



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110441779 B

(45) 授权公告日 2023.05.23

(21) 申请号 201910881761.5

(22) 申请日 2019.09.18

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 110441779 A

(43) 申请公布日 2019.11.12

(73) 专利权人 哈尔滨工程大学  
地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区南  
通大街145号

(72) 发明人 马雪飞

(74) 专利代理机构 哈尔滨市阳光惠远知识产权  
代理有限公司 23211  
专利代理师 刘景祥

(51) Int. Cl.  
G01S 15/87 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 109814110 A, 2019.05.28

CN 104718461 A, 2015.06.17

CN 104316903 A, 2015.01.28

GB 1605227 A, 1985.03.20

刘威.组网声纳目标跟踪技术.《中国优秀硕士学位论文全文数据库》.2018,  
杨新刚.无源定位技术在水下目标跟踪中的应用研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库》.2009,

审查员 白俊龙

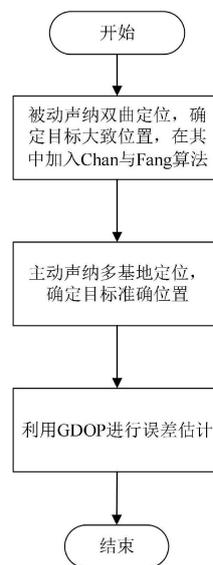
权利要求书2页 说明书8页 附图3页

(54) 发明名称

一种多声纳浮标分布式协同定位方法

(57) 摘要

本发明公开了一种多声纳浮标分布式协同定位方法,包括以下步骤:在待测海域上布设好声纳浮标阵;通过声纳的被动接受模式接受探测目标的声音信息,通过双曲定位算法确定探测目标的大概位置,确定探测目标的大致方位,并通过Chan算法或Fang算法,进一步提高探测目标的定位精度;在确定了探测目标的具体方位后,在安全区域选取三个声纳浮标构建成T/R-R<sup>2</sup>型多基地声纳系统模型,通过T/R-R<sup>2</sup>型多基地声纳系统模型向步骤二中测得的方位发射大功率声波照射探测目标,同时接受探测目标的回波,通过TOL定位算法得到探测目标的具体定位。本发明降低了系统通信量,采用不同的定位方式或两个定位结果相结合的方式,提高了系统的定位精度。



1. 一种多声纳浮标分布式协同定位方法,其特征在于,所述多声纳浮标分布式协同定位方法包括以下步骤:

步骤一:在待测海域上布设好声纳浮标阵;

步骤二:通过声纳的被动接受模式接受探测目标的声音信息,通过双曲定位算法确定探测目标的大概位置,确定探测目标的大致方位,并通过Chan算法或Fang算法,进一步提高探测目标的定位精度,其中,当测量误差服从理想高斯分布,采用Chan算法进一步进行优化;否则,采用Fang算法进一步进行优化;

步骤三:在确定了探测目标的大致方位后,在安全区域选取三个声纳浮标构建成T/R-R<sup>2</sup>型多基地声纳系统模型,通过T/R-R<sup>2</sup>型多基地声纳系统模型向步骤二中测得的方位发射大功率声波,照射探测目标,同时接受探测目标的回波,通过TOL定位算法得到探测目标的具体定位,

其中,T/R为发射站,R为接收站。

2. 根据权利要求1所述的一种多声纳浮标分布式协同定位方法,其特征在于,步骤二中的双曲定位算法,具体的,在大地坐标系下,设探测目标的坐标为(x,y,z),在探测到声波的声纳浮标中选取三个声纳浮标i、j、k构成等边三角形,三个声纳浮标的坐标分别为(x<sub>1</sub>,y<sub>1</sub>,z<sub>1</sub>)、(x<sub>2</sub>,y<sub>2</sub>,z<sub>2</sub>)、(x<sub>3</sub>,y<sub>3</sub>,z<sub>3</sub>),

由i、j两阵元测得的时延差τ<sub>ij</sub>,可以得到定位方程:

$$\tau_{ij} = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z-z_j)^2} \quad (1)$$

其中,τ<sub>ij</sub>=τ<sub>i</sub>-τ<sub>j</sub>,τ<sub>i</sub>为从目标到阵元i的传播时延,c为声速,目标位置即在由上式确定的双曲面上,将(1)式移项平方得:

$$\begin{aligned} & 2(x_j-x_i)x + 2(y_j-y_i)y + 2(z_j-z_i)z + (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) - (x_j^2 + y_j^2 + z_j^2) - c^2\tau_{ij}^2 \\ & = 2c\tau_{ij}\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z-z_j)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

令:x<sub>j</sub>-x<sub>i</sub>=Δx<sub>ji</sub>,y<sub>j</sub>-y<sub>i</sub>=Δy<sub>ji</sub>,z<sub>j</sub>-z<sub>i</sub>=Δz<sub>ji</sub>

i号浮标距原点距离R<sub>i</sub>=√(x<sub>i</sub><sup>2</sup>+y<sub>i</sub><sup>2</sup>+z<sub>i</sub><sup>2</sup>),j号浮标距原点距离R<sub>j</sub>=√(x<sub>j</sub><sup>2</sup>+y<sub>j</sub><sup>2</sup>+z<sub>j</sub><sup>2</sup>),目标距j

号浮标距离r<sub>j</sub>=√(x-x<sub>j</sub>)<sup>2</sup>+(y-y<sub>j</sub>)<sup>2</sup>+(z-z<sub>j</sub>)<sup>2</sup>,又令A= (R<sub>i</sub><sup>2</sup>-R<sub>j</sub><sup>2</sup>-c<sup>2</sup>τ<sub>ij</sub><sup>2</sup>)/2,则(2)式可化为:

$$\frac{1}{c\tau_{ij}}(\Delta x_{ji}x + \Delta y_{ji}y + \Delta z_{ji}z + A_{ij}) = r_j \quad (3)$$

