

# 方向不变恒定束宽波束形成

幸高翔, 蔡志明

(海军工程大学电子工程学院 电子工程系, 武汉 430033)

## Steering-invariance constant beamwidth beamforming

XING Gao-xiang, CAI Zhi-ming

(Dept. of Electronics Engineering, Electronics Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033)

### 1 引言

通信、雷达和声纳的信号接收和发射阵列天线中有很多的样式,如均匀线阵、抛物面阵、圆阵、球阵、鱼雷的声基阵(平面阵、共形阵)等。为了更好地聚集能量,采用波束形成系统,使得基阵(或天线)只在某一方向具有较高的灵敏度,而抑制来自别的方向的噪声和干扰。在这些阵列中,当波束主瓣指向不同的方位时,主瓣宽度是变化的(圆阵除外),例如当主波束逐渐偏离阵的法线方向时,主瓣是逐渐变宽的<sup>[1,2]</sup>。这势必导致阵列的分辨性能下降。为保证阵的指向性能不变,要求主波束在不同的指向上始终保持波束宽度不变,即实现方向不变恒定束宽波束。

方向不变恒定束宽波束形成的实现方法可以类比于宽带频率不变恒定束宽波束形成<sup>[3,4]</sup>的实现方法,对不同的主瓣指向进行不同的变孔径处理或变权系数处理。本文在自适应加权控制旁瓣<sup>[4]</sup>的基础上,对自适应算法加以改进,使得改进后的算法能在给定主瓣宽度的情况下获得最低旁瓣,从而在一定的指向角范围内保持主瓣波束宽度的恒定,实现方向不变恒定束宽波束。

### 2 方向不变恒定束宽波束形成

文献[4]的工作是采用自适应加权方式控制旁瓣的形状,是预定好主旁瓣比后获得最窄主瓣的方法。现将[4]的算法加以改进,在给定主瓣宽度情况下获取最低旁瓣,以实现方向不变恒定束宽波束。

设有  $N$  元线阵,用  $d_j$  表示以波长为单位的第  $j$  个基元与第  $j+1$  个基元的间距。设远场单频平面波信号以角度  $\theta$  入射在基阵上,则基阵的输出信号为

$$\tilde{s}(t) = \sum_{j=1}^N w_j \tilde{x}_j(t) = \mathbf{w}^T \mathbf{x} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$  是权矢量,  $T$  代表转置,设信号幅度为  $A$ , 平面波信号频率为  $\omega_0$ , 则观察向量  $\mathbf{x} = [\tilde{x}_1(t), \tilde{x}_2(t), \dots, \tilde{x}_N(t)]^T = A e^{j\omega_0 t} \mathbf{u}$ ,  $\mathbf{u}$  是指向向量,其表达式为

$$\mathbf{u} = [f_1(\theta), f_2(\theta)e^{-j\phi_2(\theta)}, \dots, f_N(\theta)e^{-j\phi_N(\theta)}]^T \quad (2)$$

其中  $\phi_j(\theta) = 2\pi \left[ \sum_{k=1}^{j-1} d_k \right] \sin \theta$ , ( $j \geq 2$ ),  $f_j(\theta)$  表示基元的方向性。定义波束为

$$p(\theta) = |\mathbf{w}^T \mathbf{u}| \quad (3)$$

如果在某一方位加入一个干扰源,变化干扰源的强度,在对应位置上的波束旁瓣会有所变化,形成零陷。干扰越强,形成的零陷越深。 $N$  元自适应阵对干扰的响应不仅与干扰的强度有关,还与干扰源的数目有关<sup>[8]</sup>,当干扰源的数目小于  $N-2$  时,可以在波束图上形成零陷;当干扰源的数目大于  $N-2$  时,不能形成零陷,但会整体降低波束的旁瓣级。

自适应阵能根据干扰强度和方位自动调整权矢量,则最佳权矢量可以通过下式获得

$$\mathbf{w} = \mu \Phi_u^{-1} \mathbf{u}_d^* = \mu (\sigma^2 \mathbf{I} + \mathbf{A}_i^2 \mathbf{u}_i^* \mathbf{u}_i^T)^{-1} \mathbf{u}_d^* \quad (4)$$

式中,  $\mu$  为任意非零标量,  $A_i$  为干扰的幅度,设期望信号的方位角为  $\theta_d$ , 则  $\mathbf{u}_d$  可由(2)式令  $\theta = \theta_d$  获得,干扰的方位角为  $\theta_i$ ,  $\mathbf{u}_i$  由(2)式令  $\theta = \theta_i$  获得,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵,  $*$  代表复共轭。

应用这一思想,可以在旁瓣区域分布多个假定的干扰源,如  $M$  个(基元数目的 3-10 倍)。采用迭代的方式自动调整干扰源强度。当旁瓣高于预设的数值时,增大干扰强度;若旁瓣低于预设值时,适

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(国防 973)项目(No.5131603ZT4)

