

凹槽噪声场法对传感器阵指 向性设计中若干问题的分析

陈 航 马远良

(西北工业大学 西安 710072) 1992 年 1 月 20 日收到

在声纳、雷达等应用领域中,传感器阵的主瓣宽度和旁瓣级控制是阵指向性设计的重要任务,然而 对于复杂结构阵形和指向性设计中的一些特殊问题却往往找不出一种简捷、合适的处理方法。本文运 用凹槽噪声场法,就三维体积阵最佳指向性设计、宽带恒定束宽阵设计、无挡板单向接收阵的设计等问 题进行了讨论,并给出了部分仿真结果。

一、引 言

在声纳、雷达等应用领域中,传感器阵的设 计及优化是一个被广泛注意的问题。众所周知, 对于声纳系统而言,其信号是由空间某一局部 声源辐射出来并且在远场构成单向平面波,而 背景噪声却由周围四面八方传来,二者的空间 特性有很大差异,那么,传感器阵作为一个空间 处理器能否有效地把背景噪声中的信号检测出 来,关键问题在于对阵进行合理的设计.这其 中一个重要方面就是阵的指向性设计.

对于常规阵而言,改善阵指向性的有效手 段是振幅束控. 传统方法最典型 的如 Dolph-Chebyshev 函数逼近法,对于简单的等间隔线列 阵可以得到最佳的结果,但对于复杂结构的阵 如不等间隔线列阵、圆弧阵以及三维体积阵等, 由于各阵元所接收信号之间的相位差不再是余 弦倍角关系,于是不再适用. 其它方法如: H. S. C. Wang 的方法^{III}、Faran-Hill 法^{III}等,尽 管它们是针对不同的目的(即保持指向性主对 响应不变时对旁瓣的最大抑制以及获取阵的最 大空间处理增益),并且对于一些复杂结构阵也 得到了较好的结果,但由于计算非常复杂,实际 应用中还没有得到广泛的使用. 运用主瓣方向约束的最佳阵处理原理¹³, 在窄带信号的条件下,滤波器组的权重简化为 一组复常数,在各向同性窄带噪声场中,这组权 系数可以保证阵在给定方向(信号方向)上接收 信号后的输出保持恒定时,在其余方向上接收 信号后的输出功率最小。 凹槽噪声场法¹⁴⁻⁷¹运 用上述原则提出了对任意结构传感器阵指向性 进行优化设计的一般方法。本文结合这种方法 的应用就一些实际问题的处理谈一些体会,这 些问题包括: 体积阵的最佳指向性设计,宽带 恒定束宽阵设计以及针对某些特殊结构阵用权 系数实现加挡效果等.

二、凹槽噪声场法

我们简要地引述凹槽噪声场法。考虑一个 任意结构的传感器阵,它由M个性能相同的无 指向性阵元构成,该阵从空间接收的信号由两 部分组成

1. 从特定方向上传来的单频信号. 记信号 向量为

$$\boldsymbol{s}^{T} = [\boldsymbol{s}_{1}(t), \boldsymbol{s}_{2}(t), \cdots, \boldsymbol{s}_{M}(t)] \qquad (1)$$

其中 s_i(t) 为 i 号阵元接收的信号。记信号的 振幅为 A,则信号向量可写作

$$s^{T} = Ac^{T}$$
 (2)

• 9 ·

应用声学

2

2

.

这里

 $c^{T} = [c_{1}(t), c_{2}(t), \dots, c_{M}(t)]$ (3) c 为定向矢量,其中 $c_{i}(t) = \exp(i\varphi_{i}), \varphi_{i}$ 为 第 i 号阵元从信号人射方向接收到的信号相对 于参考点的相位差, $i = \sqrt{-1}$.