由于各浮标深度相同,所以Δz<sub>ji</sub>=0,则(3)式又可化为:

$$\frac{1}{c\tau_{ij}}(\Delta x_{ji}x + \Delta y_{ji}y + A_{ij}) = r_j \quad (4)$$

同样,对于第j、k号浮标,有:

$$\frac{1}{c\tau_{jk}}(\Delta x_{kj}x + \Delta y_{kj}y + A_{jk}) = r_k \quad (5)$$

综合(3)、(4)、(5)式得到:

$$\begin{aligned} \left( \frac{\Delta x_{ji}}{c\tau_{ij}} - \frac{\Delta x_{kj}}{c\tau_{jk}} \right) x + \left( \frac{\Delta y_{ji}}{c\tau_{ij}} - \frac{\Delta y_{kj}}{c\tau_{jk}} \right) y + \left( \frac{A_{ij}}{c\tau_{ij}} - \frac{A_{jk}}{c\tau_{jk}} \right) z &= c\tau_{jk} \\ \left( \frac{\Delta x_{kj}}{c\tau_{jk}} - \frac{\Delta x_{ki}}{c\tau_{ki}} \right) x + \left( \frac{\Delta y_{kj}}{c\tau_{jk}} - \frac{\Delta y_{ki}}{c\tau_{ki}} \right) y + \left( \frac{A_{jk}}{c\tau_{jk}} - \frac{A_{ik}}{c\tau_{ik}} \right) z &= c\tau_{ik} \end{aligned} \quad (6)$$

将求得的  $(x, y)$  坐标代入其中两个阵元决定的定位方程中即可求得目标深度坐标  $z$ , 进而得到探测目标的方位坐标。

3. 根据权利要求1所述的一种多声纳浮标分布式协同定位方法, 其特征在于, 步骤三中, 具体的, 对于 T/R-R<sup>2</sup> 型多基地声纳系统模型,

其中, T/R 为发射站, 设 R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> 为接收站, S 为目标位置, S' 为目标的估计值,  $r_T$  为发射站到目标的距离,  $r_{R_1}$ ,  $r_{R_2}$  分别为探测目标至接收站 R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> 的距离, 在接收站根据回波到达时间所获得的值为  $r_T$  和  $r_{R_i}$  的距离和, 即  $r_{Ei} = r_T + r_{R_i}$ ,  $i = 1, 2$ , 在发射站可测得声源到目标的传输时间为:

$$f'_T = f_T + N(0, e_{f_T}) \quad (22)$$

声波从声源发射, 经目标反射后传输到接收机, 在接收站所测量的声波传输时间为:

$$\begin{aligned} f'_1 &= f_T + N(0, e_{f_1}) \\ f'_2 &= f_T + N(0, e_{f_2}) \end{aligned} \quad (23)$$

式中,  $f_T, f_1, f_2$  为声波的准确传输时间,  $f'_T, f'_1, f'_2$  为实验测量值, 则:

$$r_{R_2}' = f_2' \cdot v_c - r_T' \quad (24)$$

式中,  $r_T', r_{R_1}', r_{R_2}'$  分别为对  $r_T, r_{R_1}, r_{R_2}$  的估计, 则探测目标的测量位置, 为以 T/R 为圆心, 以  $r_T'$  为半径, 以 R<sub>1</sub> 为圆心,  $r_{R_1}'$  为半径和以 R<sub>2</sub> 为圆心, 以  $r_{R_2}'$  为半径所确定的三个圆交点的几何中心,

主动声纳利用多基地对目标进行精确定位, 计算误差利用 GDOP 算法:

$$GDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (25)$$

其中  $\sigma_x^2, \sigma_y^2$  分别为二维笛卡尔坐标系内的  $x$  向与  $y$  向的目标位置方差。

## 一种多声纳浮标分布式协同定位方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种多声纳浮标分布式协同定位方法,属于水声定位领域。

### 背景技术

[0002] 海洋是人类宝贵的资源,也是国防海军的战场,不管是出于充分开发和利用海洋资源的目的,还是出于更好的完成海上防御和攻击的目的,对目标进行更远距离的探测、定位都是有必要的。在水下,声波衰减较电磁慢,因此利用主动声纳和被动声纳进行探测及定位。

[0003] 面对复杂海洋环境下低信噪比目标定位问题,基于现有的单平台、单基阵水声目标定位技术,难以满足当前的需求。由于水声场是一种三维结构,使用在空间上分散布置的多个声基阵能够获取目标不同观测角度与传播路径的数据,有利于克服声场时空非均匀传播所导致的目标信噪比起伏问题,因此使用多平台、多基阵进行分布式探测、定位是一种发展趋势。

[0004] 依靠单一类型的单部声纳难以对潜艇目标进行连续的探测和有效打击,多声纳浮标协同探测成为了反潜研究的新方向。多浮标协同探测作为提高声纳武器探测能力的一种有效方案,可以提高其探测精度和抗干扰能力,提高目标探测性能,从而实现对关键区域和目标的有效探测。协同探测可以扩大探测节点的威力范围,合理地配置浮标并使其协同工作的性能优势是单部声纳浮标无法比拟的。通过共享各个浮标节点的潜艇目标状态信息,并对接收到的所有目标状态信息进行融合处理,从而提高了潜艇目标的检测概率和定位精度,对鱼雷精确制导将起到重要作用。

[0005] 主动声纳发射的声脉冲信号会使其自身暴露,为地方声纳的探测与攻击提供有效的信息,而对于水下作战的航行器来说,隐蔽性的好坏决定着防御能力的高低,所以主动声纳不是很好的选择。被动声纳相对于主动声纳,其最大的优点是隐蔽性好,可对水下作战的航行器进行有效的保护。被动声纳对目标的探测由于缺少距离信息而属于不完全探测,当多个目标或杂波存在时,更是无法通过单个声纳的观测信息及时的完成目标的定位任务,联合多个声纳的观测信息,可以及时并准确的完成目标定位的任务。因此,研究多基地的目标定位,具有十分重要的意义。

[0006] 综上,一种基于主被动声纳协同探测的方法被提出,该方法在对目标探测的过程中,首先利用被动声纳确定目标的大致方位;然后利用主动声纳,实现对目标的精确定位。