作者简介: 幸高翔(1978),男,江西高安人,汉族,博士生,讲师,研究方向为阵列信号处理,信息融合,水声信号处理

通信作者: 幸高翔, Email: nuexinggao@yahoo.com.cn

当减小干扰强度<sup>[4]</sup>。实验证明这样是可以有效地控制旁瓣的<sup>[4]</sup>。

现将这种技术应用于主瓣宽度控制上。与文献[4]所不同的是,要实现方位不变恒定束宽,不能预先设定主旁瓣比,但必须预先设定波束的主瓣宽度。可以采用指向某一方位的原始波束主瓣宽度作为参考,在其它指向上的波束宽度均以此参考宽度为准。此外,还应将文献[4]中的预设主旁瓣比改为可变的,本方法中采用每次迭代运算所获波束图的旁瓣的最小峰值。这样,旁瓣区其它峰值均会获得一定的压制,直到与最小峰值相等,从而实现在给定波束宽度条件下的最低均匀旁瓣。

如果在不同的主瓣指向上均采用参考波束宽度,在上述算法的运算下,能保证主瓣波束宽度不变,变化的仅是旁瓣高度。

### 3 应用实例

由于该算法属于波束图的数值综合方法,不便于给出波束宽度的数学表达式,现采用均匀线阵为例来验证算法的有效性。

设有一 10 元均匀线阵,阵元各向同性。采用主波束指向  $30^\circ$  处的主瓣区域宽度(锐度角)  $27^\circ$  为参考波束宽度,运用上述算法进行方位不变恒定束宽波束形成,得结果如图 1 所示,图 2 为 3dB 波束宽度随方位变化曲线。

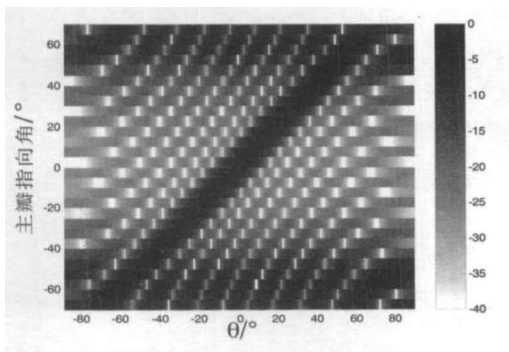


图 1 均匀线阵方向不变恒定束宽波束

Fig. 1 Steering-invariance Beam Pattern for ULA

从图 1 的分析也可知,在主波束指向  $\pm 60^\circ$  范围内时,主波束宽度是基本恒定的,而且在  $\pm 40^\circ$  左右的范围内,还能形成比较低的均匀旁瓣。当主瓣超出  $\pm 40^\circ$  的范围,旁瓣明显升高。这是因为常规波束当主瓣指向超出  $\pm 40^\circ$  的范围时,主瓣束宽变宽较快,当要将其限定在一定的宽度内时,旁瓣会明显升高;而且限定的主瓣宽度越窄,旁瓣越高。

分析图 2 可知,当主波束指向在  $\pm 60^\circ$  范围内,3dB 波束宽度的起伏不大。由表 1 可知,在主波束

指向  $\pm 60^\circ$  范围内,主波束 3dB 宽度变化值最大为  $1.77^\circ$ ,当限定在  $\pm 55^\circ$  范围内时,束宽变化值小于  $1^\circ$ ,仅为  $0.78^\circ$ 。而此时常规波束 3dB 宽度变化的最大值为  $11.3^\circ$ 。

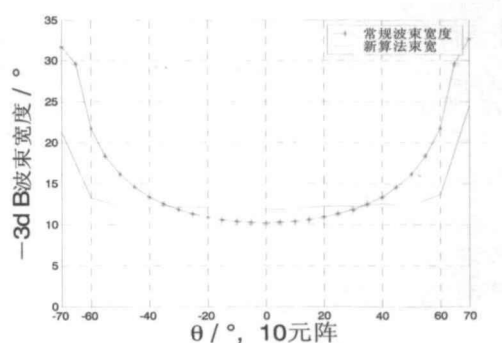


图 2 3dB 波束宽度随方位变化曲线

Fig. 2 3dB Beamwidth Curve with Different Direction of Arrival

由以上分析可知,自适应数值综合方法当主波束指向在  $\pm 55^\circ$  范围内时,可以较好地实现方位不变恒定束宽;在  $\pm 60^\circ$  范围内可以近似实现方位不变恒定束宽。

### 4 结论

将自适应加权的方法运用于波束图的主瓣控制研究上,在给定主瓣宽度的情况下获得最低均匀旁瓣。再将此数值综合法实现的主瓣控制技术应用于方位不变波束形成中,在一定的主瓣指向范围内形成方位不变波束图。该算法不仅适用于一维线阵,对任意结构阵列均具有适用性。

### 参考文献

- [1] Van Trees H L. Optimum Array Processing[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2002, 17-89.
- [2] Giuseppe A, Ryuji K. Chebyshev-Like Sidelobe Beam patterns with Adjustable Beamwidth and Steering-Invariance [J]. Proceedings for European Wireless 2002 (EW'02), Florence (Italy), 2002, 732-738.
- [3] 李贵斌. 声纳基阵设计原理 [M]. 第 1 版, 北京: 海洋出版社, 1995. 1-179.  
Li GuiBing. Principle for SONAR Array Design [M]. Beijing: Ocean Press, 1995. 1-179.
- [4] Olen C A, Compton R T. A Numerical Pattern Synthesis Algorithm for Arrays[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1990, 38(10): 1666-1676.