



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111323752 B

(45) 授权公告日 2022. 10. 14

(21) 申请号 202010219550.8

(22) 申请日 2020.03.25

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 111323752 A

(43) 申请公布日 2020.06.23

(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号哈尔滨工程大学科技处知识产权办公室

(72) 发明人 李秀坤 王集 于歌 董建维

(51) Int. Cl.  
G01S 5/18 (2006.01)

(56) 对比文件  
DE 10130297 A1, 2003.01.23  
CN 102722177 A, 2012.10.10  
CN 109765523 A, 2019.05.17  
US 2016325808 A1, 2016.11.10  
CN 109001679 A, 2018.12.14  
CN 110858488 A, 2020.03.03  
CN 106597378 A, 2017.04.26

付金山. 基于声矢量阵小样本数据的DOA估计研究.《传感器与微系统》.2013,

刘义海. 基于信息融合的水中目标属性识别关键技术研究.《中国博士学位论文全文数据库(工程科技II辑)》.2017,

林旺生. 基于矢量声场的水下被动探测与定位技术研究.《中国博士学位论文全文数据库(工程科技II辑)》.2014,

Wang Ji-he 等. Survey of autonomous safety operation and control for distributed satellite system.《Journal of Harbin Institute of Technology》.2009,

吴小俊. 声发射技术在焊接裂纹检测中的应用研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库(工程科技I辑)》.2009,

Kim, Seonhong 等. Neural network-based adaptive control for a supercavitating vehicle in transition phase.《JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY》.2015,

审查员 林宇豪

权利要求书1页 说明书5页 附图1页

## (54) 发明名称

远近场过渡区间声源定位方法

## (57) 摘要

本发明提供一种远近场过渡区间声源定位方法,解决声源处于远场和近场过渡距离上的高精度定位问题。本文首先分析了声源处于过渡距离上声源定位误差大的原因,然后针对空间中每个点都仿真产生阵列接收信号,计算接收信号的相关矩阵作为输入数据,将对应点的坐标作为标签,构建数据集。利用残差神经网络学习从相关矩阵到坐标的非线性映射关系,从而可以将神经网络作为处于过渡区间的声源位置估计器,最终实现介于远场和近场之间过渡区间的声源高精度定位。



1. 远近场过渡区间声源定位方法,其特征在于:步骤如下:

步骤1:以线阵所在直线为x轴,建立直角坐标系;

步骤2:划分远场、近场和过渡带区间范围;

若  $r < \frac{L^2}{\lambda}$  成立,则声源处于近场,使用近场模型估计声源位置;若  $r > 3\frac{L^2}{\lambda}$  则声源处于远

场,使用远场模型计算声源方向;若  $\frac{L^2}{\lambda} < r < 3\frac{L^2}{\lambda}$ ,则说明此时声源处于远场和近场的过渡

区间之内;其中,L为阵列长度, $\lambda$ 为声波波长,r为声源与阵列中心距离;

步骤3:当声源处于过渡带区间时,确定空间扫描范围;以0.001的长度为步进,划分区间,将目标区域划分成多个点,记录每个点的坐标;

y的范围是  $\frac{L^2}{\lambda} < y < 3\frac{L^2}{\lambda}$ ,x的范围是  $-10L < x < 10L$ ;

步骤4:对每一个点,通过仿真产生一个阵列接收信号,计算接收信号的相关矩阵,该点的坐标作为标签,形成数据集;

步骤5:当声源处于过渡带区间时,使用神经网络学习此时的声场模型,利用神经网络的非线性关系拟合过渡区的声场模型;将相关矩阵作为残差神经网络的输入,每个矩阵对应的坐标作为数据的标签,通过最小化位置估计误差,利用神经网络学习相关矩阵到位置估计的非线性映射关系;然后训练此神经网络的权重,直至收敛;

步骤6:测量得到实验数据后,计算阵列接收信号的相关矩阵,将相关矩阵输入神经网络,网络的输出即为声源的位置;