### 发明内容

[0007] 本发明提出了一种多声纳浮标分布式协同定位方法,其目的是为了解决水下目标探测隐蔽性及准确性的问题。

[0008] 本发明通过以下技术方案实现:一种多声纳浮标分布式协同定位方法,所述多声纳浮标分布式协同定位方法包括以下步骤:

[0009] 步骤一:在待测海域上布设好声纳浮标阵;

[0010] 步骤二:通过声纳的被动接受模式接受探测目标的声音信息,通过双曲定位算法确定探测目标的大概位置,确定探测目标的大致方位,并通过Chan算法或Fang算法,进一步提高探测目标的定位精度;

[0011] 步骤三:在确定了探测目标的具体方位后,在安全区域选取三个声纳浮标构建成T/R-R<sup>2</sup>型多基地声纳系统模型,通过T/R-R<sup>2</sup>型多基地声纳系统模型向步骤二中测得的方位发射大功率声波照射探测目标,同时接受探测目标的回波,通过TOL定位算法得到探测目标的具体定位。

[0012] 进一步的,步骤二中的双曲定位算法,步骤二中的双曲定位算法,在大地坐标系下,设探测目标的坐标为(x, y, z),在探测到声波的声纳浮标中选取三个声纳浮标i、j、k构成等边三角形,三个声纳浮标的坐标分别为(x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>, z<sub>1</sub>)、(x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>, z<sub>2</sub>)、(x<sub>3</sub>, y<sub>3</sub>, z<sub>3</sub>),

[0013] 由i, j两阵元测得的时延差τ<sub>ij</sub>,可以得到定位方程:

$$[0014] \quad \tau_{ij} = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z-z_j)^2} \quad (1)$$

[0015] 其中,τ<sub>ij</sub>=τ<sub>i</sub>-τ<sub>j</sub>,τ<sub>i</sub>为从目标到阵元i的传播时延,c为声速,目标位置即在由上式确定的双曲面上,将(1)式移项平方得:

$$[0016] \quad \begin{aligned} & 2(x_j-x_i)x + 2(y_j-y_i)y + 2(z_j-z_i)z + (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) - (x_j^2 + y_j^2 + z_j^2) - c^2\tau_{ij}^2 \\ & = 2c\tau_{ij}\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z-z_j)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

[0017] 令:x<sub>j</sub>-x<sub>i</sub>=Δx<sub>ji</sub>,y<sub>j</sub>-y<sub>i</sub>=Δy<sub>ji</sub>,z<sub>j</sub>-z<sub>i</sub>=Δz<sub>ji</sub>

[0018] i号浮标距原点距离R<sub>i</sub>=√(x<sub>i</sub><sup>2</sup>+y<sub>i</sub><sup>2</sup>+z<sub>i</sub><sup>2</sup>),j号浮标距原点距离R<sub>j</sub>=√(x<sub>j</sub><sup>2</sup>+y<sub>j</sub><sup>2</sup>+z<sub>j</sub><sup>2</sup>),目

标距j号浮标距离r<sub>j</sub>=√((x-x<sub>j</sub>)<sup>2</sup>+(y-y<sub>j</sub>)<sup>2</sup>+(z-z<sub>j</sub>)<sup>2</sup>),又令A=∑<sub>ij</sub><sup>2</sup><sup>2</sup><sup>2</sup><sub>2</sub>,则(2)式可化为:

$$[0019] \quad \frac{1}{c\tau_{ij}}(\Delta x_{ji}x + \Delta y_{ji}y + \Delta z_{ji}z + A_{ij}) = r_j \quad (3)$$

[0020] 由于各浮标深度相同,所以Δz<sub>ji</sub>=0,则(3)式又可化为:

$$[0021] \quad \frac{1}{c\tau_{ij}}(\Delta x_{ji}x + \Delta y_{ji}y + A_{ij}) = r_j \quad (4)$$

[0022] 同样,对于第j、k号浮标,有:

$$[0023] \quad \frac{1}{c\tau_{jk}}(\Delta x_{kj}x + \Delta y_{kj}y + A_{jk}) = r_k \quad (5)$$

[0024] 综合(3)、(4)、(5)式得到:

$$\begin{aligned}
 [0025] \quad & \left( \frac{\Delta x_{ji}}{c\tau_{ij}} - \frac{\Delta x_{kj}}{c\tau_{jk}} \right) x + \left( \frac{\Delta y_{ji}}{c\tau_{ij}} - \frac{\Delta y_{kj}}{c\tau_{jk}} \right) y + \left( \frac{A_{ij}}{c\tau_{ij}} - \frac{A_{jk}}{c\tau_{jk}} \right) z = c\tau_{jk} \\
 & \left( \frac{\Delta x_{kj}}{c\tau_{jk}} - \frac{\Delta x_{jk}}{c\tau_{ki}} \right) x + \left( \frac{\Delta y_{kj}}{c\tau_{jk}} - \frac{\Delta y_{jk}}{c\tau_{jk}} \right) y + \left( \frac{A_{jk}}{c\tau_{jk}} - \frac{A_{ik}}{c\tau_{ik}} \right) z = c\tau_{ik}
 \end{aligned} \tag{6}$$

[0026] 将求得的(x,y)坐标代入其中两个阵元决定的定位方程中即可求得目标深度坐标z,进而得到探测目标的方位坐标。

[0027] 进一步的,步骤二中,信噪比较高时,采用Chan算法进一步进行优化;否则,采用Fang算法进一步进行优化。

[0028] 进一步的,步骤三中的TOL定位算法,具体的,对于T/R-R<sup>2</sup>型多基地声纳系统模型,

[0029] 其中,T/R为发射站,设R1,R2为接收站,S为目标位置,S'为目标的估计值,r<sub>T</sub>为发射站到目标的距离,r<sub>R1</sub>,r<sub>R2</sub>分别为探测目标至接收站R1,R2的距离,在接收站根据回波到达时间所获得的值为r<sub>T</sub>和r<sub>Ri</sub>的距离和,即r<sub>Ei</sub>=r<sub>T</sub>+r<sub>Ri</sub>,i=1,2,在发射站可测得声源到目标的传输时间为:

$$[0030] \quad f'_T = f_T + N(0, e_{f_T}) \tag{22}$$

[0031] 声波从声源发射,经目标反射后传输到接收机,在接收站所测量的声波传输时间为:

$$\begin{aligned}
 [0032] \quad & f'_1 = f_T + N(0, e_{f_1}) \\
 & f'_2 = f_T + N(0, e_{f_2})
 \end{aligned} \tag{23}$$

