



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115242583 B

(45) 授权公告日 2023.05.26

(21) 申请号 202210891314.X

H04B 13/02 (2006.01)

(22) 申请日 2022.07.27

H04B 11/00 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 115242583 A

(56) 对比文件

CN 113011006 A, 2021.06.22

CN 112098983 A, 2020.12.18

(43) 申请公布日 2022.10.25

审查员 马苗苗

(73) 专利权人 中国科学院声学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路21号

(72) 发明人 刘昌鹏 周士弘 戚聿波 张雪冬
张地 杨习山

(74) 专利代理机构 北京方安思达知识产权代理有限公司 11472

专利代理师 武玥 刘振

(51) Int. Cl.

H04L 25/02 (2006.01)

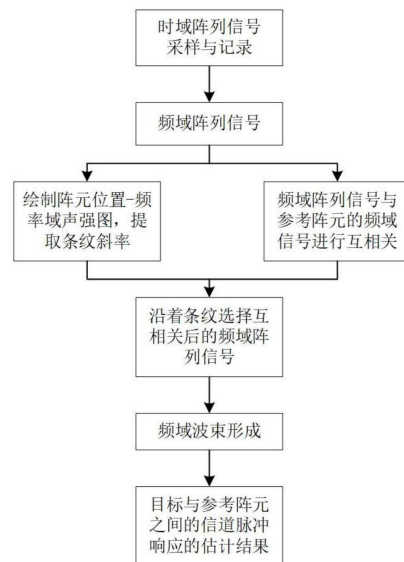
权利要求书2页 说明书7页 附图5页

(54) 发明名称

一种基于水平线列阵的信道脉冲响应被动估计方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于水平线列阵的信道脉冲响应被动估计方法,该方法首先对水平阵列接收到的声压信号进行Fourier变换,得到频域声压信号,对频域声压信号进行处理获得阵元位置-频率域的声强干涉条纹,并提取条纹斜率。然后,提取参考阵元的声压信号的相位,将提取结果依次与其它各阵元接收的声压信号进行互相关。最后,对互相关后的阵列数据,在频域沿着条纹进行波束形成,波束输出即为声源与参考阵元的信道脉冲响应的估计结果。本发明方法可被用于宽带脉冲信号和目标辐射噪声信号,而且通过沿条纹的相干处理,本发明方法可在较短时间内获得信道脉冲响应的有效估计结果,并相比盲解卷积方法能够在低信噪比下获得更高的信道脉冲响应估计精度。



1. 一种基于水平线列阵的信道脉冲响应被动估计方法,该方法包括:

利用水平线列阵获取声源时域声压信号,对时域声压信号进行傅里叶变换得到频域声压信号;

对频域声压信号进行处理获得声强干涉条纹,并提取条纹斜率;

选取参考阵元并提取参考阵元的声压信号的相位,将提取的相位依次与水平线列阵的各阵元接收的频域声压信号进行互相关;

对互相关后得到的频域数据,根据提取的干涉条纹斜率信息,对频域沿着条纹进行波束形成得到波束输出,根据波束输出得到声源与参考阵元的信道脉冲响应的估计结果;

所述利用水平线列阵获取声源时域声压信号,包括:

利用水平线列阵的各阵元接收声源目标辐射的噪声信号或宽带脉冲信号,并进行采样记录得到水平阵接收的时域声压信号;

所述选取参考阵元并提取参考阵元的声压信号的相位,将提取的相位依次与其它各阵元接收的声压信号进行互相关,包括:

选择第 x 个阵元作为参考阵元, $x=1,2,\dots,N$, N 为阵元总数;

提取第 x 个阵元接收的频域信号的相位 $\phi_x = \text{phase}(P_x)$;

将第 x 个阵元频域信号的相位 ϕ_x 与 N 个阵元接收的频域信号做互相关,得到互相关后的频域数据 R ,表达式为:

$$R = [R_n]_{N \times 1}$$

$$R_n = \phi_x^* P_n$$

其中, n 为阵元编号, $n=1,2,\dots,N$, $[\cdot]_{N \times 1}$ 表示阵列为 $N \times 1$, x 为选取的参考阵元的编号, R_n 表示将第 x 个阵元频域信号的相位 ϕ_x 与第 n 个阵元接收的频域信号 P_n 做互相关后的频域数据,*表示共轭操作;

所述对频域沿着条纹进行波束形成得到波束输出 $b(\hat{\theta})$,表达式为:

$$b(\hat{\theta}) = \mathbf{w}^H \tilde{\mathbf{R}}$$

其中, $\tilde{\mathbf{R}}$ 为对互相关后的频域数据 R 沿着条纹选择的阵列数据, $\tilde{\mathbf{R}} = [\tilde{R}_n]_{N \times 1}$, \tilde{R}_n 为第 n 个阵元的阵列数据, $[\cdot]_{N \times 1}$ 表示阵列为 $N \times 1$, N 为阵元总数, $\hat{\theta}$ 为波束扫描的方位角, \mathbf{w} 为构造的波束形成的权系数, H 表示共轭转置;

所述构造的波束形成的权系数 \mathbf{w} ,表达式为:

$$\mathbf{w} = [w_n]_{N \times 1}$$

$$w_n = \frac{1}{N} e^{j\omega(n) \frac{D(n) \sin \hat{\theta}}{c_{\text{ref}}}}$$

其中, w_n 为构造的对应第 n 个阵元的波束形成的权系数, j 为虚数单位, e 为自然常数, $\omega(n)$ 为干涉条纹所对应信号的角频率, $D(n)$ 为第 n 个阵元与参考阵元的间距, c_{ref} 为选取的参考声速;