2. 从其它方向传来的噪声信号。记噪声信 号向量为

 $x^{T} \rightarrow [x_{1}(t), x_{2}(t), \dots, x_{M}(t)]$ (4) $x_{i}(t)$ 为 i 号阵元从噪声场中接收到的 噪 声信 号。那么主瓣约束条件下的旁瓣抑制就成为以 下极值问题:在阵对有用信号的处理后输出保 持为恒定值的条件下使得阵接收噪声信号的输 出功率最小。记滤波器组的权系数 向量为 ω , 噪声场相关矩阵 R_{--} ,则约束条件可以写为

y ー w^Ts ー A 即: w^Tc ー 1 (5) 阵接收噪声信号的输出功率为 P ー w⁺R_s,w, 由拉格朗日乘数法定义函数

 $F(\mu) = \boldsymbol{w}^{+} \boldsymbol{R}_{ss} \boldsymbol{w} + \mu (1 - \boldsymbol{w}^{T} \boldsymbol{c}) \quad (6)$ 上式对 \boldsymbol{w} 求导再令其等于零就得到

$$\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{w}}F(\boldsymbol{\mu}) = 2\boldsymbol{R}_{ss}\boldsymbol{w} - \boldsymbol{\mu}\boldsymbol{c}^* = 0 \quad (7)$$

即有:

$$\begin{cases} \boldsymbol{w}_{opt} = \frac{1}{2} \, \boldsymbol{\mu} \boldsymbol{R}_{ss}^{-1} \boldsymbol{c}^* \\ \boldsymbol{w}_{opt}^{T} \boldsymbol{c} = 1 \end{cases}$$
(8)

于是:

$$\boldsymbol{w}_{opt} = \frac{\boldsymbol{R}_{ss}^{-1}\boldsymbol{c}^*}{\boldsymbol{c}^T \boldsymbol{R}_{ss}^{-1} \boldsymbol{c}^*} \tag{9}$$

*w_{opt}*即主辦方向约束条件下的最佳权向量,一般地,它是一个复向量.显然,最佳权向量*w_{opt}*直接取决于噪声场相关矩阵*R_{st}*

为了计算 **R**...,我们可以在所分析的定向 平面内人为地模拟一个噪声场,它由大量噪声 源构成,除了主瓣方向外分布在整个旁瓣区域 内,噪声模型采用双边谱平面波窄带噪声,相应 于中心频率的波长为 λ. 于是传感器 *i* 从某个 噪声源接收到的噪声电压为

$$\mathbf{x}_{ik}(t) = n_k(t) \exp\left(\frac{7}{\lambda} \frac{2\pi}{\lambda} r_i \sin\left(\alpha_i + \theta_k\right)\right) (10)$$

式中 n_k(t) 表示第 k 个噪声源作用于 i 号传感 · 10 ·

器时的噪声电压(图1)。如果有N个噪声源从 不同方向上同时作用于;号传感器,则其接收 到的噪声电压为

$$\mathbf{x}_{i}(t) = \sum_{k=1}^{N} n_{k}(t) \exp\left(\tilde{j} \frac{2\pi}{\lambda} r_{i} \sin\left(a_{i} + \theta_{k}\right)\right)$$
(11)



图1 在所研究的定向平面内,阵元;接收到的噪声信号

第:号和第;号阵元在整个噪声场中接收噪声 信号的相关函数可由下式近似得出:

$$E[x_i^*(t)x_j(t)] \cong \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L x_i^*(l\Delta t)x_j(l\Delta t) (12)$$

其中L为采样点数,Δ;为采样间隔,各阵元间的相关函数构成了相关矩阵 **R**...

三、对几种较困难的阵列 设计问题的应用

通过数字仿真可以解决噪声源的产生、相 关矩阵 **R**₁, 的计算及求逆等问题。至于噪声源 的布置,视所分析的传感器阵可以采用等方向 角的均匀排放,也可以采用非均匀的布置。噪 声源的数目和强度也可以进行适当调整,其准 则是,针对旁瓣级高的方向增加源的密度并提 高强度。运用凹槽噪声场法我们就一些有意义 的问题进行如下讨论。

1. 三维体积阵的指向性设计

对于一个任意结构的传感器阵,按照一定 的要求设计其指向性是一项困难的工作,一般 情况下总是将复杂结构的阵分解为若干个简单 结构阵分别进行处理后,再利用乘积定理得到 阵的指向性。由于乘积阵对信号进行了非线性