[0033] 式中,f<sub>T</sub>,f<sub>1</sub>,f<sub>2</sub>为声波的准确传输时间,f'<sub>T</sub>,f'<sub>1</sub>,f'<sub>2</sub>为实验测量值,则:

$$[0034] \quad r'_{R2} = f'_2 \cdot v_c - r'_T \tag{24}$$

[0035] 式中,r'<sub>T</sub>,r'<sub>R1</sub>,r'<sub>R2</sub>分别为对r<sub>T</sub>,r<sub>R1</sub>,r<sub>R2</sub>的估计,则探测目标的测量位置,为以T/R为圆心,以r'<sub>T</sub>为半径,以R1为圆心,以r'<sub>R1</sub>为半径和以R2为圆心,以r'<sub>R2</sub>为半径所确定的三个圆交点的几何中心。

[0036] 本发明的有益效果在于:本发明提出的一种多声纳浮标分布式协同定位方法,分布式协同定位处理中心只接收各局部站点处理后的结果或数据,使得数据传送量得到了减少,降低了系统通信量。此外,处理中心只需处理各局部站点处理后的结果或数据,在实际协同定位系统中可降低系统硬件预算。声纳浮标采用主被动协同探测的工作方式,大幅度提高了系统的隐蔽性和抗干扰能力。双曲定位中采用Chan与Fang相结合的定位方式,Chan算法在测量误差服从理想高斯分布时,定位精度高;Fang算法原理简单,计算复杂度低。不同的外界条件下,采用不同的定位方式或两个定位结果相结合的方式,可以提高系统的定位精度。

## 附图说明

[0037] 图1为本发明提出的一种多声纳浮标分布式协同定位方法的方法流程图;

[0038] 图2为分布式协同探测基本架构;

[0039] 图3为双水听器测时延差示意图;

- [0040] 图4为Chan算法原理图；  
[0041] 图5为声纳浮标与目标方位示意图；  
[0042] 图6为Fang算法的浮标几何分布图；  
[0043] 图7为三基地TOL算法定位原理。

### 具体实施方式

[0044] 下面将结合本发明实施例中的附图对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0045] 参照图7所示,一种多声纳浮标分布式协同定位方法,所述多声纳浮标分布式协同定位方法包括以下步骤:

[0046] 步骤一:在待测海域上布设好声纳浮标阵;

[0047] 步骤二:通过声纳的被动接受模式接受探测目标的声音信息,通过双曲定位算法确定探测目标的大概位置,确定探测目标的大致方位,并通过Chan算法或Fang算法,进一步提高探测目标的定位精度;

[0048] 步骤三:在确定了探测目标的具体方位后,在安全区域选取三个声纳浮标构建成T/R-R<sup>2</sup>型多基地声纳系统模型,通过T/R-R<sup>2</sup>型多基地声纳系统模型向步骤二中测得的方位发射大功率声波照射探测目标,同时接受探测目标的回波,通过TOL定位算法得到探测目标的具体定位。

[0049] 具体的,协同定位系统是在传统的单站“独立工作”系统和多站“简单组网”系统的基础上诞生的一种新型系统。通过对分布式节点所获取的数据和信息进行关联、处理,是分布式协同定位的技术途径。

[0050] 分布式协同定位算法是将各站点(即声纳浮标)得到的原始观测数据先在本地作出一定的判决处理,如各站点可以独立完成从接受声波到转化为电信号,亦或者进一步转化为数字信号,各站点只需将局部判决后的信息传送至处理中心,不再需要将所有原始数据都传送至处理中心,处理中心只需在局部判决的基础上作出最终判决,以此加快了处理速度。

[0051] 本发明中采用的声纳浮标,为具有主动定位和被动定位两种状态的声纳浮标。当进行被动定位时,各个声纳浮标对接收的目标信号进行处理,采用双曲定位的方式得到目标的位置坐标,最后将其送至数据融合中心,结算出目标的大致位置。主动定位时,一个声纳浮标发射信号,其他的声纳浮标接收目标反射的信号。与被动工作方式类似,首先在自己的声纳浮标上计算目标的位置,最后将各个位置信息送至数据融合中心,结算出目标的最终方位。分布式协同定位系统基本架构参照图1所示。声纳浮标阵相邻的两排均交错设置,以方便多个声纳浮标形成等边三角形,对所在海域进行被动探测。T/R-R<sup>2</sup>型多基地声纳系统模型,由三个声纳浮标构建而成,其中一个声纳浮标作为发射站,另两个声纳浮标作为接收站。

[0052] 利用目标辐射噪声到每两个声纳浮标的时延差对其进行定位。由于距离不同,目标信号到达各个水听器的时间不同,对接收的信号进行互相关求解,即可得到时延差,由数

学关系可知,如果目标到达两个点的距离一定时,那么他位于以这两个点为焦点的双曲线上,因此,只需要三个独立的声纳浮标(下文以三个为例),就可以对目标进行定位。在定位中加入求解目标位置的Chan与Fang算法,可达提高定位精度。

[0053] 采用T/R-R<sup>2</sup>型多基地声纳系统模型,即应用一部单基地声纳作为发射站,该站可以布设在比较安全的地区,发射大功率声波照射目标,同时可以接收目标回波。其他两部接收机布设在距离目标较近的地带,被动的接收目标的回波,从而更有效的实现对目标的检测。发射站和接收站分别测量目标的距离信息。这样,可以获得利用距离信息实现多基地水下定位的TOL算法。

