

【引用格式】罗会彬, 彭荆明, 梅新华. 一种优化多通道声波束形成的方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(5): 414-418.

一种优化多通道声波束形成的方法

罗会彬^{1, 2}, 彭荆明^{1, 2}, 梅新华³

(1. 中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;

2. 清江创新中心, 湖北 武汉 430076;

3. 中国船舶集团有限公司(南京)大气海洋信息系统有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要 因基阵各通道不均衡, 使得水声接收系统波束形成时, 目标检测、方位估计等性能经常达不到预期。分析了各通道信噪比、幅值、相位影响波束信噪比的机理, 提出了一种减小基阵各通道不均衡的方法, 并利用实测数据进行了仿真。仿真结果表明: 该方法可有效地提高水声接收系统的目标检测、方位估计等性能。

关键词 水声设备; 接收机; 线阵; 波束形成

中图分类号 P715.5

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2022)05-0414-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.05.004

A Method for Optimizing Multi-channel Acoustic Beamforming

LUO Huibin^{1, 2}, PENG Jingming^{1, 2}, MEI Xinhua³

(1. No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China;

2. Qingjiang Innovation Center, Wuhan 430076, China;

3. Pride (Nanjing) Atmosphere Ocean Information System Co., Ltd., CSSC, Nanjing 211106, China)

Abstract Due to the disequilibrium of the channels in the array, it is difficult to achieve the expected performance such as target-detecting and orientation-estimating during the beamforming of acoustic receiving system. In this paper, the mechanism of signal-to-noise ratio, amplitude and phase of each channel affecting the beam signal-to-noise ratio is analyzed, a method to reduce the disequilibrium of the channels in the array is proposed, and the measured data is used for simulation. Simulation results show that this method can effectively improve the target-detecting and orientation-estimating performance of acoustic receiving system.

Key words acoustic equipment; acoustic receiver; linear array; beamforming

0 引言

水声设备接收系统中, 常通过多个阵元组阵, 以形成波束的方式提高目标回波信号的空间增益。其机理是: 噪声是各向同性, 而目标回波信号是在特定方向出现的, 因此可通过形成特定宽度的波束来提高信噪比。基于空间增益对接收系统性能的重要贡献, 几乎所有的水声设备都具有

波束形成功能^[1]。研究波束形成的文献较多, 但大多数集中于研究波束形成方法的可行性, 目的是为了

提高水声设备特定性能。文献[1]研究并提出了一种提高波束形成器鲁棒性的方法。该文认为由于水声信号的复杂性以及波束形成方法在处理水声基阵的实际问题时存在各种误差, 会导致波束形成器失稳, 也就是波束形成器在有随机干扰的条件下, 其性能难以很好预

测。因此, 为提高波束形成器的鲁棒性, 提出了一种改进的支持向量机 (SVM) 方法, 采用该方法可在无失配、水声基阵接收信号的方向存在偏差以及基阵阵元存在轻微扰动的条件下, 波束形成器仍具有较好的鲁棒性。该文研究的是怎样提高波束形成器应对随机干扰的能力。

文献[2-4]讨论了常规波束形成方法, 具体讨论了延时求和波束形成算法、频域相移波束形成算法。该文献认为大运算量及实时性要求在传统的处理机系统上已无法实现, 因此需采用并行处理技术, 来提高算法实施的效率。

文献[5]研究表明: 当噪声中存在显著尖峰时, 在传统波束形成方法中采用高斯分布模型, 不能得到满意效果。因此, 提出了一种基于分数阶统计量的水声信号波束形成方法, 采用仿真手段验证了所提方法的有效性。该文也研究了波束形成方法的鲁棒性。

文献[6]研究了舷侧阵的波束形成方法。主要介绍了通过波束形成, 使目标源信号实现同相相加, 噪声干扰移相后仍然为非相干, 不能实现同相叠加, 从而形成波束以增强信号, 抑制噪声和干扰, 利用阵列形成波束提高信噪比。

文献[7]研究了阵形畸变对波束形成的影响, 提出了基于时延估计的分裂阵时域波形算法。该文认为长线阵的畸变误差会影响波束的分辨能力, 而且这种影响会随阵元数量的增多而非线性增大。据上述原理, 将线阵分为 2 个子阵分别形成波束, 将 2 个子波束合成 1 个波束, 以期减小阵元数增加引起的畸变误差。

