

任意结构阵列宽带恒定束宽波束形成新方法^{*}

杨益新 孙 超

(西北工业大学声学工程研究所 西安 710072)

1999 年 7 月 23 日收到

1999 年 11 月 8 日定稿

摘要 提出了一种任意结构阵列宽带恒定束宽波束形成的新方法。该方法把任意结构阵列的响应向量表示成以 Bessel 函数为核函数的级数之和, 并将高阶项截断, 然后把频带内各个频率点上的阵列响应向量转化到参考频率上, 从而得到恒定束宽波束形成向量, 使得各个频率上的波束和参考波束相同。同时, 本文还给出了一种基于自适应处理的参考波束优化方法。结合均匀分布离散圆阵所作的计算机仿真验证了本文所提方法的有效性。

PACS 数: 43.30, 43.60

A new method of broadband constant beamwidth beamforming for arbitrary geometry arrays

YANG Yixin SUN Chao

(Institute of Acoustic Engineering, Northwestern Polytechnical University Xi'an 710072)

Received Jul. 23, 1999

Revised Nov. 8, 1999

Abstract A new method of broadband constant beamwidth beamforming for arbitrary geometry arrays is proposed in this paper. In the method, the response vector of arbitrary geometry array is expanded in the form of sum of an infinite series, whose core function is the first kind Bessel function. The high terms of this series are truncated so that the array response vectors at different frequency components were transformed to the reference frequency and the constant beamwidth beamforming vectors are ready to obtain. With these beamforming vectors, the beams at different frequencies are same as the reference beam. A reference beam optimizing method based on adaptive processing is also proposed to optimize the reference beam of arbitrary geometry arrays. Computer simulation for a uniform circular array verified the effectiveness of the new method proposed in this paper.

引言

在声呐设计中, 信号通常采用宽带形式, 同时又要求信号通过基阵系统后无线性畸变。通常的基阵系统针对某一单频信号设计波束形成向量。当不同频率的信号通过这种基阵线性系统时, 它所形成的空间滤波器形状是不一样的, 只有滤波器的中心频率处的响应相同。所以, 波束对准目标时不会产生信号失真现象, 但当目标在波束宽度(半功率点)内其余方向上出现时输出信号就会出现线性失真。这种

信号失真不但对信号处理中能量接收或信号波形分析、信号识别等一系列方法有影响, 而且对侦察机、通讯机和目标识别设备的影响也很大。解决这一问题的基本方法就是设计恒定束宽波束形成器, 使得基阵系统对应不同频率的输入信号具有相同的空间滤波响应。已有的恒定束宽波束形成器设计方法主要针对均匀分布线列阵^[1], 或者是随频率的变化而改变基阵的基元数或基阵的等效孔径, 或者是随频率的变化而改变基阵各基元的振幅权, 如利用傅氏变换的恒定束宽阵、线性组合恒定束宽阵和乘幂恒

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (69802010)

定束宽阵, 以及低频归一波形估计最小二乘法恒定束宽阵, 但这些方法均无法方便地应用到任意结构的阵列中。

本文提出了一种任意结构阵列宽带恒定束宽波束形成的新方法。该方法把任意结构阵列的响应向量表示成以 Bessel 函数为核函数的级数之和, 并将高阶项截断, 然后把频带内各个频率点上的阵列响应向量转化到参考频率上, 从而得到恒定束宽波束形成向量, 使得各个频率上的波束和参考波束相同。任意结构阵列在入射信号是窄带信号时, 通过加权延迟求和的波束形成算法, 往往得不到较为理想的波束图。本文给出了一种基于自适应处理的参考波束优化方法。结合均匀分布离散圆阵所作的计算机仿真验证了本文所提方法的有效性。

