

组合圆周阵宽带恒定束宽波束形成研究

宋媚婷, 侯 朋, 夏春艳
(大连测控技术研究所, 辽宁 大连 116013)

摘 要: 为解决组合圆周阵恒定束宽波束形成问题, 本文建立组合圆周阵接收信号模型, 将阵列响应向量表示为贝塞尔函数的级数之和, 截断高阶项, 利用将各频率点上的波束图与参考波束图一致的思想, 得到恒定束宽波束图, 并讨论改变阵列参数对波束图的影响。计算机仿真实例表明该方法可有效运用到组合圆周阵恒定束宽波束形成问题中。本文研究具有实际应用价值。

关键词: 组合圆周阵; 宽带波束形成; 恒定束宽

中图分类号: TN914.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-7649(2015)12-0114-03 **doi:** 10.3404/j.issn.1672-7649.2015.12.023

Broadband constant beamwidth beamforming of combinatorial circumferential array

SONG Mei-ting, HOU Peng, XIA Chun-yan

(Dalian Scientific Test and Control Technology Institute, Dalian 116013, China)

Abstract: To figure out the broadband constant beamwidth beamforming of combinatorial circumferential array, this paper establishes the signal receiving modal of the combinatorial circumferential array, the response vector is expanded in the form of sum of an infinite series that the core function is the first kind Bessel function, the high terms are truncated, besides, using the idea of making the beam at different frequency components the same as the reference beam, thus, a constant beamwidth beam is obtained, and the influence on the beam pattern while changing the array parameter is discussed. Computer simulation indicates that this method can be effectively used to solve the broadband constant beamwidth beamforming of combinatorial circumferential array problem. The study in this paper has practical value.

Key words: combinatorial circumferential array; broadband beamforming; constant beamwidth

0 引 言

舰船辐射噪声是评价舰船隐身性的重要指标之一。随着减振降噪技术的发展, 舰船辐射噪声越来越低, 传统的单点水听器测量已经无法达到测量增益要求, 虽然垂直阵能提高接收信号信噪比, 获得空间增益, 但在浅海条件下, 需要非常大的基阵尺寸, 这将对低高频增益测量产生影响。虽然矢量水听器能以较小的尺寸达到较高的测量增益, 但其获取增益能力受海洋环境影响大, 矢量信息处理复杂, 高频测试能力受制造能力的限制而变得有限。

组合圆周阵因其高增益、宽频带和阵元数量多的特

点受到关注。阵列宽带恒定束宽波束形成是舰船辐射噪声测量领域的基础和关键。现有的恒定束宽波束形成器的设计方法都针对线阵。本文利用将阵列响应向量表示为贝塞尔函数的级数之和的方法, 得到组合圆周阵宽带恒定束宽波束图。为实际测量工作提供了坚实的基础。

1 组合圆周阵接收信号模型

1.1 组合圆周阵阵列模型

图 1 为阵元坐标图。阵元位置向量可表示为 $\vec{r}_m = (r_{xm} \ r_{ym} \ r_{zm}) = (r_m \sin\varphi_m \cos\theta_m \ r_m \sin\varphi_m \sin\theta_m \ r_m \cos\varphi_m)$ 。平面波从 $\vec{r} = (\sin\varphi \cos\theta \ \sin\varphi \sin\theta \ \cos\varphi)$ 方向入射到基阵, 则阵元 m 和原点之间接受到的信号时延为:

收稿日期: 2013-10-21; 修回日期: 2015-09-06

作者简介: 宋媚婷(1987-), 女, 助理工程师, 研究方向为信号处理。

$$\tau_m = \vec{r} \cdot \vec{r}_m / c [r_m \sin \varphi_m \sin \varphi \cos(\theta_m - \theta) + r_m \cos \varphi_m \cos \varphi] / c. \quad (1)$$

其中 c 为声速。

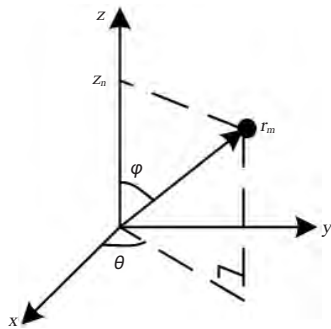


图1 阵元坐标图

Fig.1 Coordinate of the array member

对于阵元均匀分布的组合圆周阵来说,各圆周半径为 r_m ,阵元1在 x 轴上,对于第 n 个圆周上的第 m 个阵元, $\theta_m = 2\pi/M_n$,位置向量可写为:

$$\vec{r}_m = (r_{xm} \ r_{ym} \ r_{zm}) = (r_m \cos \theta_m \ r_m \sin \theta_m \ z_n),$$

因此,由式(1)得时延为:

$$\tau_m = [r_m \sin \varphi \cos(\theta_m - \theta) + z_n \cos \varphi] / c.$$

以原点为参考点,入射信号为 $s(t)$,则第 m 个阵元的输出为:

$$x_m(t) = s(t - \tau) + n_m(t),$$

其中 $n_m(t)$ 为第 m 个阵元的加性噪声。假设宽带信号的频率范围为 $f \in [f_L, f_U]$,对上式进行傅里叶变换,得到:

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

写成矩阵形式:

$$X(f) = A(f, \theta) S(f) + N(f),$$

式中: $X(f)$ 为阵列输出信号向量; $N(f)$ 为阵列加性噪声向量; $A(f, \theta)$ 为任意结构阵列的响应向量,对于阵元均匀分布的组合圆周阵有,

$$A(f, \theta) = [e^{j(2\pi f r_m \sin \varphi \cos(\theta_1 - \theta) + z_n \cos \varphi)} / c \dots e^{j(2\pi f r_m \sin \varphi \cos(\theta_n - \theta) + z_n \cos \varphi)} / c].$$

1.2 组合圆周阵宽带恒定束宽波束形成

由于信号频率范围为 $f \in [f_L, f_U]$,显然波束图在各个频率分量上不相等,为避免输出信号线性失真,就要设计恒定束宽波束形成器,其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,使得所有频率上的波束图均与设计频率 f_0 下的波束图(参考波束图)一致,即:

$$B(f, \theta) = |w_f A(f, \theta)| \equiv B(f_0, \theta), \quad (2)$$

式中 $B(f_0, \theta) = |w_{f_0} A(f_0, \theta)|$, $w_{f_0} = \text{diag}(w) A^H(f_0, \theta_s)$, $w = [w^1 \dots w^M]$ 为阵元阵幅加权向量。

利用平面波分解公式:

$$e^{jz \cos \Psi} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(z) (j)^n e^{-jn\Psi}. \quad (3)$$

将结构阵列响应向量中各分量表示成以下形式:

$$a(r_m, \theta_m, \varphi; f) = e^{j(2\pi f r_m \sin \varphi \cos(\theta_m - \theta) + z_n \cos \varphi) / c} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(2\pi f r_m \sin \varphi / c) (j)^n e^{-jn(\theta_m - \theta)} \cdot J_n(z_n / c) e^{-jn\varphi}. \quad (4)$$

令 $A(\theta, f) = \tilde{T}(f) \tilde{w}(\theta)$, 其中, $[\tilde{T}(f)]_{mn} = (2\pi f r_m \sin \varphi / c) (j)^n e^{-jn(\theta_m - \theta)}$, $\tilde{w}(\theta) = J_n(z_n / c) e^{-jn\varphi}$, $m = 1, \dots, M$; $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 取 $|n| = n_e = m_0/2 - 1$, 其中 m_0 为每上圆周上阵元的个数。再将 $\tilde{T}(f)$ 和 $\tilde{w}(\theta)$ 截断处理,得:

$$A(\theta, f) \cong T(f) w(\theta). \quad (5)$$

其中 $T(f)$ 为 $M \times (2n_e + 1)$ 矩阵; $w(\theta)$ 为 $(2n_e + 1) \times 1$ 的向量。

各频率分量上的波束形成向量设计为:

$$w_f = w_0 T. \quad (6)$$

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

$$B(f, \theta) = |w_f A(f, \theta)| \equiv |w_{f_0} T(f_0) [T(f)^H T(f)]^{-1} T^H(f) \times (f) T(f) w(\theta)| \equiv |w_{f_0} T(f_0) w(\theta)| \equiv |w_{f_0} A(f_0, \theta)|. \quad (7)$$

这样就能满足式(2)的要求,得到恒定束宽波束图。

2 组合圆周阵宽带恒定束宽波束形成

以图2所示的组合圆周阵为例,阵元数为 $M = N_{cir} \times N_l = 12 \times 2$,阵元间距 $d = d_s = \lambda_0/2$ ($\lambda_0 = c/f_0$),圆周之间的距离为 $d' = \lambda_0/2$ 。远场信号频率为 500 Hz ~ 1 000 Hz,以 $f_0 = 1 000$ Hz 为参考频率,声速为 1 500 m/s,选取 $n_e = 5$ 。图3所示为在参考频率上,基阵指向方向为 0° 的波束图。

把宽带划分成 20 个子带,每个子带的中心频率为 f_i , $i = 1, 2, \dots, 20$,分别求出每个子带的波束形成向量 $w_{f_i} = w_{f_0} T_{f_i}$,进而可求出每个子带的波束图,图4为组合圆周阵宽带恒定束宽波束图三维形式。