综上所述现有波束形成主要集中在如下几个方面: 研究波束形成算法的效率; 研究波束形成算法的鲁棒性; 研究可提高空间增益的波束形成方法。仔细分析, 本文欲解决的问题, 文献[1]、[2]、[6]、[7]均有所涉猎, 但基于各文献所研究问题的重心不同, 对本文的研究内容未作深入探讨。另外, 还有更多的文献研究通过波束形成提高系统对目标的方位估计能力等。所有这些方法均有一个前提, 即基阵各通道是均衡的, 但实际上并非如此, 在绝大多数情况下, 基阵中的各通道是不均衡的。

这种不均衡给系统带来物理误差, 使后续波束宽度、指向、旁瓣等不可预测, 从而影响系统的目标检测、方位估计等性能。本文试图找出造成基阵各通道不均衡的物理误差, 探寻减少物理误差的方法, 从而达到提高水声设备接收系统目标检测、方位估计等性能的目的。

1 通道不均衡原因分析

本文讨论的水声设备接收系统波束形成原理框图如图 1 所示。

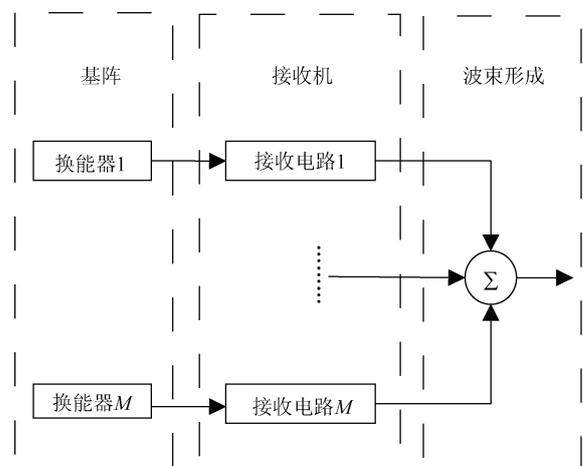


图 1 波束形成原理图

Fig. 1 Schematic diagram of beamforming

如图 1 所示, 1 个换能器 (阵元) 与 1 个接收电路组成 1 个接收通道, 多个通道组成接收机, 由接收机的输出进行波束形成。

1.1 各通道信噪比不同

若基阵阵元数为 M , 则 M 元线阵的空间增益按下式估算^[8]:

$$AG = 10 \log(M) \quad (1)$$

形成波束的主要目的是为了获得空间增益, 以提高信噪比。由式 (1) 可知, 形成波束时各通道应相对均衡, 否则难以达到既定的空间增益。

图 2-4 所示为 4 元线阵及其各通道实测数据处理后的结果。

采用实测数据仿真可知, 2、3、4 通道信噪比较接近, 1 通道信噪比则明显偏小。图 3、图 4 分别给出了通道 1、通道 4 的仿真结果。

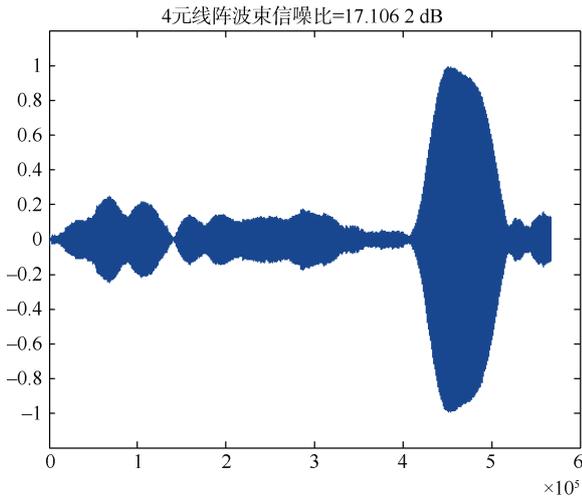


图 2 4 元线阵波束信噪比
Fig. 2 Beam signal-to-noise ratio of 4-element linear array

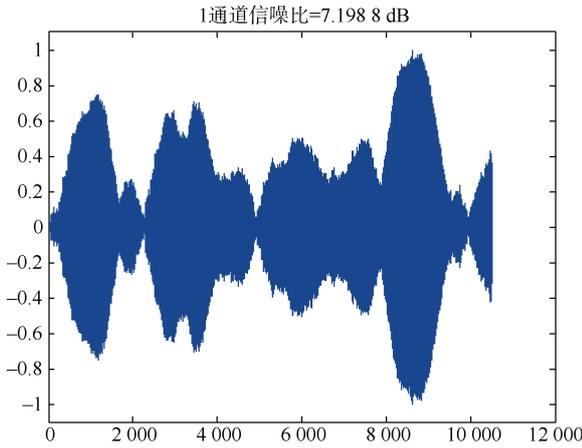


图 3 1 通道信噪比
Fig. 3 Signal-to-noise ratio of 1# channel

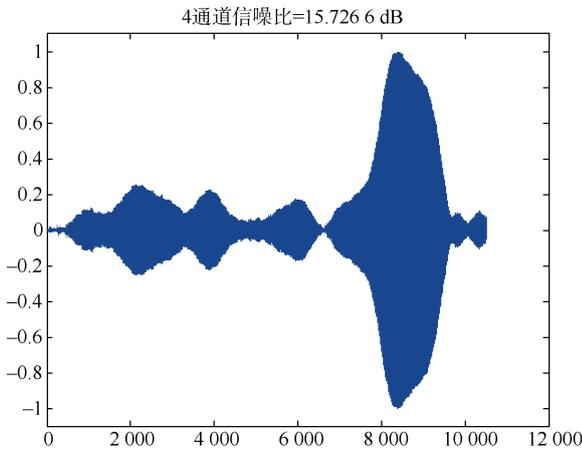


图 4 4 通道信噪比
Fig. 4 Signal-to-noise ratio of 4# channel

理论上各通道信噪比与线阵波束的信噪比关系为

$$R_{sSNR} = R_{bSNR} - AG \quad (2)$$

式中： R_{sSNR} 为单通道信噪比； R_{bSNR} 为线阵波束信噪比。

由图 2 可知，本文所述的 4 元线阵信噪比约为 17 dB。当 $M=4$ 时，由式 (1) 可得到 AG 约为 6 dB，由式 (2) 可得 R_{sSNR} 为 11 dB，即理论上各通道信噪比应在 11 dB 左右，但实测 1、2、3、4 通道信噪比分别约 7 dB，14 dB，13 dB，16 dB，所有通道信噪比与理论预计都有一定差距。

若用 SNR 表示信噪比，用 P 表示相应的声强比，则有

$$P = 10^{0.1SNR} \quad (3)$$

采用式 (3) 将 1、2、3、4 通道信噪比转换成相应的声强比分别为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 ，若 4 元线阵声强比为 P ，则有

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (4)$$

再将 P 转换为信噪比

$$R_{bSNR} = 10 \log P \quad (5)$$

用实测 1、2、3、4 通道信噪比数据，采用上述式 (3) - (5) 预计 4 元线阵信噪比 R_{bSNR} 约为 20 dB，比上述实测值大 3 dB。阵元越多线阵越长其阵增益越大，而 1 通道信噪比远小于其他通道，相当于减小了线阵的长度，阵增益自然会小于预计。

基于 2、3、4 号通道信噪比相近，故只以此 3 个通道形成 3 元线阵，所得该 3 元线阵波束信噪比如图 5 所示。

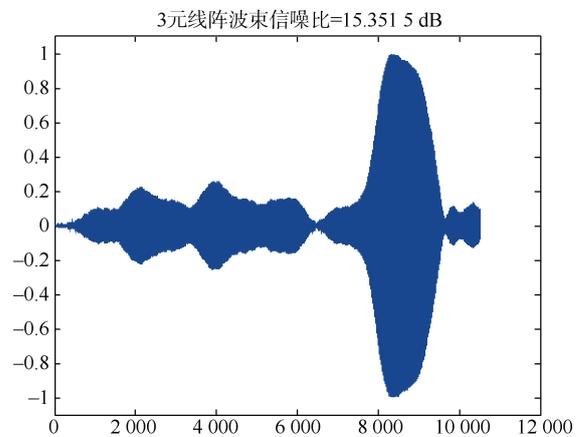


图 5 3 元线阵波束信噪比
Fig. 5 Beam signal-to-noise ratio of 3-element linear array

同样, 用实测 2、3、4 通道信噪比数据, 采用上述式 (3) - (5) 预计 3 元线阵信噪比 R_{bSNR} 约为 19 dB, 与图 5 所示的约 15 dB 仍有较大差距。