步骤7:声源位置估计完成,结束。

## 远近场过渡区间声源定位方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种声源定位技术,尤其涉及一种远近场过渡区间声源定位方法,属于水声阵列信号处理领域。

### 背景技术

[0002] 水下声波是目前已知唯一能够在海洋中进行远距离传播的手段,因而水声领域通常借助声波完成目标探测、识别、成像、远场定向和近场定位等功能。为了实现目标的定位、定向等功能,或者为了提高信噪比,水声领域常常使用多个传感器,组成接收阵列。当存在多个传感器接收声信号时,根据传感器接收处声线的特征,现有的技术通常将阵列信号处理分为两种:当目标与接收阵距离远大于阵列孔径时,认为声波按照平面波规律传播;当目标与接收阵距离较近时,认为声波按照球面波的规律传播。前者允许利用阵列接收信号估计目标所在方向,后者允许利用阵列接收信号估计目标位置。目前两种情况都存在成熟的解决方法。

[0003] 声波从一点向四周传播,在不考虑声源指向性的情况下,波阵面呈球面向四周扩散。当接收阵列距离声源相当远时,声波到达每个阵元的幅度差和入射角的差异很小,甚至可以忽略不计,这时将声波看作平面波,声波到阵列中每个阵元的入射角相等。这种情况被称为“远场模型”。在远场模型中,接收阵列接收到的声信号已经不包含距离信息,被广泛研究的是声波波达方向估计。常见的波达方向估计包括波束形成方法和直接空间谱估计方法。波束形成方法一般通过对每个阵元添加一定的时延或者相移,然后进行加权叠加作为输出波束。添加的时延和相移则实现了阵列的电子旋转,将阵列能量最大的方向指向某个方向,即加强一个方向上入射信号的能量,抑制其他方向上入射信号的能量。这种方法得到的结果被称作波束。计算指向不同方向上波束的能量,即可得到空间谱。当阵列电子旋转的角度与平面波入射方向重合时,波束能量达到最大值,此时空间谱也达到最大值。因而,寻找空间谱的峰值即可得到入射信号的入射方向。直接空间谱估计方法跳过了计算波束这个步骤,直接计算接收信号的空间谱。在信号入射的方向上,空间谱取得最大值。这两种方式虽然不同,但二者使用的基本假设时相同的:即,假设入射信号为平面波,对每个阵元来说,入射信号的入射角度均相同。在此假设下,直线阵接收信号数据模型为:

$$[0004] \quad x_i(t) = s(t - \tau_i)$$

$$[0005] \quad \tau_i = D_i \sin(\theta_0) / c$$

[0006] 其中, $s(t)$ 为入射信号, $x_i(t)$ 为第*i*个通道的接收信号, $\tau_i$ 为第*i*个阵元相对于参考阵元接收信号的时延, $c$ 为水中声速,当水中盐度、温度、深度等参数相同时,该数值为常数, $\theta_0$ 为目标所在方向, $D_i$ 为第*i*个阵元相对于参考阵元的距离。

[0007] 当声源距离与阵列长度数值相差不大时,球面波扩展规律变得明显,每个阵元入射声波的入射角度都不相同,此时称为“近场模型”。在近场模型中,若继续使用平面波入射模型对其进行近似,则将带来较大误差。所以,此时的阵列接收信号模型应当按照球面波扩展规律建立。早期的近场源定位方法常采用近场聚焦波束形成,根据几何关系精确计算各

阵元与参考阵元之间的时延,采用各阵元接收信号同相叠加增益最大、反相叠加互相抵消的原理,对近场声源进行定位。这种方法实现简单,具有较高鲁棒性。与远场测向算法相比,近场定位理论起步较晚。经过十余年的发展,大量优秀的算法和研究成果涌现出来,但基本原理都是假设声波按照球面波扩展的规律传播,因而按照球面波传播规律计算信号之间的相对时延或者相移是这种方法的本质特征。在球面波传播模型下,直线阵接收信号模型表示为

$$[0008] \quad x_i(t) = \frac{1}{r_i} s(t - \tau_i)$$

$$[0009] \quad \tau_i = \frac{r_i}{c}$$

$$[0010] \quad r_i = \sqrt{(p_x - p_x)^2 + p_y^2}$$

[0011] 其中, $s(t)$ 为入射信号, $x_i(t)$ 为第*i*个通道的接收信号, $\tau_i$ 为第*i*个阵元相对于参考阵元接收信号的时延, $c$ 为水中声速,当水中盐度、温度、深度等参数相同时,该数值为常数。 $r$ 为声源与第*i*个接收传感器的距离, $(p_x, p_y)$ 为声源坐标, $(p_x, 0)$ 为第*i*个接收传感器的坐标。此处,为简化表达式,以直线阵为*x*轴。