1 任意结构阵列接收信号模型

考虑由 M 个各向同性阵元组成的任意结构平面阵列, 接收位于基阵远场点信号源辐射的平面声波, 如图 1 所示。信号源和基阵位于同一平面内。假定基阵各阵元的灵敏度均相同, 其位置向量为 $\mathbf{r}_m = (r_m \cos \varphi_m, r_m \sin \varphi_m, 0)$ 。平面波从 $-\mathbf{e}$ 方向入射到基阵,

$$\mathbf{e} = (\cos \theta, \sin \theta, 0), \quad (1)$$

则原点和阵元 m 接收到的信号之间的时间延迟为:

$$\tau_m = \frac{-\mathbf{e} \cdot \mathbf{r}_m}{c} = \frac{-r_m \cos(\varphi_m - \theta)}{c}, \quad (2)$$

其中 c 是声传播速度。若入射信号为 $s(t)$, 以原点为参考点, 则基阵第 m 个阵元的输出为:

$$x_m(t) = s(t - \tau_m) + n_m(t), \quad (3)$$

这里 $n_m(t)$ 是第 m 个阵元上的加性噪声。假定 $s(t)$ 为宽带信号, 频率范围为 $f \in [f_L, f_U]$, 则可对 (3) 式作 Fourier 变换, 有:

$$X_m(f) = e^{-j2\pi f \tau_m} S(f) + N_m(f). \quad (4)$$

把基阵频域输出写成矩阵形式, 可得:

$$\mathbf{X}(f) = \mathbf{A}(f, \theta) \mathbf{S}(f) + \mathbf{N}(f), \quad (5)$$

其中 $\mathbf{X}(f) = [X_1(f) \cdots X_M(f)]$ 是基阵输出信号向量, $\mathbf{N}(f) = [N_1(f) \cdots N_M(f)]$ 是基阵加性噪声向量, $\mathbf{A}(f, \theta)$ 是任意结构阵列的响应向量,

$$\mathbf{A}(f, \theta) = [e^{j2\pi f r_1 \cos(\varphi_1 - \theta)/c} \cdots e^{j2\pi f r_M \cos(\varphi_M - \theta)/c}]^T. \quad (6)$$

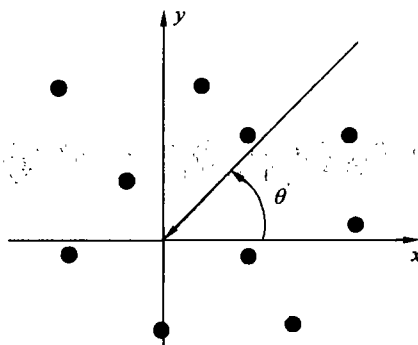


图 1 任意结构阵列几何结构图

2 任意结构阵列宽带恒定束宽波束形成

补偿各个阵元之间输出信号的时间延迟, 使得输出信号同相叠加, 就可以实现波束形成。若要控制波束形状, 一般可对各个阵元输出进行幅度加权。对于任意结构阵列, 若输入信号频率为 f_0 , 要形成指向 θ_s 的波束, 则可设计权系数为:

$$\mathbf{w}_{f_0} = \text{diag}(\mathbf{w}) \mathbf{A}^H(f_0, \theta_s), \quad (7)$$

其中 $\mathbf{w} = [w^1 \cdots w^M]$ 是阵元振幅加权向量, $\text{diag}(\cdot)$ 表示以向量各元素为对角线元素的对角矩阵。基阵输出波束图可表示为:

$$B(f_0, \theta) = |\mathbf{w}_{f_0} \mathbf{A}(f_0, \theta)|. \quad (8)$$

若入射信号频率范围为 $f \in [f_L, f_U]$, 显然在各个频率分量上波束图不相等, 波束输出信号会产生线性失真。恒定束宽波束形成器的实质就是选择在宽带信号带宽内各频率分量上波束形成的加权向量, 使得:

$$B(f, \theta) = |\mathbf{w}_f \mathbf{A}(f, \theta)| \cong B(f_0, \theta). \quad (9)$$

利用平面波分解公式,

$$e^{jz \cos \psi} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(z) (j)^n e^{-jn\psi}. \quad (10)$$