所述声源与参考阵元的信道脉冲响应的估计结果,通过波束输出的强度最大值来获得,包括:目标声源与参考阵元之间的信道脉冲响应频域信号 G 和目标声源与参考阵元之间

的信道脉冲响应时域信号 g ;

G 的表达式为:

$$G = b(\theta_s)$$

其中, $b(\theta_s)$ 满足 $|b(\theta_s)| = \max_{\hat{\theta}} |b(\hat{\theta})|$, θ_s 为波束输出的强度最大值对应的波束扫描的方位角, $b(\hat{\theta})$ 为对阵列数据进行波束形成得到的波束输出, $\hat{\theta}$ 为波束扫描的方位角;

g 通过对 G 进行 Fourier 反变换得到。

2. 根据权利要求1所述的基于水平线列阵的信道脉冲响应被动估计方法, 其特征在于, 所述对频域声压信号进行处理获得声强干涉条纹, 并提取条纹斜率, 包括:

对频域声压信号进行处理得到声强数据;

对声强数据进行处理获得在阵元位置-频率域上的强度分布谱图, 并利用图像处理方法提取强度分布谱图中干涉条纹的斜率。

3. 根据权利要求2所述的基于水平线列阵的信道脉冲响应被动估计方法, 其特征在于, 所述得到的声强数据 I , 表达式为:

$$I = [I_n]_{N \times 1}$$

$$I_n = |P_n|^2$$

其中, $[\cdot]_{N \times 1}$ 表示阵列为 $N \times 1$, N 为阵元总数, n 为阵元编号, $n = 1, 2, \dots, N$, I_n 表示第 n 个阵元的声强数据, P_n 表示第 n 个阵元的频域信号。

4. 根据权利要求2所述的基于水平线列阵的信道脉冲响应被动估计方法, 其特征在于, 所述图像处理方法为霍夫变换或拉东变换。

一种基于水平线列阵的信道脉冲响应被动估计方法

技术领域

[0001] 本发明属于水声阵列信号处理、水声信道脉冲响应估计、水声探测和声纳技术领域,具体地说,涉及一种基于水平线列阵的信道脉冲响应被动估计方法。

背景技术

[0002] 根据信号与系统理论,水声信号的频谱在数学上可表示为声源频谱与信道脉冲响应函数频谱(也被称为格林函数)的乘积。信道脉冲响应包含了信道的频散和多途等特征,可被应用于水声环境参数反演、声源定位等问题。提取水声信号中的信道脉冲响应可进一步实现与声源频谱的解耦,去除信道的影响并恢复声源信号,这可被应用于水声通信和水下目标识别等领域。

[0003] 一般来说,可以使用人为制造的一些宽带脉冲声源来获得特定水声信道的脉冲响应,如声弹、气枪等。但是,这种获取方式往往要求声源和接收装置是合作性的,因而常用于水声调查实验或主动声纳应用的场景。基于特定声源的信道脉冲响应估计方法,一方面会增加信道脉冲响应估计的人力和物力成本;另一方面也会在环境信息未知、非合作的场景下应用受限,例如当监测环境中只存在像航船这样的机会声源,我们可利用的信号只有声源辐射的随机噪声信号。因此,发展可以通过航船噪声或其它海洋环境噪声来进行信道脉冲响应被动估计的方法将更加具有实际意义和经济效益。

[0004] 通过对两个接收器获得的海洋环境噪声进行互相关叠加可以得到接收器之间的信道脉冲响应估计(又叫经验格林函数),但这一方法需要长时间的累积才能获得收敛的结果,使用双垂直阵并结合使用常规波束形成技术可以加速这一收敛过程。但是在浅海中,垂直阵容易受到渔网破坏,其长时间布放的不确定性较大,相比之下使用水平阵的安全性更好。而且对水声目标探测来说,更加有利的是获得目标与接收器之间的信道脉冲响应。基于水平阵的盲解卷积技术可以用于估计接收位置与目标间的信道脉冲响应,并可用于航船噪声的处理,但其估计精度非常依赖于阵元接收信号的信噪比,只有在较高的信噪比条件下才能获得较高精度的估计结果。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于针对上述技术背景,为解决现有方法的不足,本发明提出一种基于水平线列阵的信道脉冲响应被动估计方法。该方法首先对水平阵列接收到的声压信号进行Fourier变换,获得阵元位置-频率域的声强干涉条纹,并提取条纹斜率。然后,提取参考阵元的声压信号的相位,将提取结果依次与其它各阵元接收的声压信号进行互相关。最后,对互相关后的阵列数据,在频域沿着条纹进行波束形成,波束输出即为声源与参考阵元的信道脉冲响应的估计结果。通过沿条纹的相干处理,本发明方法可相比盲解卷积方法在更低的信噪比下获得更高的信道脉冲响应估计精度。

[0006] 本发明提出了一种基于水平线列阵的信道脉冲响应被动估计方法,该方法包括:

[0007] 利用水平线列阵获取声源时域声压信号,对时域声压信号进行傅里叶(Fourier)