12卷2期



图 2 "五臂阵阵结构示意图

运算,因而其结构会变的很复杂,信号功频增益 也会有一定的损失.运用凹槽噪声场法可以较 好地解决上述问题,实质上这种在主瓣方向上 施加约束的滤波方法综合了幅度束控和相位束 控,最大限度地利用了每个阵元对约束方向信 号的选择性.图2所示为一个三维体积阵在 *xy* 平面上的投影,15个阵元以等角度辐射状排列 构成一个"五臂阵",在频率为 *f*。时每根臂上各 阵元的间距为 2/4,各阵元均无指向性.如果按 照常规方法要得到较好的水平(*xy*平面)指向 性是件困难的工作,运用本文的方法我们对其 水平指向性进行了计算.得出的一组权系数列 于表 1,其指向性如图 3(a)所示,在主瓣宽度

阵 元号	f。频率下	2f。频率下
	权系数 w; (复数)	权系数 w; (复数)
1	$-2.83403 + \tilde{j}4.80891$	-0.01453 + j0.14276
2	-5.05416 + j̃8.52039	$-0.05739 + \bar{j}0.10923$
3	1.14901 — j̃1.85346	-0.01192 - j̃0.05939
4	$-2.25778 + \frac{1}{7}4.30047$	-0.13930 - j0.05750
5	-6.10576 + j8.83216	0.03637 — j0.00108
6	1.51774 — j2.11472	$0.04260 - \tilde{j}0.03131$
7	$-2.26122 + \tilde{j}4.30431$	-0.13930 - j0.05750
8	$-6.10383 + \frac{3}{1}8.83027$	0.03637 — j̃0.00108
9	1.51666 — \tilde{j} 2.11352	0.04260 — j̃0.03131
10	$-2.83237 + \tilde{j}4.80608$	$-0.01453 + \tilde{j}0.14276$
11	$-5.05510 + \frac{1}{9}8.52229$	$-0.05739 + \tilde{j}0.10923$
12	$1.14954 - \tilde{j}1.85445$	-0.01192 - j0.05939
13	$-3.31624 + \bar{j}4.18678$	-0.01227 + j0.06985
14	-4.58237 + 58.99011	0.06425 — j0.15841
15	1.08647 - j2.27660	-0.06326 + j̃0.04360

表1"五臂阵"权系数优化值

应用声学

2

(-3dB) 为 30° 的条件下,最大旁端级低于 -27.5dB,这个结果是令人满意的。



图 3 "五臂阵"的水平指向性图,主辨位于 y 轴正方向 (a) f。频率下 (b) 2f。频率下

2. 宽带恒定束宽阵优化设计

目前,设计宽带恒定束宽阵的常用方法是 频幅加权,对于等间隔线列阵,通过富氏变换或 线性组合的频幅加权可以得到近似的宽带恒定 波束,但其设计计算比较复杂,特别是当对指向 性的主旁瓣比有所要求时,必须先进行幅度束 控然后再进行恒定束宽的频幅加权。至于复杂 结构的阵尚无规律可循。运用凹槽噪声场法我 们对这类问题进行了研究。仍以上述的"五臂 阵"为例,我们已经得到了该阵在 f。频率下的 水平指向性,现将频率向上延拓一个倍频程,在 2fo、并保证主瓣宽度(-3dB)仍为 30°的条件 下计算其权系数,得出的一组权系数列于表 1, 其指向性如图 3(b)所示,最大旁瓣级低于 -21.40dB,从这个结果看,凹槽噪声场法对恒 定束宽阵的设计具有很好的适应性.对 f。至2fo

• 11 •

之间的其它频率进行类似处理,可顺利完成一 个倍频程范围的恒定束宽设计.