可以把任意结构阵列响应向量中各分量表示成以第一类 Bessel 函数为核函数的和的形式,

$$a(r_m, \varphi_m; f) = e^{j2\pi f r_m \cos(\varphi_m - \theta)/c} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (j)^n J_n(2\pi f r_m/c) e^{jn\varphi_m} e^{-jn\theta}. \quad (11)$$

进一步地, 有:

$$\mathbf{A}(\theta, f) = \tilde{\mathbf{T}}(f) \tilde{\mathbf{w}}(\theta), \quad (12)$$

其中:

$$[\tilde{\mathbf{T}}(f)]_{mn} = (j)^n J_n(2\pi f r_m/c) e^{jn\varphi_m}, \quad (13.1)$$

$$[\tilde{\mathbf{w}}(\theta)]_n = e^{-jn\theta} \quad m=1, \dots, M, n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (13.2)$$

考察如图 2 所示的 Bessel 函数图像, 若 $z_{\max} = 2\pi f_{\max} r_{\max}/c = 4\pi$, 注意到 $\max|J_{n_\epsilon}(z)| < \epsilon$, $z \in [0, z_{\max}]$, 其中 ϵ 是依照精度要求选择的一个小量, n_ϵ 是对应于 ϵ 的 Bessel 函数的阶次, 则可以在 $|n| = n_\epsilon$ 处对 $\tilde{T}(f)$ 和 $\tilde{w}(\theta)$ 作截断处理, 使得:

$$A(\theta, f) \cong T(f)w(\theta), \quad (14)$$

其中 $T(f)$ 是 $M \times (2n_\epsilon + 1)$ 矩阵, $w(\theta)$ 是 $(2n_\epsilon + 1) \times 1$ 的向量。

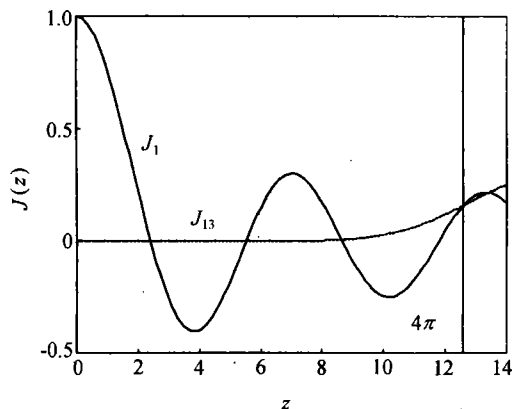


图 2 Bessel 函数

设计各频率分量上的波束形成向量:

$$w_f = w_0 T, \quad (15)$$

其中 $T = T(f_0)T^+(f) = T(f_0)[T(f)^H T(f)]^{-1} T^H(f)$, 则:

$$\begin{aligned} B(f, \theta) &= |w_f A(f, \theta)| \cong |w_{f_0} T(f_0) [T(f)^H T(f)]^{-1} T^H(f) \\ &T(f) w(\theta)| = |w_{f_0} T(f_0) w(\theta)| \cong |w_{f_0} A(f_0, \theta)|, \end{aligned} \quad (16)$$

这就得到了满足 (9) 式的波束形成向量。

3 参考波束优化设计 [5]

在第 2 节的恒定束宽波束形成设计中, 宽带信号带宽内各个频率分量的波束图最终将和参考频率的波束图近似一致。对于均匀分布直线阵, 参考频率上的波束设计已经非常成熟, 而对任意结构阵列而言, 常规的加权延迟求和波束形成方法往往难以给出需要的波束图。本节结合自适应技术, 给出任意结构阵列参考波束的优化设计方法。

在自适应阵列中, 当某个方向有干扰源时, 自适应方向图就会自动地在对应方向形成深零点或深凹口来加以抑制。干扰功率越大, 相应的零点或凹口就越深, 这就是自适应阵列中“功率倒置”的概念。由于自适应阵列对阵列的结构形式和单元方向性无特