变换得到频域声压信号；

[0008] 对频域声压信号进行处理获得声强干涉条纹，并提取条纹斜率；

[0009] 选取参考阵元并提取参考阵元的声压信号的相位，将提取的相位依次与水平线列阵的各阵元接收的频域声压信号进行互相关；

[0010] 对互相关后得到的频域数据，根据提取的干涉条纹斜率信息，在频域沿着条纹进行波束形成得到阵列数据；

[0011] 对阵列数据进行波束形成得到波束输出，根据波束输出得到声源与参考阵元的信道脉冲响应的估计结果。

[0012] 作为上述技术方案的改进之一，所述利用水平线列阵获取声源时域声压信号，包括：

[0013] 利用水平线列阵的各阵元接收声源目标辐射的噪声信号或宽带脉冲信号，并进行采样记录得到水平阵接收的时域声压信号。

[0014] 作为上述技术方案的改进之一，所述对频域声压信号进行处理获得声强干涉条纹，并提取条纹斜率，包括：

[0015] 对频域声压信号进行处理得到声强数据；

[0016] 对声强数据进行处理获得在阵元位置-频率域上的强度分布谱图，并利用图像处理方法提取强度分布谱图中干涉条纹的斜率。

[0017] 作为上述技术方案的改进之一，所述得到的声强数据I，表达式为：

$$[0018] \quad I = [I_n]_{N \times 1}$$

$$[0019] \quad I_n = |P_n|^2$$

[0020] 其中， $[\cdot]_{N \times 1}$ 表示阵列为 $N \times 1$ ，N为阵元总数，n为阵元编号， $n=1, 2, \dots, N$ ， I_n 表示第n个阵元的声强数据， P_n 表示第n个阵元的频域信号。

[0021] 作为上述技术方案的改进之一，所述图像处理方法为霍夫变换(Hough变换)或拉东变换(Radon变换)。

[0022] 作为上述技术方案的改进之一，所述选取参考阵元并提取参考阵元的声压信号的相位，将提取的相位依次与其它各阵元接收的声压信号进行互相关，包括：

[0023] 选择第x个阵元作为参考阵元， $x=1, 2, \dots, N$ ，N为阵元总数；

[0024] 提取第x个阵元接收的频域信号的相位 $\phi_x = \text{phase}(P_x)$ ；

[0025] 将第x个阵元频域信号的相位 ϕ_x 与N个阵元接收的频域信号做互相关，得到互相关后的频域数据R，表达式为：

$$[0026] \quad R = [R_n]_{N \times 1}$$

$$[0027] \quad R_n = \phi_x^* P_n$$

[0028] 其中，n为阵元编号， $n=1, 2, \dots, N$ ， $[\cdot]_{N \times 1}$ 表示阵列为 $N \times 1$ ，x为选取的参考阵元的编号， R_n 表示将第x个阵元频域信号的相位 ϕ_x 与第n个阵元接收的频域信号 P_n 做互相关后的频域数据，*表示共轭操作。

[0029] 作为上述技术方案的改进之一，所述对阵列数据进行波束形成得到波束输出 $b(\hat{\theta})$ ，表达式为：

[0030] $b(\hat{\theta}) = \mathbf{w}^H \tilde{\mathbf{R}}$

[0031] 其中, $\tilde{\mathbf{R}}$ 为阵列数据, $\tilde{\mathbf{R}} = [\tilde{\mathbf{R}}_n]_{N \times 1}$, $\tilde{\mathbf{R}}_n$ 为第 n 个阵元的阵列数据, $[\cdot]_{N \times 1}$ 表示阵列为 $N \times 1$, N 为阵元总数, $\hat{\theta}$ 为波束扫描的方位角, \mathbf{w} 为构造的波束形成的权系数, H 表示共轭转置。

[0032] 作为上述技术方案的改进之一, 所述构造的波束形成的权系数 \mathbf{w} , 表达式为:

[0033] $\mathbf{w} = [w_n]_{N \times 1}$

[0034] $w_n = \frac{1}{N} \mathbf{e}^{j\omega(n) \frac{D(n) \sin \hat{\theta}}{c_{\text{ref}}}}$

[0035] 其中, w_n 为构造的对应第 n 个阵元的波束形成的权系数, j 为虚数单位, \mathbf{e} 为自然常数, $\omega(n)$ 为干涉条纹所对应信号的角频率, $D(n)$ 为第 n 个阵元与参考阵元的间距, c_{ref} 为选取的参考声速。

[0036] 作为上述技术方案的改进之一, 所述声源与参考阵元的信道脉冲响应的估计结果, 通过波束输出的强度最大值来获得, 包括: 目标声源与参考阵元之间的信道脉冲响应频域信号 G 和目标声源与参考阵元之间的信道脉冲响应时域信号 g ;

[0037] G 的表达式为:

[0038] $G = b(\theta_s)$

[0039] 其中, $b(\theta_s)$ 满足 $|b(\theta_s)| = \max_{\hat{\theta}} |b(\hat{\theta})|$, θ_s 为波束输出的强度最大值对应的波束扫描的方位角, $b(\hat{\theta})$ 为对阵列数据进行波束形成得到的波束输出, $\hat{\theta}$ 为波束扫描的方位角;

[0040] g 通过对 G 进行 Fourier (傅里叶) 反变换得到。

[0041] 本发明与现有技术相比优点在于:

[0042] 1、本发明的方法基于水平阵进行信道脉冲响应被动估计:

[0043] 与现有技术中使用垂直阵的方法相比更加适合在浅海长久布放;

[0044] 与基于两个接收器的方法相比, 基于水平阵的方法可以使用波束形成技术来加快信道脉冲响应估计结果的收敛速度, 降低对信号累积时间长度的依赖;

[0045] 利用阵列信号处理带来的增益, 也可以提高对接收信号信噪比的宽容度, 增加方法对不同信噪比信号的适用性;

[0046] 2、本发明方法利用参考阵元信号与阵列中各阵元信号之间的互相关来去除声源频谱的影响, 可以使本发明方法不仅适用于脉冲信号, 也适用于随机噪声信号;

[0047] 3、现有技术中的基于水平阵的水声信号盲解卷积方法, 其幅度因子是通过相同频率的阵列信号之间的非相干叠加获得, 信道脉冲响应是从单阵元接收信号中引入;

[0048] 本发明方法沿着干涉条纹选出进行波束形成的互相关数据, 这一处理方式使得本发明方法可以更好地保持信号之间的相关性和幅度一致性;

