

任意结构形状传感器阵 方向图的最佳化*

马 远 良

(西北工业大学)

提 要

本文介绍一种处理传感器阵方向图最佳化问题的新方法,即所谓凹槽噪声场法。这种方法将通过计算机仿真来实现。原理上说,这种方法可以用来计算任意结构传感器阵的最佳权系数矢量和最佳方向图,以满足主瓣方向和宽度的要求,并使旁瓣级为最小。因此这种方法有可能用来解决传感器阵设计、应用中的许多实际问题,例如少数传感器失效、阵的尺寸误差过大,单个传感器的方向图互不一致,以及阵的结构形状复杂等。文中提供了一些计算实例,以说明本方法的优点,包括有一个“随机阵”的方向性设计。

(一) 引 言

在声纳、雷达以及无线电通讯等应用领域中,有关传感器阵方向图的最佳化问题早已有许多作者提出种种方法^{[1][2]}。不过这些方法大都是针对等间隔的直线阵——这种最简单而又最常用的结构形状。尽管也有人对于不等间隔的直线阵进行过一些讨论,其方法难以推广到具有任意结构形状的传感器阵。然而,在实际应用条件下,传感器阵的结构形状往往是复杂的,由此带来许多具体问题,至今找不到切实有效的方法来处理。例如在水面舰艇声纳中有所谓“共形阵”,它与舰首下方的船形混然一体,形状复杂,难以进行方向图的最佳化。其实,在导弹和自导鱼雷的传感器设计中也有类似问题。再者,在某些传感器阵中,几何尺寸难以准确控制,其极限情况是所谓“随机阵”——设想有一系列水听器被沉放到海底,企图将它们排列在预定的位置上。然而,实际沉放后的位置却象射击时的弹着点一样,随机地散布在预定位置周围。在此情况下,若能测得它们的相对位置,是否仍然可以形成良好的方向性?还有一种情况,就是在已有的阵结构中单个传感器具有方向性且互不相同,因而在进行方向图的综合时不能运用乘积定理。其实在许多带障板的曲面阵中都有这个问题。如何实现这类传感器阵方向图的最佳化,既困难又有明显的实际意义。最后,关于等间隔的直线阵,如果有少数传感器失效,进行更换又很困难,那么是否可以利用剩余的传感器实现最佳化,并通过波束形成器的相应调整,重新获得满意的方向性^[3]?

* 本文于1983年8月15日收到。

为使以上种种问题得到解决, 归根结蒂, 需要有一种处理任意结构传感器阵方向图最佳化问题的一般性方法。人们已运用数学解析的办法, 解决了等间隔直线阵方向图的最佳化问题, Dolph-Chebyshev法^[1]即是如此。然而, 要用纯粹数学解析的方法来解决任意结构形状传感器阵方向图的最佳化问题, 显然是非常困难的。本文将证明, 利用以计算机为基础的数字仿真方法, 能够提供一种解决这个问题的切实有效的途径。

(二) 方向图的最佳化原理

首先, 根据传感器阵方向图设计的一般原理, 任何复杂的立体方向图, 总可用若干个“定向平面”切割之, 而得到在该平面内的断面方向图。每个断面方向图的形状仅仅取决于各传感器在相应的定向平面内的投影位置(更严格地说是传感器相位中心的投影位置), 而与传感器偏离该平面的距离无关。因此, 只要能够找到一种方法, 解决平面内任意形状传感器阵方向图的最佳化问题, 再将这种方法应用于若干个不同的定向平面, 全空间的立体最佳方向图就可确定。实际上, 在许多应用环境下能够得到满意的水平和垂直(断面)方向图也就足够了。因此, 我们仅对共面的任意结构传感器阵进行分析, 并希望所得结果可以推广应用于立体结构的传感器阵。

假定有 M 个传感器分布在某平面内的任意曲线上, 如图1所示。再假定传感器之间的相对位置为已知, 可用相对于传感器No.1的极坐标参数来表示。极轴方向可取为与预期的主瓣方向相垂直。于是传感器的位置矢量为:

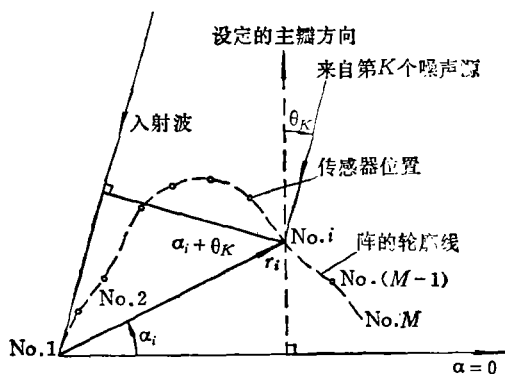


图1 投影于某平面的传感器阵的几何结构

向径:

$$r = [r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_M]^T$$

角度:

$$\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_M]^T$$

式中角标“ T ”表示矩阵的转置。再假定信号入射方向为 θ , 它表示入射方向与主瓣轴线方向之间的角度差。任一传感器 i 可能具有方向性, 记为 $g_i(\theta)$ 。于是该传感器从某个远距离噪声源接收到的噪声电压可表示为:

$$x_{iK}(t) = n_K(t) g_i(\theta) \exp[j(2\pi/\lambda) r_i \sin(\alpha_i + \theta_K)]$$

式中 $n_K(t)$ 表示噪声源No. K作用于传感器No. 1且当 $g_1(\theta) \equiv 1$ 时的接收电压。对于其他的传感器, 假定所接收的噪声场的强度相同, 不同的只是因位置各异而引入的相位移以及单个传感器的方向图 $g_i(\theta)$ 。在上式中, 隐含着假定噪声源是窄带的, λ 即是中心频率上的波长。

如果有 N 个噪声源从不同方向同时作用于传感器阵, 那么传感器No. i 的接收电压为:

$$x_i(t) = \sum_{K=1}^N n_K(t) g_i(\theta) \exp[j(2\pi/\lambda) r_i \sin(\alpha_i + \theta_K)] \quad (1)$$

此式代表着任一传感器 i 对某个离散分布的空间噪声场的响应。有了它, 即可着手讨论方向图的最佳化问题。

采用这样的最佳化准则: 在保持方向图主瓣方向和束宽(由主瓣两侧零值点之间的夹角量度)一定的条件下, 使传感器阵置于整个旁瓣范围内均匀分布的噪声场中时, 所得的输出噪声功率为最小。在主瓣方向, 其响应始终固定为 1。可以人为的布置一个对应于上述要求的“凹槽式噪声场”。凹槽的中心线对准预期的主瓣方向, 凹槽的宽度等于所需的主瓣宽度。在凹槽宽度内没有噪声源存在, 在凹槽之外的其他方向上有许多彼此独立的噪声源均匀的分布着, 如图 2(a)所示。在此条件下, 可以直接运用具有主瓣方向约束的最佳阵处理原理^[4], 来实现方向图的最佳化。把这最佳化方法称为“凹槽噪声场法”。

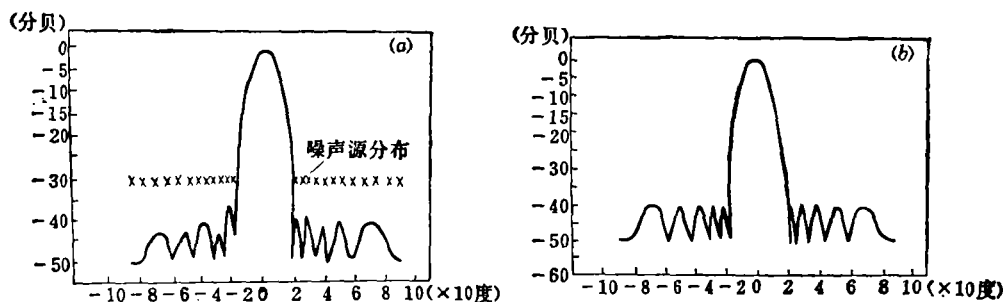


图 2 凹槽最佳化与Dolph-Chebyshev最佳化的比较
(a) 凹槽式法12元线列阵方向图, (b) 相应的Dolph-Chebyshev方向图。

设信号来自主瓣轴线方向, 幅度为 1, 可求得信号矢量为:

$$C = [C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_N]^T \quad (2)$$

式中 $C_i = g_i(0) \exp[j(2\pi/\lambda)r_i \sin \alpha_i]$

各传感器从所述凹槽噪声场中接收到的噪声, 亦用矢量表示为:

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N]^T \quad (3)$$

式中 x_i 由 (1) 式确定, 表示 $x_i(t)$ 在任一瞬间的取样值。对应的噪声源数据 n_k , 具有均方值为 1, 亦即 $E[n_k^2] = 1$ 。如果波束形成器采取线性综合器结构, 其复数权系数矢量记为:

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_N]^T \quad (4)$$

则当保持约束条件 $W^T C = 1$ 时, 可求得最佳权系数矢量为^[4]:

$$W_{op} = \frac{R_{xx}^{-1} C^*}{C^T R_{xx}^{-1} C^*} \quad (5)$$

式中角标 “*” 表示复共轭, “-1” 表示矩阵求逆, “T” 表示转置。 $R_{xx} \triangleq E[X^* X^T]$ 为输入噪声矢量的协方差矩阵。

一旦求得 W_{op} , 再求得随入射方向而变化的信号矢量 $C(\theta)$, 即可求得所需的最佳方向图:

$$G(\theta) = W_{op}^T C(\theta) \quad (6)$$

在上述分析中, 明显的问题是需要布置某种特定的噪声场。这种噪声场的要求, 很难用物理仿真的办法实现, 然而计算机数字仿真办法, 却为上述最佳化原理的实现提供

了切实有效的途径。

(三) 数字仿真方法

运用计算机仿真确定最佳权系数矢量, 并从而得出最佳方向图的过程中, 需要处理噪声源的产生, 噪声场的模拟, 噪声矢量协方差矩阵的计算等问题。在建立的仿真程序中, 噪声源的产生是采用高斯分布拟随机数字序列, 其均值为 0, 方差为 1。多路噪声数字序列经正交解调变为复基带噪声, 经多路低通滤波, 再恢复为复窄带噪声, 以满足本文所采取的复数模型。输入噪声矢量协方差矩阵的计算, 是以时间平均代替系综平均。其他计算, 则都是直截了当地按照上节中建立的公式进行。

不过, 仍有几个实际问题需要引起注意。首先, 关于最佳权系数和最佳方向图是否存在问题, 将取决于输入噪声矢量的协方差矩阵 R_{xx} 是否可逆。 R_{xx} 是一个 Hermition 矩阵, 只有当它是满秩矩阵时, 才是可逆的。归根结蒂, 这将取决于输入噪声矢量的特性, 取决于传感器阵的结构和凹槽噪声场参数 (凹槽的轴线方向及宽度) 之间的配合关系。对于特定的阵结构, 如果 R_{xx} 不可逆, 则说明规定的主瓣宽度是不现实的, 需要适当地调整。经验告诉我们, 适当放宽对于主瓣宽度的要求后, 这个问题一般地可以得到解决。

其次, 凹槽噪声场的均匀性, 独立噪声源的数目, 应有一个基本的保证。通过对等间隔直线阵的研究发现, 要得到均匀一致的旁瓣级 (对应于 Dolph-Chebyshev 阵), 凹槽两侧的噪声源方向应作成正比于 $\sin \theta$ 的均匀分布才行。亦即:

$$\sin \theta = \begin{cases} -\sin \frac{\phi}{2} + \left(1 - \sin \frac{\phi}{2} \right) (2i - N) / (N - 1), & \left(\text{当 } i \leq \frac{N}{2} \right) \\ \sin \frac{\phi}{2} + \left(1 - \sin \frac{\phi}{2} \right) (2i - N + 1) / (N - 1), & \left(\text{当 } i > \frac{N}{2} \right) \end{cases}$$