从图3和图4可看出,波束图导向了 0° 方向,主

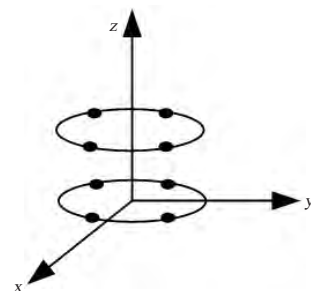


图2 组合圆周阵示意图

Fig.2 The sketch map of combinatorial circumferential array

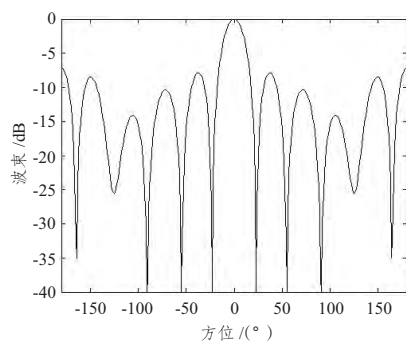


图 3 参考波束图

Fig. 3 The reference beam pattern

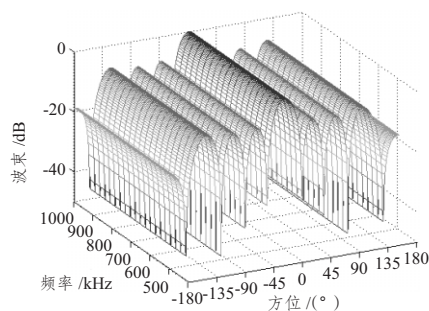


图 4 组合圆周阵宽带恒定束宽波束图

Fig. 4 The broadband constant beamwidth beam pattern of combinatorial circumferential array

波束在整个范围内表现出良好的恒定束宽特性,旁瓣级控制在 -10 dB 左右,波束的主瓣宽度为 $\Theta_{-3\text{dB}} \approx 15^\circ$ 。

将每个圆周的阵元数增加 1 倍,即 $M = N_{\text{cir}} \times N_l = 24 \times 2$,阵列其他参数不变,选取 $n_s = 11$,用同样的方法得到阵列的参考波束图及恒定束宽波束图分别如图 5 和图 6 所示。

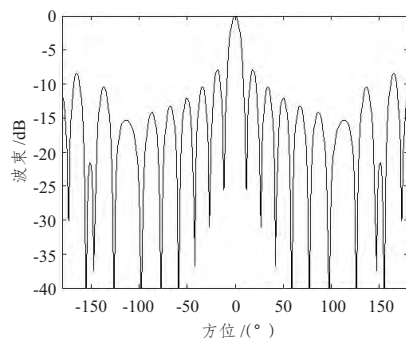


图 5 参考波束图

Fig. 5 The reference beam pattern

从图 5 和图 6 可看出,波束图导向了 0° 方向,主波束在整个范围内也表现出良好的恒定束宽特性,旁瓣级控制在 -10 dB 左右,波束的主瓣宽度为 $\Theta_{-3\text{dB}} \approx 5^\circ$ 。由图 5 和图 6 与图 3 和图 4 对比分析可知,增加阵元数,获得的波束图的主瓣更加尖锐,在近场条件下空间指向特性更佳。

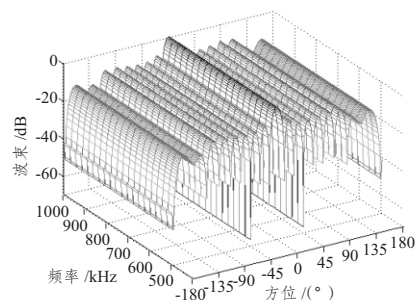


图 6 组合圆周阵宽带恒定束宽波束图

Fig. 6 The broadband constant beamwidth beam pattern of combinatorial circumferential array

3 结 语

本文建立了组合圆周阵接收信号模型,将阵列响应向量表示为贝塞尔函数的级数之和,并截断高阶项,利用使各频率点上的波束图与参考波束图一致的思想,从而得到恒定束宽波束图。通过计算机仿真得到组合圆周阵宽带恒定束宽波束图,仿真结果表明,本方法可以有效应用到组合圆周阵宽带恒定束宽波束形成器的设计中,效率高,且简单易实现。对增加阵元数的情况讨论结果显示,增加阵元数波束图主瓣更尖锐,在近场条件下空间指向性更好。波束优化问题成为下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 杨益新,孙超.任意结构阵列宽带恒定束宽波束形成新方法[J].声学学报,2001,26(1):55-58.
YANG Yi-xin, SUN Chao. A new method of broadband constant beamwidth beamforming for arbitrary geometry arrays[J]. Acta Acustica, 2001, 26(1): 55-58.
- [2] DORON E, DORON M A. Coherent wideband array processing[J]. In Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing, 1992(2):497-500.
- [3] 鄢社锋,马晓川.宽带波束形成器的设计与实现[J].声学学报,2008,33(4):316-326.
YAN She-feng, MA Xiao-chuan. Designs and implementations of broadband beamformers[J]. Acta Acustica, 2008, 33(4): 316-326.
- [4] WU R, MA Y, JIA R D. Array pattern synthesis and robust beamforming for a complex sonar system[J]. IEE Proceedings - Radar Sonar and Navigation, 1997, 144(6):370-376.
- [5] LOBO M, VANDENBERGHE L, BOYD S, et al. Applications of second-order cone programming[J]. Linear Algebra Application, 1998, 284(1-3):193-228.
- [6] WARD D B, KENNEY R A, WILLIAMSON R C. Theory and design of broadband sensor arrays with frequency invariant far-field beam patterns[J]. J. Acoust. Soc. Amer., 1995, 97(2):1023-1034.