[0049] 本发明方法的信道脉冲响应是经过沿条纹的阵列信号处理得到, 这能够更加有效利用阵增益, 更好地抑制背景噪声对估计结果的影响;

[0050] 以上特性使得本发明方法相比基于水平阵的水声信号盲解卷积方法可以在更低的信噪比下获得更好的信道脉冲响应估计精度。

附图说明

[0051] 图1是本发明方法一种基于水平线列阵的信道脉冲响应被动估计方法的流程图；

[0052] 图2是本发明方法在针对水声目标辐射噪声的实施例中参考阵元采集和记录的声压信号时域波形；

[0053] 图3是本发明方法在针对水声目标辐射噪声的实施例中由接收信号获得的阵元位置-频率域声强干涉条纹及条纹斜率提取结果；

[0054] 图4是本发明方法在针对水声目标辐射噪声的实施例中不同波束扫描角度和信号频率的波束输出强度；

[0055] 图5是本发明方法在针对水声目标辐射噪声的实施例中的信道脉冲响应估计结果与真实信道脉冲响应的时域波形对比；

[0056] 图6是本发明方法在针对水声目标发射的宽带调频脉冲信号的实施例中参考阵元采集和记录的声压信号时域波形；

[0057] 图7是本发明方法在针对水声目标发射的宽带调频脉冲信号的实施例中由接收信号获得的阵元位置-频率域声强干涉条纹及条纹斜率提取结果；

[0058] 图8是本发明方法在针对水声目标发射的宽带调频脉冲信号的实施例中不同波束扫描角度和信号频率的波束输出强度；

[0059] 图9是本发明方法在针对水声目标发射的宽带调频脉冲信号的实施例中的信道脉冲响应估计结果与真实信道脉冲响应的时域波形对比；

[0060] 图10是本发明方法与现有基于水平阵的盲解卷积方法通过不同信噪比条件下接收的目标辐射噪声信号对信道脉冲响应进行估计的精度对比。

具体实施方式

[0061] 本发明提出一种基于水平线列阵的信道脉冲响应被动估计方法。该方法首先对水平阵列接收到的声压信号进行Fourier变换,获得阵元位置-频率域的声强干涉条纹,并提取条纹斜率。然后,提取参考阵元的声压信号的相位,将提取结果依次与其它各阵元接收的声压信号进行互相关。最后,对互相关后的阵列数据,在频域沿着条纹进行波束形成,波束输出即为声源与参考阵元的信道脉冲响应的估计结果。本发明方法可被用于宽带脉冲信号和目标辐射噪声信号,而且通过沿条纹的相干处理,本发明方法可在较短时间内获得信道脉冲响应的有效估计结果,并相比盲解卷积方法能够在低信噪比下获得更高的信道脉冲响应估计精度。

[0062] 本方法提供了一种基于水平线列阵的信道脉冲响应被动估计方法,该方法包括如下步骤:

[0063] 步骤1:对布置于海水或者海底的水平阵的各阵元接收到的水声目标辐射的噪声信号或宽带脉冲信号进行采样记录,得到水平阵接收的时域声压信号 $p = [p_n]_{N \times 1}$,其中N表示阵元总数且N为大于1的整数,n为阵元编号,n满足 $n = 1, 2, \dots, N$ 。

[0064] 然后,对记录的时域声压信号p进行Fourier变换,得到其对应的频域信号 $P = [P_n]_{N \times 1}$ 。进一步,得到声强数据 $I = [I_n]_{N \times 1}$,其中 $I_n = |P_n|^2$ 。

[0065] 对获得的声强数据,获得其在阵元位置-频率域上的强度分布谱图,可以利用如Hough变换、Radon变换等图像处理方法提取声强谱中干涉条纹的斜率S。

[0066] 步骤2:选择第x个阵元作为参考阵元, $x=1,2,\dots,N$ 。提取该阵元接收的频域信号的相位 $\phi_x = \text{phase}(P_x)$ 。

[0067] 然后,将第x个阵元频域信号的相位 ϕ_x 与其它各阵元接收的频域信号 P_n 做互相关,得到互相关后的频域数据 $R = [R_n]_{N \times 1}$,其中 $R_n = \phi_x^* P_n$,"*"表示共轭操作。

[0068] 步骤3:依据步骤1中提取的干涉条纹斜率信息,沿着干涉条纹从互相关后的频域数据选出进行波束形成的阵列数据 $\tilde{R} = [\tilde{R}_n]_{N \times 1}$ 。

[0069] 构造波束形成的权系数 $w = [w_n]_{N \times 1}$,其中

$$[0070] \quad w_n = \frac{1}{N} e^{j\omega(n) \frac{D(n) \sin \hat{\theta}}{c_{\text{ref}}}},$$

[0071] j为虚数单位,e为自然常数, $\omega(n)$ 为干涉条纹所对应信号的角频率,D(n)为第n个阵元与参考阵元的间距, $\hat{\theta}$ 为波束扫描的方位角, c_{ref} 为选取的参考声速。 c_{ref} 在水声问题中一般取1500m/s,也可以根据实测的水文声速剖面、基于环境知识的声场计算来获得更加准确的 c_{ref} 。

[0072] 对阵列数据 \tilde{R} 进行波束形成,使用不同的波束扫描方位角 $\hat{\theta}$ 构造的波束形成权系数w进行加权补偿,得到相应的波束输出 $b(\hat{\theta}) = w^H \tilde{R}$ 。依据波束输出的强度最大值来获得目标声源与参考阵元之间的信道脉冲响应频域信号的估计结果G,即 $G = b(\theta_s)$,满足 $|b(\theta_s)| = \max_{\hat{\theta}} |b(\hat{\theta})|$ 。

[0073] 对目标声源与参考阵元之间的信道脉冲响应频域信号G进行Fourier反变换,得到目标声源与参考阵元之间的信道脉冲响应时域信号g。

[0074] 以下结合实施例进一步说明本发明所提供的技术方案。

[0075] 如图1所示,是实施例1-3采用本发明基于水平线列阵的信道脉冲响应被动估计方法来获取估计结果的流程图。

[0076] 实施例1.