式中 $i = 1, 2, \dots, N$, 表示噪声源从左至右的编号。至于噪声源的数目, 一般地应大于传感器数目的 2 ~ 3 倍。

必要时也可采用非均匀的凹槽噪声场, 以改变所得的方向图中旁瓣级的分布规律。对于处在凹槽边沿上的噪声源, 最好有大于其他噪声源 2 ~ 3 倍的幅度。这样, 所得方向图主瓣两侧的零值点可以更加深陷而分明。

(四) 应用举例

运用所提出的方法, 对多种传感器阵方向图的设计, 进行过计算。这些传感器阵包括: 等间隔直线阵、等间隔直线阵中若干传感器失效后形成的非等间隔直线阵、圆弧阵、弓形阵以及阵元在直线两侧呈任意分布的“随机阵”等。现将部分典型结果介绍如下。为了计算时简便, 所用的传感器均为全向性, 即 $g_i(\theta) \equiv 1$ 。

图 2 表示一个 12 元等间隔直线阵方向图的最佳化结果。图 2(a) 系由凹槽噪声场法求得, 而图 2(b) 为相应的 Dolph-Chebyshev 方向图。可以看出, 除旁瓣级有一些微小差别外, 两者的主瓣宽度和旁瓣个数完全相同。凹槽噪声场法所得的方向图中, 旁瓣级的微小起伏是由于这种方法的统计性质决定的, 是一种统计误差, 可用统计平均来消除。两种方法所得权系数的比较见于表 1。这些数据表明, 两种方法所得的权系数几乎是相

同的。

图 3 和表 2 是一个弓形阵的结构, 最佳方向图 and 对应的一组权系数。在这里, 噪声

表 1 两种方法所得权系数的比较

阵元序号	权系数 (凹槽法)	取 平 均	权系数 (D-Ch法)
1	0.0142	0.0165	0.0171
2	0.0354	0.0380	0.0377
3	0.0647	0.0684	0.0679
4	0.0975	0.1015	0.1011
5	0.1270	0.1297	0.1298
6	0.1451	0.1458	0.1465
7	0.1470	0.1458	0.1465
8	0.1324	0.1297	0.1298
9	0.1054	0.1015	0.1011
10	0.0720	0.0684	0.0679
11	0.0405	0.0380	0.0377
12	0.0187	0.0165	0.0171

场的凹槽宽度取为 0.7 λ , 阵的最大直线长度为 5.5 倍波长, 所得的旁瓣级低达 -35 分贝。图 3 (c) 提供方向图的比较, 是由等权叠加而得到的方向图, 几乎看不出任何主瓣与旁瓣之区别。