[0054] 在本部分优选实施例,步骤二中,声纳浮标的被动定位,其原理从本质上讲属于双曲定位,被动定位时声纳浮标的形式一般为三元阵,即一起进行被动定位的三个声纳浮标呈等边三角形设置。声纳浮标阵是利用测量目标辐射噪声到每两个浮标的时延差对其进行双曲定位的。如图2所示,S为声源,声速为c,测得A、B两水听器接收信号的时延差 $\tau_{AB}$ ,则它一定位于以水听器A、B两点为焦点,满足条件SA-SB=c $\tau_{AB}$ 的双曲面上。

[0055] 这样,只需三组相互独立的双水听器(即被动声纳),就可以确定声源的位置,即声源一定在三个双曲面的交点上。这种方法可以得到目标的三维坐标并达到很高的定位精度,而无需矢量方位数据。

[0056] 在大地坐标系下,设目标4的坐标为(x,y,z),在探测到声波的声纳浮标中选取三个声纳浮标构成等边三角形,三个声纳浮标的坐标分别为(x<sub>1</sub>,y<sub>1</sub>,z<sub>1</sub>)、(x<sub>2</sub>,y<sub>2</sub>,z<sub>2</sub>)、(x<sub>3</sub>,y<sub>3</sub>,z<sub>3</sub>),如图3所示,

[0057] 由i,j两阵元测得的时延差 $\tau_{ij}$ ,可以得到定位方程:

$$[0058] \quad \tau_{ij} = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z-z_j)^2} \quad (1)$$

[0059] 其中: $\tau_{ij} = \tau_i - \tau_j$ , $\tau_i$ 为从目标到阵元i的传播时延,c为声速,目标位置即在由上式确定的双曲面上,

$$[0060] \quad \begin{cases} \left( \frac{\Delta x_{ji}}{c\tau_{ij}} - \frac{\Delta x_{kj}}{c\tau_{jk}} \right) x + \left( \frac{\Delta y_{ji}}{c\tau_{ij}} - \frac{\Delta y_{kj}}{c\tau_{jk}} \right) y + \left( \frac{A_{ij}}{c\tau_{ij}} - \frac{A_{jk}}{c\tau_{jk}} \right) z = c\tau_{jk} \\ \left( \frac{\Delta x_{kj}}{c\tau_{jk}} - \frac{\Delta x_{ki}}{c\tau_{ki}} \right) x + \left( \frac{\Delta y_{kj}}{c\tau_{jk}} - \frac{\Delta y_{ki}}{c\tau_{ki}} \right) y + \left( \frac{A_{jk}}{c\tau_{jk}} - \frac{A_{ik}}{c\tau_{ik}} \right) z = c\tau_{ik} \end{cases} \quad (2)$$

[0061] 将求得的(x,y)坐标代入其中两个阵元决定的定位方程中即可求得目标深度坐标z,进而得到探测目标的方位坐标。

[0062] 在本部分优选实施例中,当测量误差服从理想高斯分布,可采用Chan算法进一步进行优化;否则,采用Fang算法进一步进行优化。

[0063] 具体的,Chan算法,非递归双曲线方程组解法,具有解析表达式解,主要特点是测量误差服从理想高斯分布。当信噪比较高时,测量误差近似服从高斯分布,在这一前提下,提出使用一种使用两步最大似然估计来计算目标位置的方法。

[0064] Chan算法原理图参照图4所示,BS1等节点的坐标已知,为(x<sub>1</sub>,y<sub>1</sub>)、(x<sub>2</sub>,y<sub>2</sub>)、(x<sub>3</sub>,y<sub>3</sub>),假设第i个节点的位置为(x<sub>i</sub>,y<sub>i</sub>),目标的位置为(x,y),此时BS1为固定站,因此距离差都是以BS1为基准的。

[0065] 根据几何关系,我们定义如下的表达式

$$[0066] \quad r_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (3)$$

$$[0067] \quad r_{i,1} = r_i - r_1 = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (4)$$

[0068] 根据式(3)有如下关系

$$[0069] \quad r_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 = K_i - 2x_i x - 2y_i y + x^2 + y^2 \quad (5)$$

$$[0070] \quad K_i = x_i^2 + y_i^2 \quad (6)$$

[0071] 根据式(4)有如下关系

$$[0072] \quad r_i^2 = (r_{i,1} + r_1)^2 \quad (7)$$

[0073] 整理上述公式可得

$$\begin{aligned} r_{i,1}^2 + 2r_{i,1}r_1 + r_1^2 &= K_i - 2x_i x - 2y_i y + x^2 + y^2 \Rightarrow \\ r_{i,1}^2 + 2r_{i,1}r_1 + (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 &= K_i - 2x_i x - 2y_i y + x^2 + y^2 \Rightarrow \\ [0074] \quad r_{i,1}^2 + 2r_{i,1}r_1 &= K_i - 2x_i x - 2y_i y + 2x_1 x + 2y_1 y^2 - (x_1^2 + y_1^2) = r_i^2 - r_1^2 \Rightarrow \\ r_{i,1}^2 + 2r_{i,1}r_1 &= K_i - K_1 - 2(x_i - x_1)x - 2(y_i - y_1)y \Rightarrow \\ r_{i,1}^2 + 2r_{i,1}r_1 &= (K_i - K_1) - 2x_{i,1}x - 2y_{i,1}y, x_{i,1} = x_i - x_1 \end{aligned} \quad (8)$$

[0075] 式(7)是关键一步,消除了未知数的平方项,仅保留了一次项,得到一系列的线性方程组。

[0076] 当 $i=2, 3$ 时,有如下表达式

$$[0077] \quad \begin{cases} r_{2,1}^2 + 2r_{2,1}r_1 = (K_2 - K_1) - 2x_{2,1}x - 2y_{2,1}y \\ r_{3,1}^2 + 2r_{3,1}r_1 = (K_3 - K_1) - 2x_{3,1}x - 2y_{3,1}y \end{cases} \quad (9)$$