[0077] 该实施例为针对水声目标辐射噪声的信道脉冲响应估计。仿真参数为:海水深度100m,声速1500m/s,密度 $1\text{g}/\text{cm}^3$,海水无声吸收;海底声速1800m/s,密度 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$,海底介质声吸收为 $0.5\text{dB}/\lambda$, λ 代表声波波长;声源设定为模拟辐射噪声的高斯白噪声信号源,声源深度为4m;均匀水平接收阵的阵元数为 $N=501$,阵元间隔 $d=0.5\text{m}$,布放深度为60m;声源与接收基阵之间的水平距离为10km。仿真中不考虑背景噪声。选择水平阵的第251个阵元作为参考阵元,即 $x=251$ 。

[0078] 步骤1:对各阵元接收信号进行采集与记录,得到时域声压信号 $p = [p_n]_{501 \times 1}$,此时 $n=1,2,\dots,501$ 。图2是参考阵元采集和记录的声压信号时域波形数据,即 p_{251} 。

[0079] 然后,对记录的时域声压信号p进行Fourier变换,得到其对应的频域信号 $P = [P_n]_{501 \times 1}$ 。进一步,得到声强数据 $I = [I_n]_{501 \times 1}$,其中 $I_n = |P_n|^2$,获得的阵元位置-频率域声强干涉条纹如图3所示。

[0080] 对图3所示的声强条纹利用Hough变换图像处理方法提取声强谱中干涉条纹的斜率S,提取结果如图中虚线所示,有 $S=0.058\text{Hz}/\text{m}$ 。

[0081] 步骤2:提取参考阵元接收频域信号的相位 $\phi_{251} = \text{phase}(P_{251})$ 。然后,将参考阵元频域信号的相位 ϕ_{251} 与其它各阵元接收的频域信号 P_n 做互相关,得到互相关后的频域数据 $R = [R_n]_{501 \times 1}$,其中 $R_n = \phi_{251}^* P_n$,“*”表示共轭操作。

[0082] 步骤3:依据步骤1中提取的干涉条纹斜率信息,沿着干涉条纹从互相关后的频域数据选出进行波束形成的阵列数据 $\tilde{R} = [\tilde{R}_n]_{501 \times 1}$ 。

[0083] 构造波束形成的权系数 $w = [w_n]_{501 \times 1}$,其中

$$[0084] \quad w_n = \frac{1}{501} e^{j\omega(n) \frac{(n-251)d \sin \hat{\theta}}{1500}}.$$

[0085] 在本实施例中, $\omega(n)$ 满足 $\omega(n) = \omega_0 - 2\pi S n d$,其中 $\omega_0 = 2\pi f_0$, $f_0 \in [690, 710]$ Hz。 $D(n) = n - 251$ d, $\hat{\theta} \in [-90^\circ, 90^\circ]$, $c_{\text{ref}} = 1500$ m/s。

[0086] 对阵列数据 \tilde{R} 进行波束形成,使用不同的波束扫描方位角 $\hat{\theta}$ 来构造波束形成权系数 w 进行加权补偿,得到相应的波束输出 $b(\hat{\theta}) = w^H \tilde{R}$,图4给出了本实施例中不同频率和扫描角度的波束输出强度 $|b(\hat{\theta})|$ 。波束输出的强度最大值位置如图4中虚线所示,由该位置对应的波束输出 $b(\theta_s)$ 来获得目标声源与参考阵元之间的信道脉冲响应频域信号的估计结果 G ,即 $G = b(\theta_s)$ 。对目标声源与参考阵元之间的信道脉冲响应频域信号的估计结果 G 进行 Fourier 反变换,得到声源和参考阵元之间信道脉冲响应时域波形的估计结果 g ,其与声源和参考阵元之间真实信道脉冲响应时域波形的对比结果如图5所示。可见本发明方法从目标辐射噪声中估计出的信道脉冲响应与真实信道脉冲响应在时域波形上非常接近,通过相关系数计算得到二者之间的相关系数达到 0.9893,说明本发明方法在本实施例中获得的估计结果具有较高的精度。同时,本实施例中,本发明方法只需处理时间长度为 2s 的噪声信号便获得了有效的信道脉冲响应估计结果,可见其加快了信道脉冲响应估计结果的收敛速度,降低了对信号累积时间长度的依赖程度。

[0087] 实施例2.

[0088] 该实施例为针对水声目标发射的宽带调频脉冲信号的信道脉冲响应函数估计。仿真声源设定为 660~740Hz 的线性调频信号,脉冲时间宽度为 6s,声源深度为 4m,其它仿真参数与实施例1相同。同样选择水平阵的第 251 个阵元作为参考阵元,即 $x = 251$ 。

[0089] 步骤1:对各阵元接收信号进行采集与记录,得到时域声压信号 $p = [p_n]_{501 \times 1}$ 。图6是参考阵元采集和记录的声压信号时域波形数据,即 p_{251} 。

[0090] 然后,对记录的时域声压信号 p 进行 Fourier 变换,得到其对应的频域信号 $P = [P_n]_{501 \times 1}$ 。进一步,得到声强数据 $I = [I_n]_{501 \times 1}$,获得的阵元位置-频率域声强干涉条纹如图7所示。