3. 加档效果

图 4(a) 所示为两个等间隔 8 元直线阵(阵 元间距 $d = \lambda/2$) 相距 $\lambda/16$ 排列时构成的 阵,阵元均无指向性,由于间距小于 $\lambda/4$, x 坐 标相同的阵元两两构成了"超指向性"阵元,我 们想把它的指向性设计成在 xy 平面内 具 有 单 一主瓣、旁瓣级小于 -30dB 的阵。将"超指向 性"阵元作为偶极子声源处理,然后对这8个偶 极子源构成的等间隔线列阵进行 Dolph-Chebyshev 加权(权系数列于表 2),得到的指向性 比简单的8元等间隔阵加权后的指向性要好, 其最大旁瓣级为 -30.3dB, 主瓣宽度(-3dB) 为16.5°,但在 У 轴负方向没有抑制作用,不能 满足我们的要求(图 4(b))。运用本文的方法 所得结果如图 4(c) 所示(权系数列干表 2), 在 控制主瓣宽度(-3dB)为16.5°时最大旁瓣 级小于 -34.0dB, 从结果看不仅达 到我们的 要求,其指向性也优于前者。实际上,这组权系 数同时兼顾了"加权"与"加挡"的作用。有趣的 是:本文方法处理的结果使得"超指向性"阵元 具有"心脏线"形式的指向性,图4(d)所示为 No.2 和 No.10 两阵元加权后作为单个阵元

表 2 图 4(a) 所示阵的权系数优化值

阵	D-C 加权法	本文的方法
号	权系数 w; (实数)	权系数 w; (复数)
1	0.10092	$0.01016 + \tilde{j}0.06560$
2	0.19970	$0.02567 + \tilde{j}0.11436$
3	0.31304	$0.04077 + \overline{i}0.20377$
4	0.38634	$0.05082 + \overline{i}0.25714$
5	0.38634	$0.05082 + \tilde{j}0.25714$
6	0.31304	$0.04077 + \frac{1}{1}0.20377$
7	0.19970	$0.02567 + \hat{j}0.11438$
8	0.10092	$0.01016 + \tilde{j}0.06562$
9	-0.10092	$0.01016 - \tilde{j}0.06560$
10	0.19970	$0.02567 - \tilde{j}0.11436$
11	-0.31304	$0.04077 - \tilde{i}0.20377$
12	- 0.38634	$0.05082 - \tilde{j}0.25714$
13	-0.38634	$0.05082 - \overline{i}0.25714$
14	-0.31304	$0.04077 - \tilde{j}0.20377$
15	-0.19970	$0.02567 - \tilde{j}0.11438$
16	0.10092	$0.01016 - \hat{j}0.06562$



12卷2期

1

的指向性,可以看出它在 y 轴负方向上有很好 的抑制作用。



图 5 12 元不等间隔直线阵结构

最后我们以不等间隔直线阵为例将凹槽噪 声场法和抑制区最小功率法¹⁰作一比较。图 5 是一个 12 元不等间隔直线阵的结构图,其间隔 是按对数增长的,即满足

$$\begin{cases} z_i = -z_{13-i}, \ (i = 1, 2, \dots, 6) \\ z_i = 2.2\lambda \left[\log \left(\frac{6.5}{13 - i} \right) / \log 6.5 \right], \ (13) \\ (i = 7, 8, \dots, 12) \end{cases}$$

表 3	不等间隔	直线阵的权	系数优化值
-----	------	-------	-------

阵三	抑制区最小功率法	本文的方法	
号	权系数 w; (实数)	权系数 w;(复数)	
1	0.0500	0.04631 + j0.00000	
2	0.1735	$0.16327 + \tilde{j}0.00002$	
3	-0.1377	$-0.10805 - \tilde{j}0.00008$	
4	0.7655	0.68662 + j0.00040	
5	-1.0055	$-0.87610 - \tilde{j}0.00119$	
6	0.6360	$0.58221 + \tilde{j}0.00227$	
7	0.6943	0.60053 — j0.00227	
8	-1.0358	$-0.88570 + \tilde{j}0.00119$	
9	0.7753	0.68983 — j̃0.00040	
10	-0.1396	-0.10869 + j0.00008	
11	0.1739	$0.16344 - \tilde{j}0.00002$	
12	0.0500	0.04634 — j̃0.00000	