[0078] 分析上式,首先要明确 $r_{i,1}, K_i, x_{i,1}$ 已知,未知项有 $r_1, x, y$ ,首先假设 $r_1$ 是已知的,则可以移项化简:

$$[0079] \quad \begin{cases} 2x_{2,1}x + 2y_{2,1}y = (K_2 - K_1) - (r_{2,1}^2 + 2r_{2,1}r_1) \\ 2x_{3,1}x + 2y_{3,1}y = (K_3 - K_1) - (r_{3,1}^2 + 2r_{3,1}r_1) \end{cases} \quad (10)$$

[0080] 再简记为

$$[0081] \quad \begin{cases} x_{2,1}x + y_{2,1}y = C_1/2 \\ x_{3,1}x + y_{3,1}y = C_2/2 \end{cases} \quad (11)$$

[0082] 在这里可以视为 $\begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1/2 \\ C_2/2 \end{bmatrix}$ ,即 $Ax=C$ ,可以利用矩阵的逆 $x=A^{-1}C$ ,也可以

利用如下的行列式

$$[0083] \quad \begin{cases} x = \frac{y_{3,1}C_1 - y_{2,1}C_2}{2(x_{2,1}y_{3,1} - x_{3,1}y_{2,1})} \\ y = \frac{x_{2,1}C_2 - x_{3,1}C_1}{2(x_{2,1}y_{3,1} - x_{3,1}y_{2,1})} \end{cases} \quad (12)$$

[0084] 其中,  $x = \frac{|D_1|}{|D|}$ ,  $D_1 = \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} \\ b_2 & a_{22} \end{vmatrix}$ ,  $C_1 = (K_2 - K_1) - (r_{2,1}^2 + 2r_{2,1}r_1)$ 。将 $C_1, C_2$ 代入式(12)可得

$$[0085] \begin{cases} x = \frac{y_{2,1}r_{3,1}^2 - y_{3,1}r_{2,1}^2 + y_{3,1}(K_2 - K_1) - y_{2,1}(K_3 - K_1) + 2(y_{2,1}r_{3,1} - y_{3,1}r_{2,1})r_1}{2(x_{2,1}y_{3,1} - x_{3,1}y_{2,1})} \\ y = \frac{x_{3,1}r_{2,1}^2 - x_{2,1}r_{3,1}^2 + x_{2,1}(K_3 - K_1) - x_{3,1}(K_2 - K_1) + 2(x_{3,1}r_{2,1} - x_{2,1}r_{3,1})r_1}{2(x_{2,1}y_{3,1} - x_{3,1}y_{2,1})} \end{cases} \quad (13)$$

[0086] 对于式(13)进一步处理得

$$[0087] \begin{cases} x = \frac{y_{2,1}r_{3,1}^2 - y_{3,1}r_{2,1}^2 + y_{3,1}(K_2 - K_1) - y_{2,1}(K_3 - K_1) + 2(y_{2,1}r_{3,1} - y_{3,1}r_{2,1})r_1}{2(x_{2,1}y_{3,1} - x_{3,1}y_{2,1})} \\ y = \frac{x_{2,1}r_{3,1}^2 - x_{3,1}r_{2,1}^2 + x_{3,1}(K_2 - K_1) - x_{2,1}(K_3 - K_1) + 2(x_{2,1}r_{3,1} - x_{3,1}r_{2,1})r_1}{2(x_{3,1}y_{2,1} - x_{2,1}y_{3,1})} \end{cases} \quad (14)$$

[0088] 其中,我们令

$$[0089] \begin{aligned} p_1 &= \frac{y_{2,1}r_{3,1}^2 - y_{3,1}r_{2,1}^2 + y_{3,1}(K_2 - K_1) - y_{2,1}(K_3 - K_1)}{2(x_{2,1}y_{3,1} - x_{3,1}y_{2,1})} \\ q_1 \cdot r_1 &= \frac{2(y_{2,1}r_{3,1} - y_{3,1}r_{2,1})r_1}{2(x_{2,1}y_{3,1} - x_{3,1}y_{2,1})} \Rightarrow q_1 = \frac{y_{2,1}r_{3,1} - y_{3,1}r_{2,1}}{x_{2,1}y_{3,1} - x_{3,1}y_{2,1}} \\ p_2 &= \frac{x_{2,1}r_{3,1}^2 - x_{3,1}r_{2,1}^2 + x_{3,1}(K_2 - K_1) - x_{2,1}(K_3 - K_1)}{2(x_{3,1}y_{2,1} - x_{2,1}y_{3,1})} \\ q_2 \cdot r_1 &= \frac{2(x_{2,1}r_{3,1} - x_{3,1}r_{2,1})r_1}{2(x_{2,1}y_{3,1} - x_{3,1}y_{2,1})} \Rightarrow q_2 = \frac{x_{2,1}r_{3,1} - x_{3,1}r_{2,1}}{x_{3,1}y_{2,1} - x_{2,1}y_{3,1}} \end{aligned} \quad (15)$$

[0090] 利用式(15)我们就可以将式(14)表示为如下非常简洁的形式

$$[0091] \begin{cases} x = p_1 + q_1 r_1 \\ y = p_2 + q_2 r_1 \end{cases} \quad (16)$$

[0092] 其中,只有 $r_1$ 是未知的。由式(16)可知,首先要求出 $r_1$ 。

$$[0093] r_1 = K_1 - 2x_1x - 2y_1y + x^2 + y^2 \quad (17)$$

[0094] 可得

$$[0095] \begin{aligned} &(q_1^2 + q_2^2 - 1) \cdot r_1^2 - 2[q_1(x_1 - p_1) + q_2(y_1 - p_2)] \cdot r_1 + [(x_1 - p_1)^2 + (y_1 - p_2)^2] = 0 \\ &\Rightarrow a \cdot r_1^2 + b \cdot r_1 + c = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