[0091] 对图7所示的声强条纹利用 Hough 变换图像处理方法提取声强谱中干涉条纹的斜率 S ,提取结果如图中虚线所示,有 $S = 0.058$ Hz/m。

[0092] 步骤2:提取参考阵元接收频域信号的相位 $\phi_{251} = \text{phase}(P_{251})$,然后得到互相关后的频域数据 $R = [R_n]_{501 \times 1}$,其中 $R_n = \phi_{251}^* P_n$,“*”表示共轭操作。

[0093] 步骤3:依据步骤1中提取的干涉条纹斜率信息,沿着干涉条纹从互相关后的频域数据选出进行波束形成的阵列数据 $\tilde{\mathbf{R}} = [\tilde{\mathbf{R}}_n]_{501 \times 1}$ 。

[0094] 构造波束形成的权系数 $\mathbf{w} = [\mathbf{w}_n]_{501 \times 1}$, 其中

$$[0095] \quad w_n = \frac{1}{501} e^{j\omega(n) \frac{(n-251)d \sin \hat{\theta}}{1500}}.$$

[0096] 在本实施例中, $\omega(n)$ 满足 $\omega(n) = \omega_0 - 2\pi Snd$, 其中 $\omega_0 = 2\pi f_0$, $f_0 \in [690, 710]$ Hz。 $D(n) = (n-251)d$, $\hat{\theta} \in [-90^\circ, 90^\circ]$, $c_{\text{ref}} = 1500$ m/s。

[0097] 对阵列数据 $\tilde{\mathbf{R}}$ 进行波束形成, 得到相应的波束输出 $b(\hat{\theta}) = \mathbf{w}^H \tilde{\mathbf{R}}$, 图8给出了本实施

例中不同频率和扫描角度的波束输出强度 $|b(\hat{\theta})|$ 。由图8中虚线所示波束输出的强度最大值位置对应的波束输出 $b(\theta_s)$ 来获得目标声源与参考阵元之间的信道脉冲响应频域信号的估计结果 G , 对 G 进行Fourier反变换, 得到声源和参考阵元之间信道脉冲响应时域波形的估计结果 g , 其与声源和参考阵元之间真实信道脉冲响应时域波形的对比结果如图9所示。通过相关系数计算得到本发明方法从目标辐射噪声中估计出的信道脉冲响应与真实信道脉冲响应的相关系数达到0.9931, 说明本发明方法在本实施例中获得的估计结果具有较高的精度。结合实施例1, 可见本发明方法对脉冲信号和随机噪声信号皆适用。

[0098] 实施例3.

[0099] 该实施例为针对水声目标辐射噪声的信道脉冲响应函数估计, 与现有基于水平阵的盲解卷积方法在不同信噪比下进行估计精度的对比。仿真中考虑背景噪声为高斯白噪声, 水平阵接收信号的信噪比变化范围设定为 $-30 \sim 30$ dB, 其它仿真参数与实施例1相同。

[0100] 每一信噪比条件下, 按照实施例1所述的步骤使用本发明方法获得声源与参考阵元之间信道脉冲响应的估计结果, 并计算与真实信道脉冲响应的相关系数; 同时, 用基于水平阵的盲解卷积方法也获得声源与参考阵元之间信道脉冲响应的估计结果, 并计算与真实信道脉冲响应的相关系数。将两种方法在不同信噪比下的相关系数统计如图10所示, 可见本发明方法相比基于水平阵的水声信号盲解卷积方法可以在更低的信噪比下获得更好的信道脉冲响应估计精度, 能够更加有效利用阵增益, 更好地抑制背景噪声对估计结果的影响, 提高对接收信号信噪比的宽容度。

[0101] 从上述对本发明的具体描述可以看出, 本发明方法实现了在更低的信噪比下获得更高的信道脉冲响应估计精度。

[0102] 最后所应说明的是, 以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制。尽管参照实施例对本发明进行了详细说明, 本领域的普通技术人员应当理解, 对本发明的技术方案进行修改或者等同替换, 都不脱离本发明技术方案的精神和范围, 其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