## 发明内容

[0012] 本发明的目的是为了提供一种远近场过渡区间声源定位方法。

[0013] 本发明的目的是这样实现的:步骤如下:

[0014] 步骤1:以线阵所在直线为*x*轴,建立直角坐标系;

[0015] 步骤2:划分远场、近场和过渡区间范围;

[0016] 步骤3:当声源处于过渡带区间时,确定空间扫描范围;以0.001的长度为步进,划分区间,将目标区域划分成多个点,记录每个点的坐标;

[0017] 步骤4:对每一个点,通过仿真产生一个阵列接收信号,计算接收信号的相关矩阵,该点的坐标作为标签,形成数据集;

[0018] 步骤5:当声源处于过渡区间时,使用神经网络学习此时的声场模型,利用神经网络的非线性关系拟合过渡区的声场模型;将相关矩阵作为残差神经网络的输入,每个矩阵对应的坐标作为数据的标签,通过最小化位置估计误差,利用神经网络学习相关矩阵到位置估计的非线性映射关系;然后训练此神经网络的权重,直至收敛;

[0019] 步骤6:测量得到实验数据后,计算阵列接收信号的相关矩阵,将相关矩阵输入神经网络,网络的输出即为声源的位置;

[0020] 步骤7:声源位置估计完成,结束。

[0021] 本发明还包括这样一些结构特征:

[0022] 1. 步骤2具体为:若  $r < \frac{L^2}{\lambda}$  成立,则声源处于近场,使用近场模型估计声源位置;若

$r > 3\frac{L^2}{\lambda}$  则声源处于远场,使用远场模型计算声源方向;若  $\frac{L^2}{\lambda} < r < 3\frac{L^2}{\lambda}$ , 则说明此时声源处

于远场和近场的过渡区间之内;其中, $L$ 为阵列长度, $\lambda$ 为声波波长, $r$ 为声源与阵列中心距

离。

[0023] 2.步骤3具体为:y的范围是 $\frac{L^2}{\lambda} < y < 3\frac{L^2}{\lambda}$ ,x的范围是 $-10L < x < 10L$ 。

[0024] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:本发明解决了现有的技术通常假设声源与接收阵距离很远,把接收信号当成远场模型处理,估计目标方位,或者假设声源与接收阵距离较近,把接收信号当成近场模型处理,估计目标位置,然而,当目标与接收阵距离处于远近场临界处时,远场模型和近场模型都将产生较大误差的问题。本发明使用神经网络的非线性特点拟合声源处于远场和近场的过渡区间时的声场模型。可以计算目标处于远场和近场的过渡区间时目标的位置,该过渡区间的定义为 $\frac{L^2}{\lambda} < r < 3\frac{L^2}{\lambda}$ ,其中,L为阵列长度, $\lambda$ 为声波波长,r为声源与阵列中心距离。本发明可以完成声源位置处于远场和近场间过渡区间内声源的定位功能。

### 附图说明

[0025] 图1展示了本发明的执行流程图。

[0026] 图2展示了远场近场和过渡区间声程差计算示意图。

### 具体实施方式

[0027] 下面结合附图与具体实施方式对本发明作进一步详细描述。

[0028] 通常而言,接收信号符合远场模型还是近场模型,通常需要根据下式进行判断。

$$[0029] \quad \begin{cases} a\frac{L^2}{\lambda} > r, \text{远场模型} \\ a\frac{L^2}{\lambda} < r, \text{近场模型} \end{cases}$$

