基地声纳定位精度和算法研究. 系统仿真学报, 2003, 15(19): 1471-1473.

[3] Stefano Coraluppi, Craig Carthel, Mahendra Mallick. Hierarchical Multi-Hypothesis Tracking with Application to Multi-Scale Sensor Data. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2002, 4: 1609-1623.

[4] Odile Gerara, Stefano Coraluppi, Craig Carthel et al. Benchmark Analysis of NURC Multistatic Tracking Capability. The 9th International Conference on Information Fusion, 2006: 1-8.

[5] 张小凤, 赵俊渭, 王荣庆等. 双基地声纳散射声场的建模与仿真. 系统仿真学报, 2002, 14(5): 563-565.

[6] 徐贵英, 丁玮, 阎宜生等. 双基地声纳目标特性试验研究. 西北工业大学学报, 1997, 15(139): 476-481.

[7] 凌青, 杨丽, 蔡志明. 双/多基地主动声纳目标特性研究. 海军工程大学学报, 2006, 18(2): 47-51.

[8] 杨丽, 蔡志明. 混响背景下单、双基地声纳的探测范围比较. 系统仿真学报, 2006, 18(11): 3263-3266.

[9] 杨丽, 蔡志明. 双基地声纳探测范围分析. 兵工学报, 2007, 28(7): 839-843.

[10] 孙仲康, 周一宇, 何黎星. 单多基地有源无源定位技术. 北京: 国防工业出版社, 1996, 37.