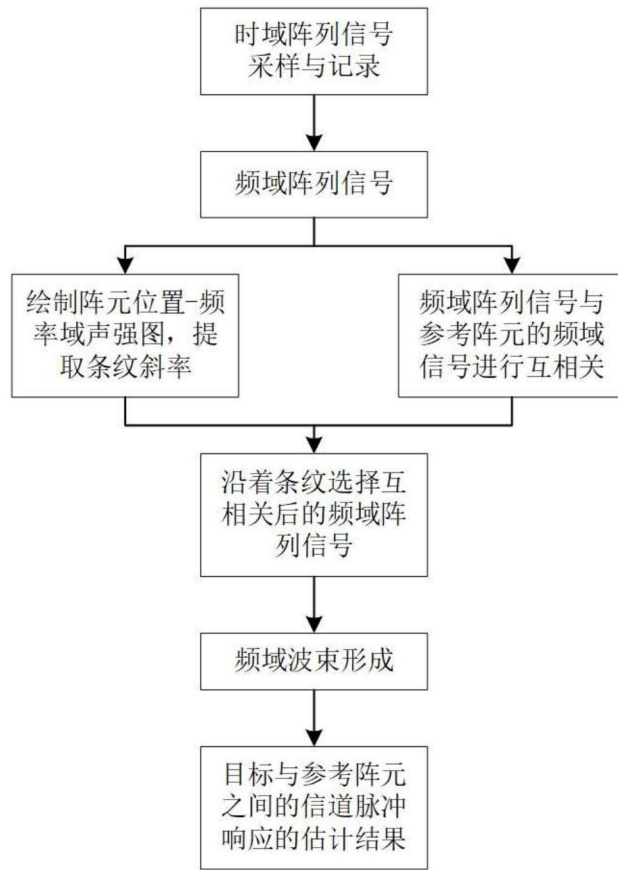


图1

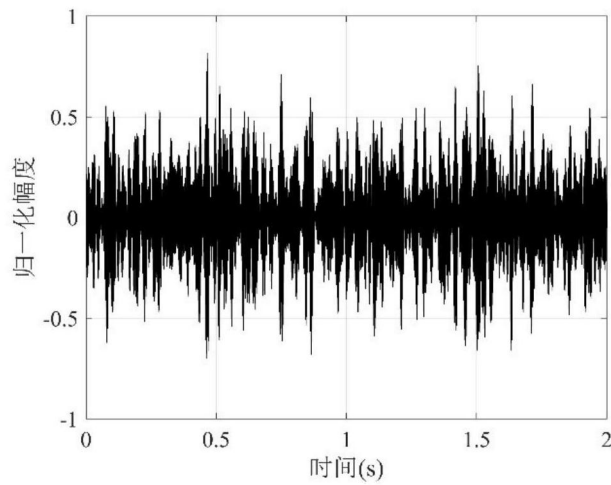


图2

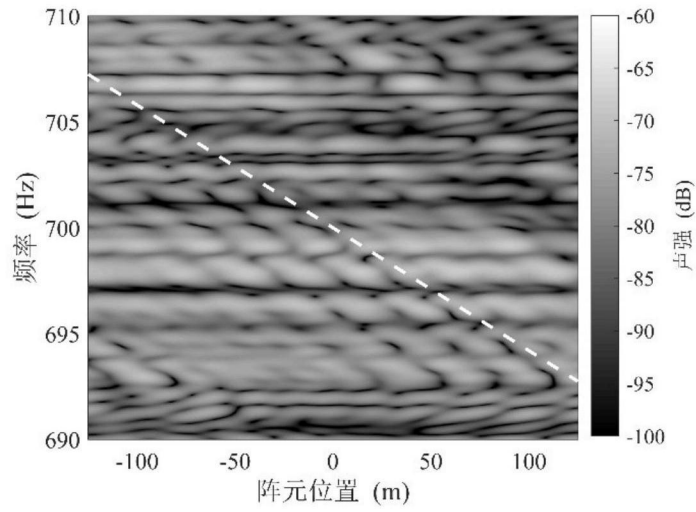


图3

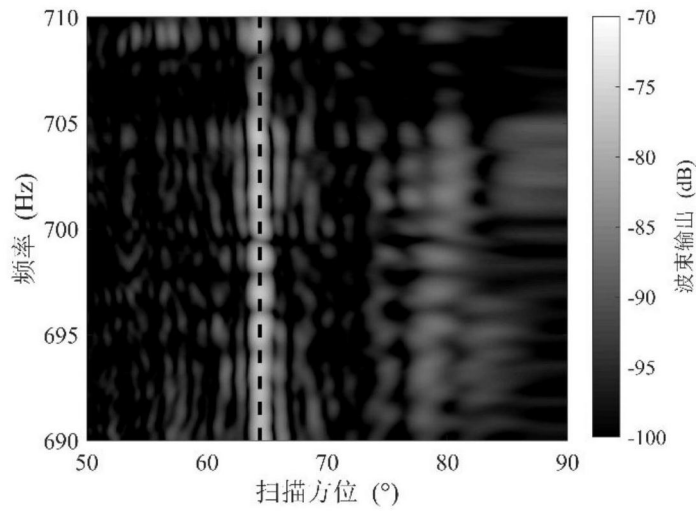


图4

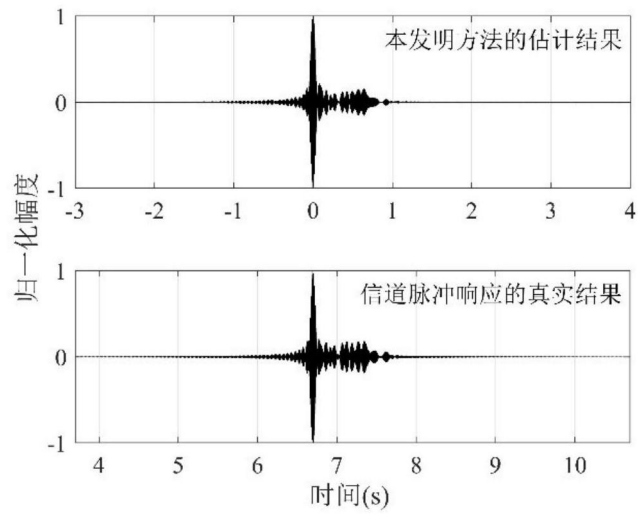


图5