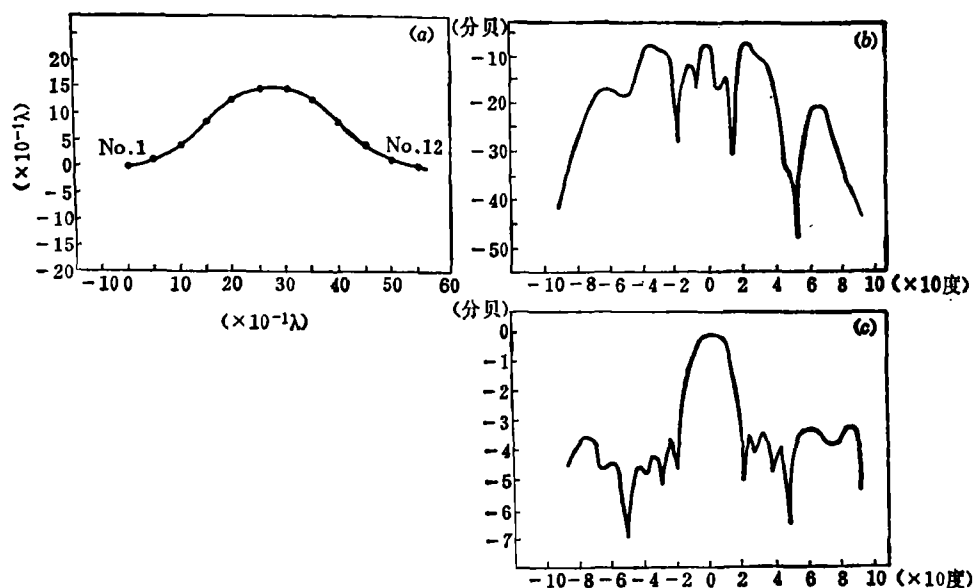


图 3 弓形阵的几何结构与方向图

(a) 所述弓形阵的几何结构; (b) 权系数相等时的方向图; (c) 最佳方向图之一。

图 4 和表 3 是一个随机阵的例子, 阵的最大直线长度亦为 5.5 倍波长。图 4 (a) 表示阵的几何形状和尺寸, 图 4 (b) 和 (c) 分别表示由凹槽噪声场法得出的方向图和对应的常规 (等权) 方向图。前者有明显的主瓣 (宽度 0.7 度), 且旁瓣级低达 -20 分贝, 后者则不具有任何可取的方向性。表 3 是对应于图 4 (b) 的一组最佳权系数。有趣的是, 这个阵结构完全是随意给定的, 因而也证实了所用的最佳化方法具有很好的适应性。

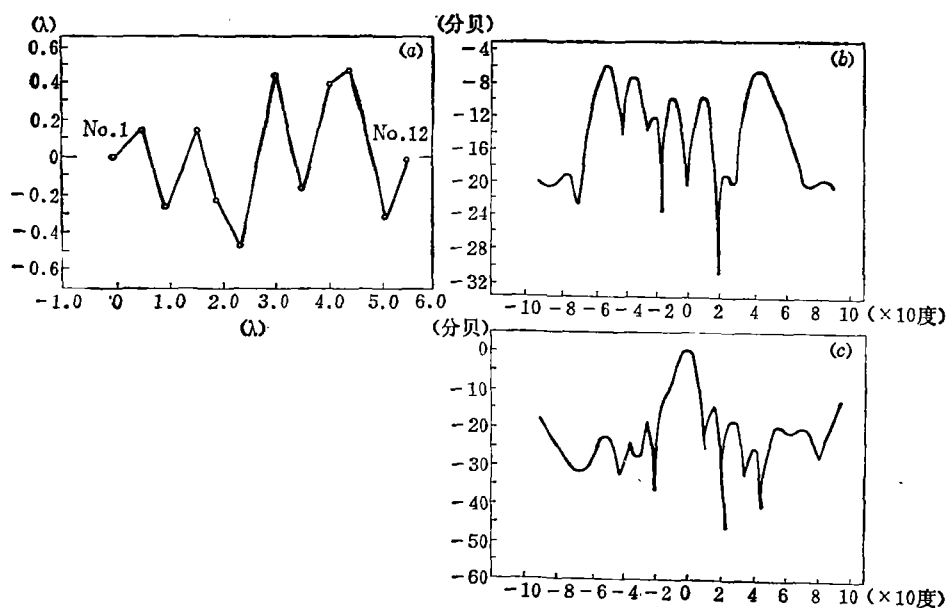


图 4 随机阵的几何结构与方向图

(a) 所述随机阵的几何结构; (b) 权系数相等时的方向图; (c) 最佳方向图之一。

表 2 12 元弓形阵的最佳权系数

阵元序号	权系数实部	权系数虚部
1	0.02663	0.00911
2	0.05607	- 0.03931
3	- 0.02960	- 0.08154
4	0.03103	0.00685
5	0.12540	- 0.00489
6	- 0.00366	- 0.16921
7	- 0.09113	- 0.17489
8	0.08809	- 0.12010
9	0.04099	0.06448
10	- 0.02597	- 0.00916
11	- 0.00530	- 0.00822
12	- 0.00642	- 0.00326