以上分析说明各通道信噪比不同, 对波束形成后的空间增益有影响。

1.2 各通道信号幅值不同

线阵的波束形成表达式为^[9]

$$B(s, t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \omega_m P_m(t - \tau_m) \quad (6)$$

式中: s 为信号位置; ω_m 为 m 号阵元的加权系数; $P_m(t)$ 为 m 号阵元上的声压; τ_m 为信号到 m 号阵元的时延。

由式 (6) 可知, 波束是各阵元声压的加权和, 一般情况下 ω_m 相同, 即一般为均匀加权阵, 本文研究的线阵也是如此。但从本文所引用数据 (参见图 3-4) 表明, 对同一目标信号 (源), 与各阵元对应通道的输出不同, 甚至个别通道的输出与其他通道有较大差别, 在事实上造成预想中的均匀加权阵变成了非均匀加权阵, 最终造成基阵的信噪比与预想不同。

图 6 是 1、2 通道的原始信号对比图。

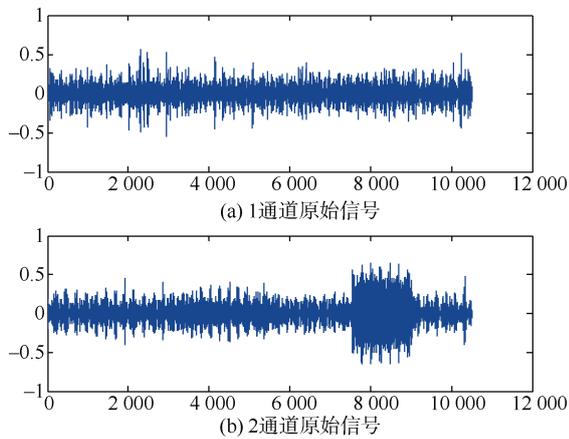


图 6 1、2 通道原始信号比较

Fig. 6 Comparison of original signals in 1# and 2# channel

由图 6 可知, 1、2 号通道的噪声相当, 2 通道可见明显目标回波信号, 而 1 通道人工不可见目标回波信号。造成 1 通道人工不可见回波信号的原因极可能是换能器灵敏度低, 这就事实上造

成了权系数的不均匀, 使得线阵的实际信噪比与预计值不同。

波束形成的前提是各通道信噪比相同、输出信号的幅值大致相同、换能器的灵敏度基本一致, 否则, 达不到形成波束利用阵增益, 以提高基阵信噪比的目的。

1.3 各通道相位不一致

以上分析了各通道信噪比、信号幅值及换能器灵敏度对波束形成的影响, 对波束形成影响的另一因素是各通道相位。

由图 5 可知, 实测 3 元线阵的信噪比约为 15 dB, 小于预计的 19 dB, 说明在理论上本实例线阵波束的信噪比有提升空间。以下用上述 3 元线阵为例通过调整各阵元信号的相位观察其对波束信噪比的影响。

通过实测数据仿真分析得到: 3 通道信号相位比 2 通道滞后约 23°, 比 4 通道滞后约 25°; 2、4 通道相位差约为 2°, 相位基本一致。因此, 只需将 3 通道信号的相位向提前约 25° 即可。图 7 所示是相位调整后 3 元线阵波束的信噪比。

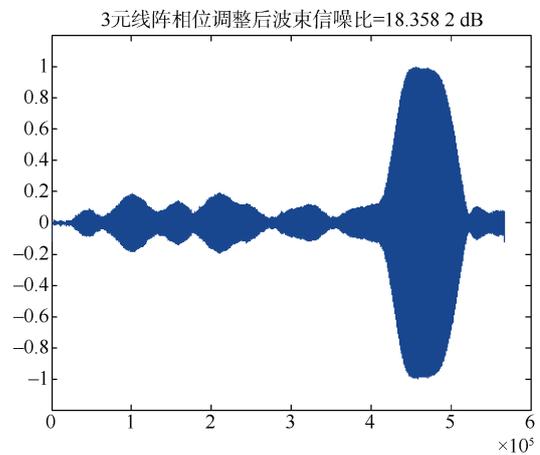


图 7 3 元线阵移相后波束信噪比
Fig. 7 Beam signal-to-noise ratio of 3-element linear array after phase-shifting