殊要求, 因此这种原理可以移植过来用于常规非自适应阵列中的波束形成。

波束形成的整个过程由两个自适应环节组成, 即自适应构造虚拟的干扰谱结构和自适应数字波束形成, 其过程可表示如下:

$$R = \sum_{i=1}^J \sigma_i^2 a(\theta) a^H(\theta) + \sigma^2 I, \quad (17)$$

$$W = \mu R^{-1} a(\theta_s), \quad (18)$$

其中 R 表示稳态干扰协方差矩阵, $a(\theta)$ 为 θ 方向对应的阵列流向量, J 为干扰源个数, σ_i^2 和 $\theta_i (i=1, 2, \dots, J)$ 分别表示第 i 个干扰源的强度和方向, σ^2 为白噪声功率, W 表示由 (17) 式对应的虚拟干扰环境通过自适应数字波束形成方法得到的加权矢量, μ 为一常数因子, θ_s 表示波束指向角。

在 (17) 式中, σ^2 可设定为 1, 干扰源的个数 J 一般为阵元数的 2 至 3 倍以上, 干扰源的方向可在全方位上均匀分布, 主瓣区内干扰源的强度应设为 0, 即主瓣区无干扰源存在, 而副瓣区域的干扰强度可以自适应地调整。若在第 k 次自适应调整过程中, 主瓣所在区域为 $[\theta_L(k), \theta_R(k)]$, 则下一次调整时干扰源强度的设定可按照下面的方法进行:

$$\sigma_i^2(k+1) = \begin{cases} 0 & \theta_i \in [\theta_L(k), \theta_R(k)] \\ \max[0, \Gamma_i(k)] & \text{其它} \end{cases} \quad (19)$$

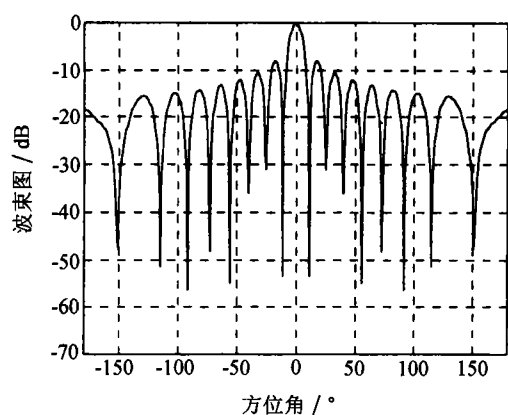
其中:

$$\Gamma_i(k) = \sigma_i^2(k) + K[p(\theta_i, k) - D(\theta_i)] \quad i=1, 2, \dots, J \quad (20)$$

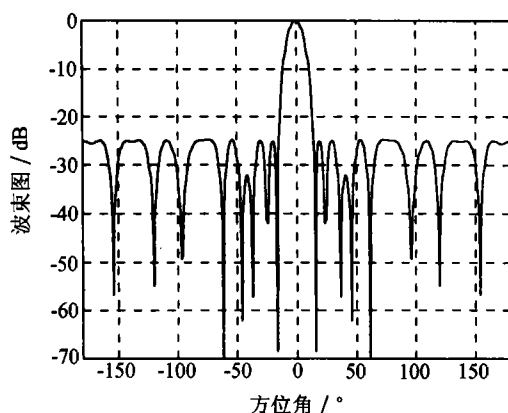
这里 $p(\theta_i, k)$ 是第 k 次调整得到的归一化波束响应, 而 $D(\theta_i)$ 则是在 θ_i 方向的期望波束响应, K 是自适应增益, 它的选择影响迭代收敛的速度。

4 设计实例

本节以均匀分布离散圆阵为例, 给出利用本文介绍的方法所作的计算机仿真结果。假定入射信号为一宽带信号, 频率范围为 $f \in [10, 20]$ kHz。均匀分布圆阵由 32 个各向同性阵元组成, 其半径是入射信号上限频率对应波长的 2 倍, 此时有 $z_{\max} = 2\pi f_{\max} r_{\max}/c = 4\pi$, 选取 $n_\epsilon = 15$ 。参考频率为 $f_0 = f_U = 20$ kHz, 图 3(a) 是在参考频率上, 使用均匀加权的延迟求和波束形成所得的指向 0° 方向的波束图, 该波束图旁瓣较高。使用自适应优化波束设计后, 得到图 3(b) 所示波束图, 此时, 波束旁瓣级为 -25 dB。