表 3 随机阵的最佳权系数

阵元序号	权系数实部	权系数虚部
1	0.05874	- 0.03073
2	0.05965	- 0.07855
3	0.04143	0.07847
4	0.07347	- 0.17780
5	- 0.13542	0.05442
6	- 0.15505	0.15598
7	- 0.01992	- 0.22783
8	0.17475	0.04894
9	0.07789	- 0.06487
10	- 0.13903	- 0.01639
11	0.05144	0.06503
12	0.03585	0.00506

(五) 结 论

通过对共面的任意结构传感器的分析,建立了运用所谓凹槽噪声场法实现方向图最佳化的设计、计算方法。这是一种统计处理方法,需要计算当传感器阵置于某个假想的凹槽式噪声场时输入噪声数据矢量的协方差矩阵,因而最好是通过计算机仿真来实现。由于这种方法可以用来处理立体结构传感器阵在任意定向平面内的最佳方向图设计,因此不仅可以用来进行共面的传感器阵方向图的设计,也可推广应用于处理立体方向图的设计问题。

计算实例表明,对于等间隔直线阵凹槽噪声场法和Dolph-Chebyshev法是等效的。对于弓形阵、随机阵等复杂结构形状的阵,也能得到满意的结果。在运用这种方法时值得注意的问题是如果接收噪声场矢量的协方差矩阵 R_{xx} 不可逆,因而不存在权系数矢量的最佳解 W_{op} 时,则需对原定的设计参数作一些修正,例如加大主瓣宽度(对应的噪声场凹槽宽度)或者改变传感器的结构尺寸。计算机仿真结果表明,这种方法对各种复杂的阵结构,具有很好的适应性。

因此,本文提供的方法为传感器阵的设计开辟了新的途径。设计、应用中的许多实际问题,例如在已有传感器阵中少数传感器失效造成方向性变坏,各传感器具有不同的方向图,给阵的方向图设计带来困难,传感器几何位置不准,导致方向图变坏,以及传感器阵结构形状复杂无法用现有方法进行方向图的最佳化等,均可运用本文提供的新方法来处理。

参 考 文 献

- [1] Dolph, C.L. "A Current Distribution of Broadside Arrays wich Optimize the Relationship Between Beam Width and Side-Lobe Level", Proc. Inst. Radio Engrs, 34, pp. 335, June(1946).
- [2] Pritchard, R.L. "Optimum Directivity Patterns for Linear Point Arrays", J. Acoust. Soc. Am., 26, (1954), pp. 1034.
- [3] Ramsdale, Dan J., Mimi Zbrich Lawrence, and George E. Ioup, "A Comparison of Methods for Controlling Side-Lobe Level in Uniformly-Spaced Arrays with Faulty Elements", J. Acoust. Sc. Am., Suppl. 1, 70, Fall (1981), S17~18.
- [4] Griffiths, J. W. R. "Adaptive Array Processing-A Tutorial", IEE Proc., 130, pts. F and H, 1, Feb. (1983).

PATTERN OPTIMISATION FOR SENSOR ARRAYS OF ARBITRARY CONFIGURATION

Ma Yuanliang

(Xibei Polytechnical University)

Abstract

The paper presents a new method used for optimizing array directional patterns, which is called notch noise-field method. It will be realized by computer simulations. In principle, this method can be used to calculate

the optimum weight vector and the corresponding pattern of an array of arbitrary configuration under the condition of maintaining a given mainlobe direction and beam width, while the sidelobe level is minimized. So that, it can be used to solve many problems in array design and applications, e. g. failure of some sensor, too much geometrical error, pattern differences between individual sensors, complex configuration etc. Some examples are provided to illustrate the advantage of the method, including an optimum pattern design of a "random array".

Key Words——Array directional patterns of sensor arrays; notch noise-field method; computer simulation; optimum pattern design of random array.