[0030] 其中,L为接收阵的长度, $\lambda$ 为声波波长,r为目标中心与接收阵中心的距离。a为倍数因子,一般需要根据经验在1~3范围内取值。

[0031] 由于a的取值不确定,所以当目标与阵列中心距离r满足式4时,远场模型和近场模型都将不再满足,导致的结果是在式4所示区间内,定位和定向都将导致较大误差,为了讨论方便,不妨将下式所示区间称作过渡区间。

$$[0032] \quad \frac{L^2}{\lambda} < r < 3\frac{L^2}{\lambda}$$

[0033] 在过渡区间内,接收信号仍然按照平面波规律传播。但是,若将其当做球面波传播,则球面波的曲率较小,导致需要极高的灵敏度才能实现目标的准确定位;若将其当做平面波传播,则与各个阵元入射声波角度不同相矛盾。球面波还是平面波的传播规律,决定着相邻阵元的声程差计算方式。而定位的精确与否,主要取决于声程差计算是否准确。

[0034] 本发明假设,当声源处于过渡区时,不妨假设声波传播规律介于球面波和平面波之间。在这种前提下,选择新的声程差计算方式,以提高过渡带定位和定向的精度。下面结合附图2说明这种假设及过渡带定位、定向的方法。

[0035] 在图2中,声源信号为S,第i个阵元位置为 $X_i$ ,第i+1个阵元所在位置为 $X_{i+1}$ 。声波由

S发出,经过介质的传播、衰减,到达各个阵元。当S距离阵列较远时,声波可以近似为平面波入射而不会引入较大误差。此时线段 $SX_i$ 和 $SX_{i+1}$ 近似为平行线,此时相邻阵元的声程差求法为:从点 $X_{i+1}$ 出发,向 $SX_i$ 作垂线,垂足为T2。线段 $X_iT2$ 的长度即为第i个阵元和第i+1个阵元的声程差。当S距离阵列较近时,声波按照球面波规律扩展。此时,计算相邻阵元声程差的方式为:以声源S为中心,以线段 $SX_{i+1}$ 为半径作圆弧,与线段 $SX_i$ 交于点T1。线段 $X_iT1$ 的长度即为第i个阵元和第i+1个阵元的声程差。这两种声程差的计算方式严格遵循平面波和球面波扩展规律,在过渡区时,只有很高的精度才能得到较为精确的声程差估计,进而得到合理的目标方向、位置估计。但是,由于实际阵列存在安装误差、噪声等因素,导致在过渡区内声程差估计存在较大误差,进而使得估计结果存在较大误差。

[0036] 在图2中的声程差计算方式中,近场模型采用T1点计算声程差,远场模型采用T2点计算声程差。在过渡带中,两种计算方式都将带来较大误差。为解决过渡带目标方向和位置高精度估计问题,本发明假设过渡带内声程差应当由图2中的T点计算,声程差为线段 $X_iT$ 的长度。对于每个阵元和空间中每个位置,T的位置都可能是不同的。下面给出T点的选择方法。

[0037] 将过渡区间采用极坐标的方式进行网格划分,记录每个网格的坐标为。在每个网格上都产生一个阵列接收信号。记录网格的坐标,并且计算计算接收信号的相关矩阵。该相关矩阵保留了接收信号的导向矢量信息,该导向矢量主要由阵元之间的相对时延决定,即该导向矢量描述了中每个阵元接收处T点位置。由于声源信号处在过渡区间,所以T点存在于T1点和T2点中间的位置。如果此时能够将接收信号的导向矢量记录下来,则可以记录此时T点的位置,从而可以实现更高精度的目标方向和位置估计。所以,以接收信号的相关矩阵作为输入数据,以该数据对应的网格坐标为标签,利用残差神经网络对数据进行学习,通过最小化方向和位置估计误差,使得神经网络通过学习自动地选择数据点T的选择方式,从而估计了导向矢量的数值解。该导向矢量数值解的模型介于远场模型和近场模型之间,因而更加适合处理过渡区间内声源位置估计问题。使用残差神经网络是因为残差神经网络为深度神经网络的一种,深度神经网络可以精确地学习非线性映射关系。此时,残差神经网络可以看作一个位置估计器,可以估计过渡区间内声源的位置。

[0038] 本发明的具体步骤如下:

[0039] 步骤1:以线阵所在直线为x轴,建立直角坐标系。

[0040] 步骤2:划分远场、近场和过渡带范围。若 $r < \frac{L^2}{\lambda}$ 成立,则声源处于近场,应当使用近场模型估计声源位置;若 $r > 3\frac{L^2}{\lambda}$ 则声源处于远场,应当使用远场模型计算声源方向;若