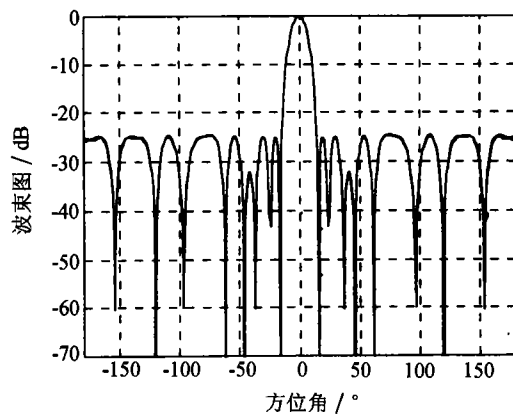
(a) 优化前



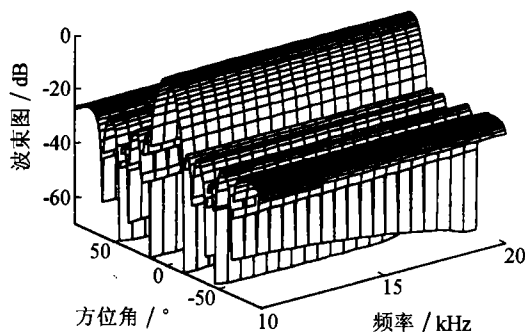
(b) 优化后

图 3 圆阵优化前后单频波束图

通过滤波或作 DFT 处理, 可以把宽带输出划分为 20 个子带输出, 设每个子带的中心频率为 f_i , $i = 1, \dots, 20$, 求出每个子带的波束形成向量 $w_{f_i} = w_{f_0} T_{f_i}$, 可以作出在每个子带上的波束图。图 4(a) 是每个子带上的波束图的叠加, 图 4(b) 则是三维形式。由图 4 可知本文所介绍的方法是切实有效的。



(a) 叠加



(b) 三维形式

图 4 圆阵各个频率上的波束图

5 讨论和结论

本文中的方法是针对阵元在同一平面内, 而且入射信号与其共面的情况做的。不难看出, 本文方法也同样适用于更加任意的情况, 也就是基阵是三维的, 信号从任意方向入射的情况。本文给出了在频带内不同频率分量上波束形成向量的设计方法, 适用于在频域实现波束形成的场合。一般地, 这样做需要较大的运算量, 即需要较大的硬件负担。对基阵各阵元输出采用 FIR 滤波, 且使该滤波器的频率响应拟合各个频率点上恒定束宽波束形成器的加权系数, 可以得到时域实现的恒定束宽算法。

水声信号经波束形成后, 可以提高信噪比, 抑制干扰。宽带恒定束宽波束形成是水声信号处理中的一个难点。已有的文献中对宽带恒定束宽波束形成的讨论大多基于均匀分布直线阵。本文给出了一种可适用于任意阵列的恒定束宽波束形成方法。计算机仿真所得的结果是令人鼓舞的。

参 考 文 献

- 1 李贵斌. 声呐基阵设计原理. 北京: 海洋出版社, 1993
- 2 Davies D E N. Circular arrays. Chapter 12 in the handbook of antenna design, Vol.II, Peter Peregrinus, Stevenage, 1983
- 3 Mathews C P, Zoltowski M D. Eigenstructure techniques for 2-D angle estimation with uniform circular arrays. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1994; 42(9): 2395—2407
- 4 Doron E, Doron M A. Coherent wideband array processing. in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing*, 1992(2): 497—500
- 5 杨益新. 目标方位估计的波束域高分辨算法研究. 西北工业大学硕士学位论文, 1998
- 6 刘志旺编. 数学物理方程和特殊函数. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1988