3





(c) 凹槽噪声场法

 $-z_{5} = z_{8} = 0.31\lambda$, $-z_{6} = z_{7} = 0.09\lambda$. 当各阵元等加权时这个阵的指向性是比较差的,最大旁瓣级 -14.0dB,如图 6(a)所示. 运用抑制区最小功率法计算权系数,在控制主 瓣宽度(-3dB)为13.5°时最大旁瓣级小于 -32.0dB(图 6(b));运用凹槽噪声场法在控 制主瓣宽度(-3dB)为13.5°时最大旁瓣级 可降低到 -36.8dB以下(图 6(c)).两种方

• 13 •

法优化的权系数列于表 3,比较而言,本文的方 法能够得到更好的优化效果,所付出的代价是 权值为复数。

四、结 语

本文讨论一种按照主瓣方向约束的最佳阵 处理原则对任意结构传感器阵指向性的设计方 法——凹槽噪声场法。一般情况下这种方法得 出的权系数为复数,不仅能够有效地控制主瓣 的宽度和旁瓣级,还可以控制主瓣的方向。这 种方法对各种复杂结构的阵都具有很好的适应 性。本文提供的几个设计实例表明,可以用来 解决诸如三维体积阵指向性优化、宽带恒定束 宽、加挡等指向性设计中的一些特殊问题。作 为参考,还将这种方法与其它一些指向性设计 方法作了比较.



- [1] Wang H. S. C., J. Acoust. Soc. Amer., 57(1975), 1076-1084.
- [2] Faran J. J., Hills R., J. Acoust. Soc. Amer. 57(1975), 1300-1308.
- [3] Griffiths J. W. R., IEE. Proc., Vol. 130, Pts. F and H, 130-1(1983), 3-10
- [4] 马远良, Griffiths J. W. R, 船舶仪器仪 表学术委员会论文集, No.1 (中国造船)编辑部,1984.
- [5] 马远良,中国造船,4(1984),78-85.
- [6] Ma Yuanliang, "Array Design and Processing Methods for Underwater Sound Measurement," Proc. of International Workshop on Marine Acoustics, March 1990, 99-106, Beijing.
- [7] Ma Yuanliang, "Advances in Acoustic Signal Processing", Proc. of WESTPRAC IV, Nov. 1991, 47---57, Brisbane.

自适应滤波技术在水声信号处理中的应用

蔡惠智 李启虎 孙 增 孙长瑜 (中国科学院声学研究所 北京 100080)

1992 年 1 月28日收到

自适应滤波理论是出现于六十年代的信号处理理论,根据这一理论系统可以自行调节本身的参数 以适应周围环境,抑制干扰并检测出有用信号.本文根据 Widrow 的自适应算法,提出一种用于声呐 系统的自适应滤波技术,并成功地用于被动声呐检测.被动声源的测距问题是声呐信号处理中的难题, 利用自适应噪声抵消技术可以精确地测定不同传感器所接收到的信号时延差,利用内插算法准确地给 出目标的距离.本文阐述了自适应滤波技术在水声中的一般应用,特别是被动测距中的应用,给出了硬 件设计框图及原理,同时给出硬件、软件调试说明和实际测量的结果.本文所提出的系统,结构简单、性 能好、编程容易,其性能优于国外某同类系统.

一、前 言

近几年来,自适应滤波技术是声呐信号处 理领域中最引人注目的课题之一^[1-3],这是因为 在声呐工作环境中总存在着各种各样的干扰。 普通的波束成形系统,当处于各向同性、均匀的 噪声场时,可能具有相当好的检测能力。但是

- 14 -

一旦出现近场干扰,或者背景噪声有某种不平 稳性,声呐的检测能力就会迅速下降,以至完全 失去检测能力。因此,抗干扰声呐的研究始终 是声呐设计者的一个紧迫任务⁽⁴⁾。

所谓自适应滤波,就是声呐能够根据环境 噪声场的变化,不断地自动调节本身的参数以 适应周围的环境,抑制干扰并检出有用信号,换 句话说,声呐的信号处理系统能够逐点实时地

12 卷 2 期

£.