[0096] 上式是 $r_1$ 的一元二次方程,求解可得 $r_1$ 的两个根,可以根据先验信息舍掉一个没用的根。

[0097] Fang算法可以应用于有三个定点对目标进行定位的水声系统。声纳浮标分布如图5所示,假设目标的活动范围是OABC。

[0098] 为了简化算法的表达方式,首先将3个声纳浮标置于上图中的坐标系统:第一个声纳浮标的位置为(0,0),第二个和第三个声纳浮标的坐标位置分别为 $(x_2, 0)$ 和 $(x_3, y_3)$ 。那么求解目标到声纳浮标距离的方程可以简化成如下式子:

$$[0099] r_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (19)$$

[0100] 则有:

$$\begin{aligned}
 & -2r_{2,1}r_1 = r_{2,1}^2 - x_2^2 + 2x_2x \\
 [0101] \quad & -2r_{3,1}r_1 = r_{3,1}^2 - (x_3^2 + y_3^2) + 2x_3x + 2y_3y
 \end{aligned} \tag{20}$$

[0102] 将上面两个式子相减得：

$$[0103] \quad d \times x^2 + e \times x + f = 0 \tag{21}$$

[0104] 通过上式就可以求解移动目标x坐标,会出现模糊的情况可以用Chan中的方法来判断,然后代入上式中可以求出移动目标y坐标。Fang算法和其他算法比较最突出的优点是计算量小而且简单,所以在使用此算法的时候首先需要将各个已知的坐标化简成固定的形式,然后进行解算。

[0105] 在本部分优选实施例中,具体的,多基地定位中,发射机将与单基地工作方式一样,向空间辐射声能。在这种情况下,可以把目标看成是被动工作方式的声源。测向可以通过测量回波的反射方向来进行。而测距则是利用声纳收发设备之间存在的几何关系,通过解算声纳定位方程,解得目标到接收机的距离。作为仅以被动方式工作的接收机,其位置是不易被目标发现的。因而,多基地声纳可以同时完成主动声纳和被动声纳的各项功能。正因为如此,采用多基地声纳的水下监视系统,其反潜作战能力将会获得大幅度地提高。

[0106] 对于T/R-R<sup>2</sup>型多基地声纳系统模型,TOL方法的定位原理参照图6所示,

[0107] 其中,T/R为发射站,设R<sub>1</sub>,R<sub>2</sub>为接收站,S为目标位置,S'为目标的估计值,r<sub>T</sub>为发射站到目标的距离,r<sub>R<sub>1</sub></sub>,r<sub>R<sub>2</sub></sub>分别为探测目标至接收站R<sub>1</sub>,R<sub>2</sub>的距离,在接收站根据回波到达时间所获得的值为r<sub>T</sub>和r<sub>R<sub>i</sub></sub>的距离和,即r<sub>E<sub>i</sub></sub>=r<sub>T</sub>+r<sub>R<sub>i</sub></sub>,i=1,2,在发射站可测得声源到目标的传输时间为:

$$[0108] \quad f'_T = f_T + N(0, e_{f_T}) \tag{22}$$

[0109] 声波从声源发射,经目标反射后传输到接收机,在接收站所测量的声波传输时间为:

$$\begin{aligned}
 & f'_1 = f_T + N(0, e_{f_1}) \\
 [0110] \quad & f'_2 = f_T + N(0, e_{f_2})
 \end{aligned} \tag{23}$$

[0111] 式中,f<sub>T</sub>,f<sub>1</sub>,f<sub>2</sub>为声波的准确传输时间,f'<sub>T</sub>,f'<sub>1</sub>,f'<sub>2</sub>为实验测量值,则:

$$[0112] \quad r'_{R_2} = f'_2 \cdot v_c - r'_T \tag{24}$$

[0113] 式中,r'<sub>T</sub>,r'<sub>R<sub>1</sub></sub>,r'<sub>R<sub>2</sub></sub>分别为对r<sub>T</sub>,r<sub>R<sub>1</sub></sub>,r<sub>R<sub>2</sub></sub>的估计,则探测目标的测量位置,为以T/R为圆心,以r'<sub>T</sub>为半径,以R<sub>1</sub>为圆心,以r'<sub>R<sub>1</sub></sub>为半径和以R<sub>2</sub>为圆心,以r'<sub>R<sub>2</sub></sub>为半径所确定的三个圆交点的几何中心。

[0114] 主动声纳利用多基地对目标进行精确定位,计算误差利用GDOP算法。

$$[0115] \quad GDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \tag{25}$$

[0116] 其中σ<sub>x</sub><sup>2</sup>,σ<sub>y</sub><sup>2</sup>分别为二维笛卡尔坐标系内的x向与y向的目标位置方差。