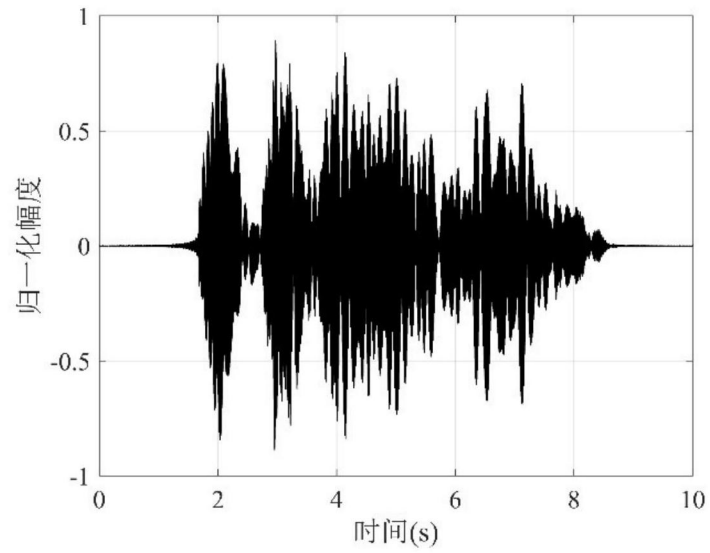


图6

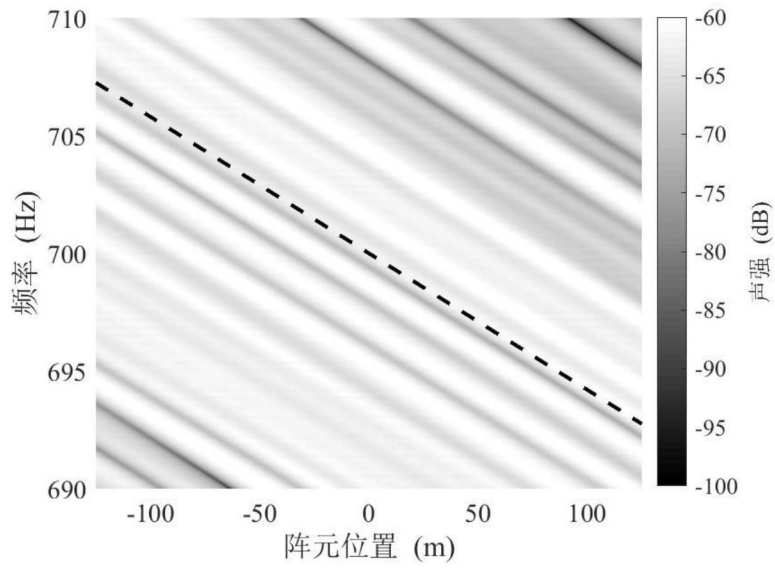


图7

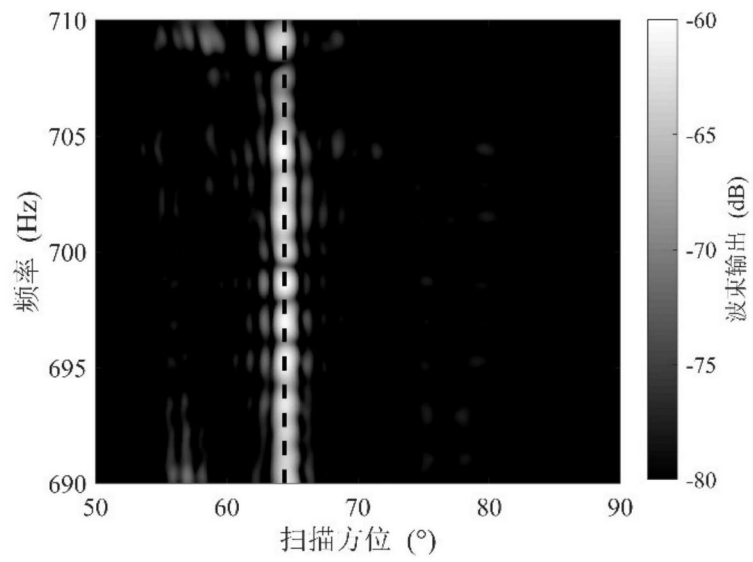


图8

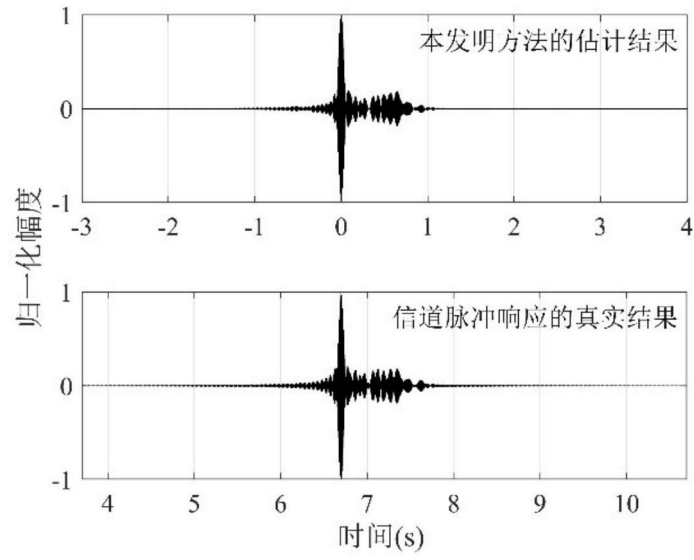


图9

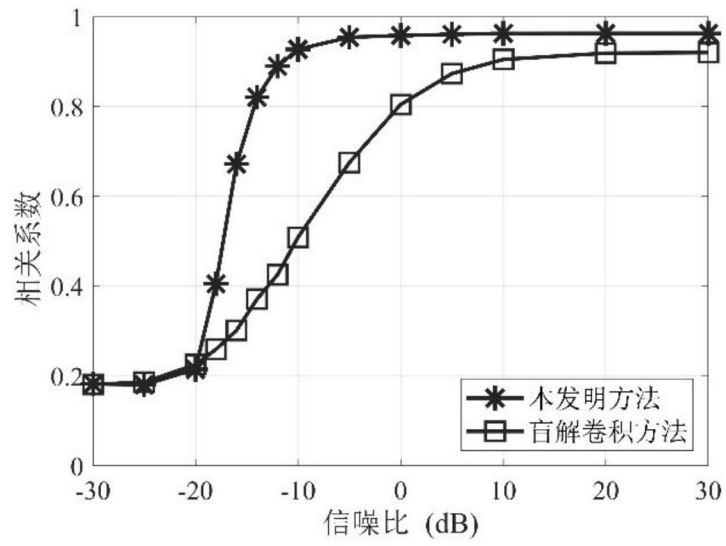


图10