由图 7 可知, 移相后 3 元线阵波束的信噪比约为 18 dB, 略小于预计的 19 dB, 与移相前的 15 dB 有较大的提高。同时对比图 5 与图 7, 同一个 3 元线阵, 移相后不仅信噪比有提高, 而且在波形上也有改善, 移相后回波的包络更加规整。

各通道间相位不一致对波束的信噪比有影响,减小通道间的相位差不仅可提高线阵的信噪比,而且还可以改善目标回波信号包络的形状。

2 接收波束的实现

为了高质量实现波束形成,基阵中各换能器(阵元)的接收灵敏度、相频特性等性能在理论上应保持一致,但是这个要求在工程上较难实现。因此,为了弥补换能器性能上的不一致,接收电路除实现输入保护、放大、滤波等功能外,还应具备移相、放大倍数(增益)调整功能。围绕接收波束实现的接收机可按如下步骤进行。

1) 确定换能器性能指标。

这些指标包括接收灵敏度频率响应、多个换能器灵敏度一致性要求,相位频率特性、多个换能器相位特性一致性要求等。

2) 接收电路设计。

接收电路设计除常规的匹配、放大、滤波外,应控制接收电路的自噪声(在电路板实现、系统电子总体也应有相应的技术保证),还应在电路中设计相位调整单元电路,相位调整单元电路宜设计为宽带相位调整电路,以及设计增益调整单元电路。

3) 接收机调试。

该工作在单个接收通道电路的放大、滤波、自噪声性能已达到要求的基础上进行。接收机调试的主要目的是,使得在同一输入条件下,各通道电路输出信号的幅值、相位、频率等均完全一致。

4) 接收系统水池联调。

接收系统水池联调,又可细分2步进行:①接收电路与换能器联调,联调完成标准是在相同声源输入条件下,接收机各通道输出信号的幅值、相位、频率等均完全一致;②测试在给定的输入条件下,形成的波束是否与预想的相同。

3 结束语

本文研究了水声接收系统波束形成的基础问题:基阵各通道不均衡是客观存在的,但这种客观存在往往被有意、无意中忽略,而且还存在一种误区,认为基阵阵元越多,这种不均衡会被自然弥补(实际上不但不能弥补,反而随着阵元数的增加而增加^[7]),造成的后果是接收系统的目标检测、方位估计性能达不到预期,在实际工作中大多采取事后补救措施,不仅费时费力,效果还不尽人意。本文通过实例分析了基阵各通道不均衡的原因,给出了具体减小基阵各通道不均衡的方法。该方法可有效提高水声接收系统的目标检测、方位估计等性能。

参考文献

- [1] 崔琳,李亚安,房媛媛.一种鲁棒水声基阵波束形成方法的研究[J].计算机仿真,2013,30(6):335-338.
- [2] 郭元曦.水声阵列信号处理的并行实现研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.
- [3] 许光,周胜增.MVDR自适应波束形成技术在水声中的研究进展[J].声学技术,2014,33(6):554-557.
- [4] 黄鹏,梅新华.基于Notch窄带波束形成的俯仰角估计仿真[J].数字海洋与水下攻防,2020,3(2):171-176.
- [5] 张安清,王为颂,石一鸣.脉冲噪声环境下一种韧性的水声信号波束形成[J].声学技术,2009,28(2):254-256.
- [6] 周印龙.基于舷侧阵波束形成与高分辨方法研究[D].西安:西北工业大学,2006.
- [7] 李兰瑞,章新华,李鹏,等.基于时延估计的分裂阵时频波束形成技术[J].舰船科学技术,2019,41(11):155-159.
- [8] 陈韶华.水下自主声探测技术[M].北京:国防工业出版社,2020.
- [9] 卓瑞岩,刘成,何元章.基于波束形成与波叠加的噪声源三维定位方法研究[J].汽车工程,2019,41(10):1210-1214.

(责任编辑:曹晓霖)