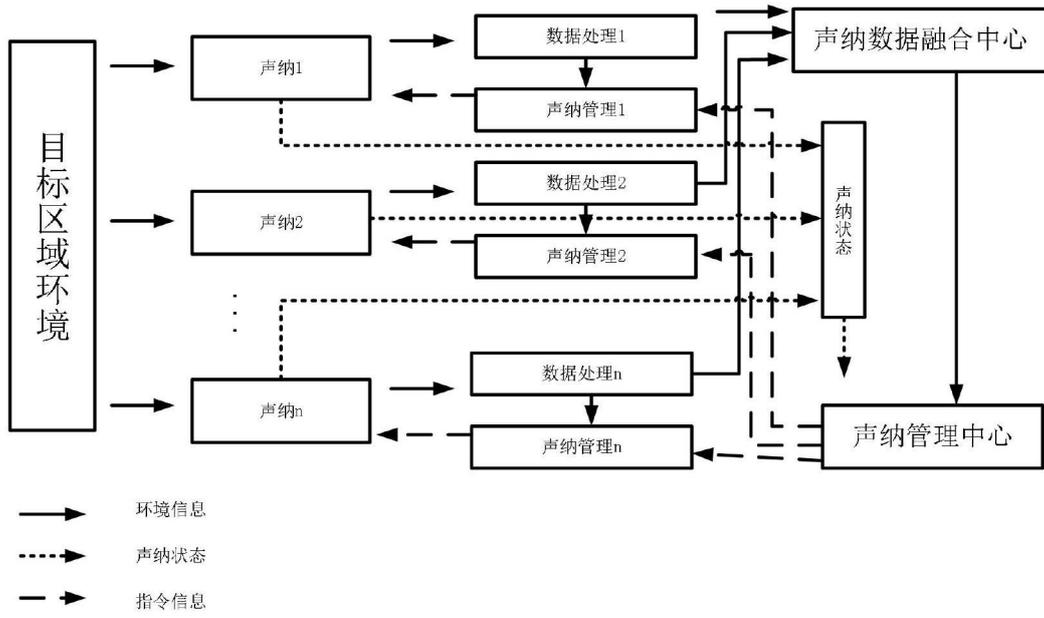


图1

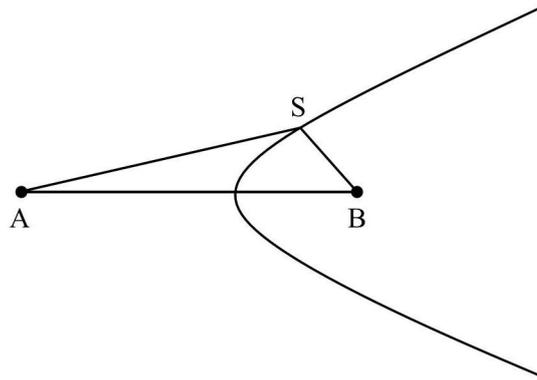


图2

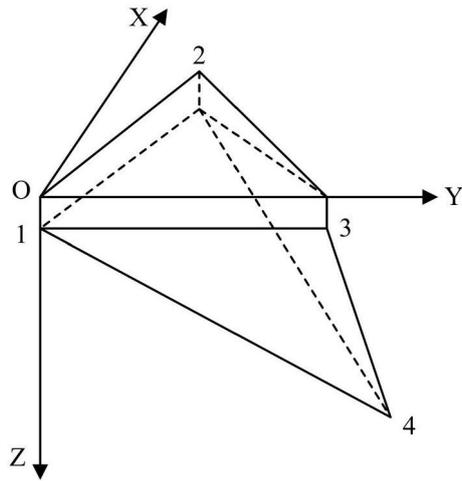


图3

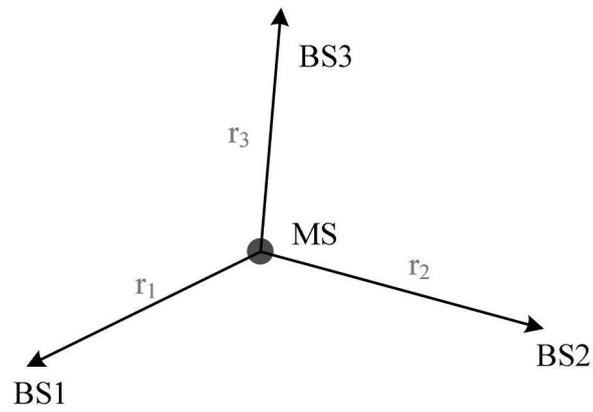


图4

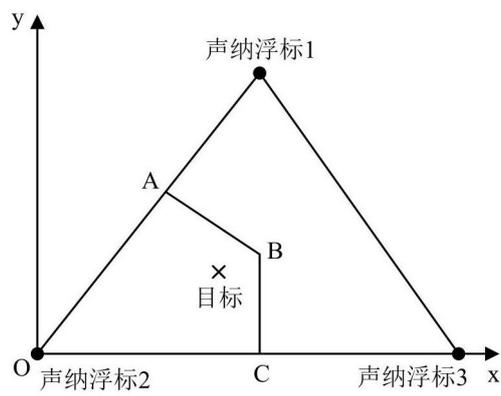


图5

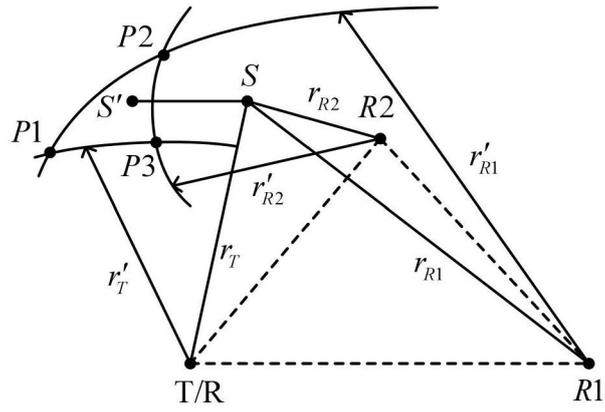


图6

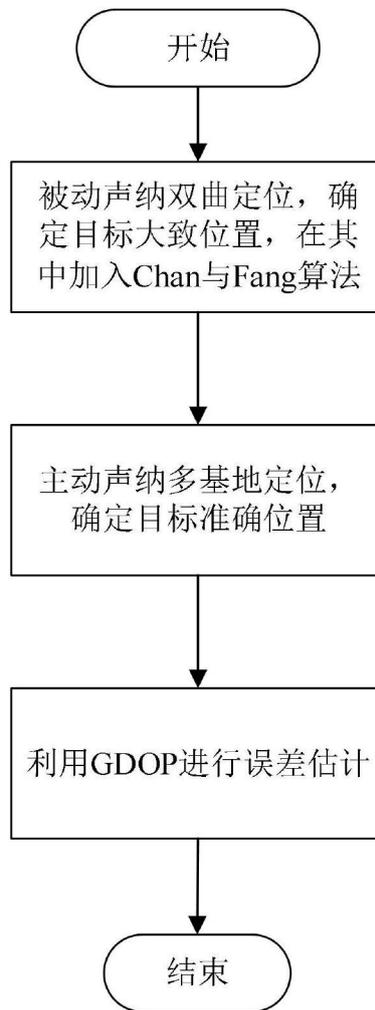


图7