$\frac{L^2}{\lambda} < r < 3\frac{L^2}{\lambda}$ ,则说明此时声源处于远场和近场的过渡区间之内。其中,L为阵列长度, $\lambda$ 为声波波长,r为声源与阵列中心距离。

[0041] 步骤3:当声源处于过渡带区间时,确定空间扫描范围,其中,y的范围是

$\frac{L^2}{\lambda} < y < 3\frac{L^2}{\lambda}$ ,x的范围是 $-10L < x < 10L$ 。以0.001的长度为步进,对矩形区间进行划分,将目标区域划分成多个点,记录每个点的坐标。

[0042] 步骤4:对每一个点,都仿真产生一个阵列接收信号,计算接收信号的相关矩阵,该点的坐标作为标签,形成数据集。

[0043] 步骤5:当声源处于过渡区间时,使用远场平面波或者近场球面波扩展规律,都将引入较大误差。此时可以使用神经网络学习此时的声场模型,利用神经网络的非线性关系拟合过渡区的声场模型。所以,将相关矩阵作为残差神经网络的输入,每个矩阵对应的坐标作为数据的标签,通过最小化位置估计误差,利用神经网络学习相关矩阵到位置估计的非线性映射关系。然后训练此神经网络的权重,直至收敛。此时神经网络训练完成,可以用于估计处于远场和近场过渡区间内的声源位置。

[0044] 步骤6:测量得到实验数据后,计算阵列接收信号的相关矩阵,将相关矩阵输入神经网络,网络的输出即为声源的位置。

[0045] 步骤7:声源位置估计完成,结束。

[0046] 综上,本发明提出了一种远近场过渡区间声源定位方法,解决声源处于远场和近场过渡距离上的高精度定位问题。本文首先分析了声源处于过渡距离上声源定位误差大的原因,然后针对空间中每个点都仿真产生阵列接收信号,计算接收信号的相关矩阵作为输入数据,将对应点的坐标作为标签,构建数据集。利用残差神经网络学习从相关矩阵到坐标的非线性映射关系,从而可以将神经网络作为处于过渡区间的声源位置估计器,最终实现介于远场和近场之间过渡区间的声源高精度定位。

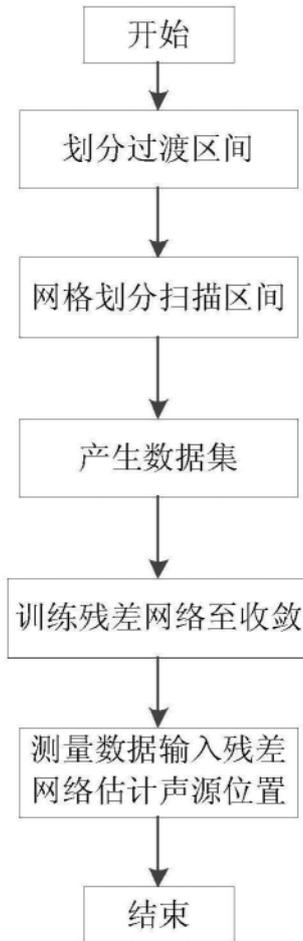


图1

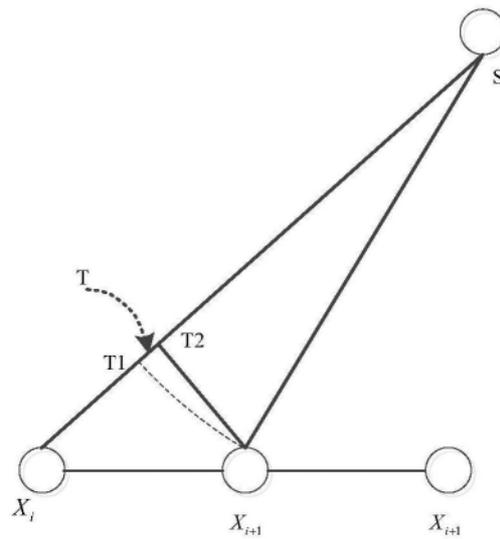


图2