

旁瓣约束方向不变恒定束宽波束自适应综合

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)

摘要: 将自适应加权方法应用于波束图的主瓣控制研究, 提出了方向不变恒定束宽波束形成算法。在波束图旁瓣区域引入若干虚拟干扰源, 自适应调整干扰强度, 改变波束形状。以主瓣某一指向的波束宽度为参考, 以每次迭代后波束图最低旁瓣峰值与主瓣峰值的差作为下次迭代运算的预设主旁瓣比, 在保持主瓣区域宽度不变的情况下, 用自适应综合的方法获得不同主瓣指向上的最低均匀旁瓣。将该算法应用于均匀线阵和半球面阵, 均在 $\pm 60^\circ$ 的范围内得到了方向不变恒定束宽波束。研究表明, 该算法不仅适用于均匀线列阵, 也可用于任意结构阵列。

关键词: 波束形成; 恒定束宽; 方向不变; 自适应加权

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-02-0172-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.02.017

Synthesis of adaptive steering-invariant constant-beamwidth pattern with sidelobe constraints

XING Gao-xiang, CAI Zhi-ming

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

Abstract: An adaptive pattern synthesis algorithm for steering-invariance constant beamwidth is presented. Based on the use of adaptive weighting algorithm for main lobe controlling technique, the shape of beam pattern is changed by introducing some virtual interferers in the side lobe domain and adjusting the strength of interferers at the same time. Using the beamwidth of main lobe when directed to a certain direction as a reference and using the difference between the peak value of main lobe and the trough value of side lobe as a presetting side lobe level for next iterative, the presented algorithm can get minimum uniform side lobes on different main lobe directions while keeping the width of main lobe invariant. The algorithm is applied to uniform linear array and sphere array and gets the steering-invariance constant beamwidth beam pattern within $\pm 60^\circ$. It shows that the presented algorithm is suitable for not only uniform linear array, but also arbitrary structure array.

Key words: beamforming; constant beamwidth; steering-invariance; adaptive weighting

1 引言

波束形成是通信、雷达和声纳信号处理中的一个重要过程^[1]。非均匀阵列在信号接收和发射中占有很大的比例, 如抛物面阵天线、雷达末制导接收/发射天线、鱼雷的声基阵等。在这些抛物面阵或拱形阵中, 当波束主瓣指向不同的方向时, 主瓣宽度是变化的。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^[2,3]。这势必导致阵列的分辨性能下降。为保证阵的性能不变, 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应用领域包括拖曳线列阵的高分辨波束形成、合成孔

径声纳成像等。

从概念上分, 恒定束宽波束形成有两大方面的研究内容。一为宽带频率不变恒定束宽波束形成, 实现在信号的带宽内, 基阵对不同频率的输入信号具有相同的阵列响应, 即主瓣宽度在带宽内保持恒定不变的波束图。基本方法有变孔径法和变权系数法^[4,5]; 二为窄带方向不变恒定束宽波束形成, 即在波束的不同指向角上实现具有相同主瓣宽度的波束图。

方向不变恒定束宽波束形成是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。变权系数处理方法中, 类契比雪夫加权方法^[3]是采用改进的契比雪夫加权算法改变权系数, 在阵列的法线 $\pm 50^\circ$ 内近似实现方向不变的束宽恒定。但这种方法仅适用于均匀线阵或均匀圆阵^[3], 对其它阵型不具有通用性。本文在自适应加权控制旁瓣^[6-9]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, 从而在一定的主瓣指向角范围内保持主瓣波束宽度的恒定,

收稿日期: 2008-04-14; 修回日期: 2008-07-30

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(613660202)

作者简介: 幸高翔(1978-), 男, 江西高安人, 博士生, 讲师, 研究方向为水声信号处理、阵列信号处理。

通讯作者: 幸高翔, E-mail: nuexinggao@yahoo.com.cn

实现方向不变恒定束宽波束。该方法突破了类契比雪夫加权仅适用于均匀线阵或均匀圆阵^[3]的限制,能适用于任意阵型。

2 方向不变恒定束宽波束形成

2.1 波束宽度的变化趋势

常规波束图的主瓣波束宽度与主瓣的指向角有关,当主波束指向阵列的法线方向时,主波束宽度最窄;当主波束指向偏离法线方向时,主波束变宽,而且越偏离阵列法向,波束宽度越大。这种趋势可以从以下例子看出。以10元均匀线列阵为例,阵元各向同性,阵元间隔为工作频率所对应的半波长。 θ 为入射方向与阵列法线的夹角。波束3dB宽度随主波束指向变化的曲线参见图1,其中,带星号曲线为常规波束形成算法,实线为恒定束宽波束形成算法。波束宽度随入射角 θ 绝对值的增大而增大,这主要是因为波束宽度与阵列的有效孔径有关,有效孔径越大,波束宽度越小,反之亦然。

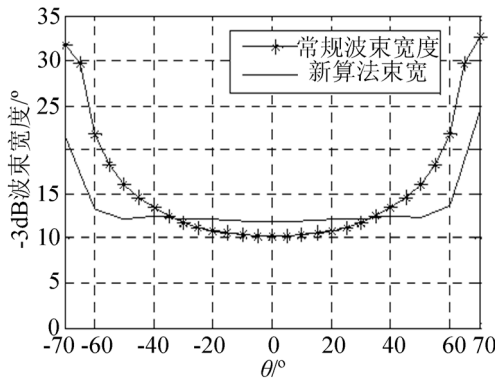


图1 3dB波束宽度随方向变化曲线
Fig.1 3dB beamwidth vs steering direction

要消除波束宽度的这种变化,可以考虑的方法有:(1)对应不同的入射角,设置不同的阵列孔径,使得有效孔径保持恒定,从而保持束宽恒定;(2)保持阵列孔径不变,在不同的入射角处设置不同的加权值,保持束宽恒定。其中,方法(1)对于实际的拱形阵或抛物面阵等相对复杂的阵形来说,设置不同的阵列孔径较为困难;而方法(2)由于保持了阵列孔径不变,变化的仅是加权值,易于实现。因此,本文采用自适应加权的方法实现方向不变恒定束宽波束。

2.2 自适应控制旁瓣基本原理

文献[5]的工作是采用自适应加权的方式控制旁瓣的形状,是预定好主旁瓣后获得最窄主瓣的方法。将[5]的算法加以改进,在给定主瓣宽度的情况下获取最低旁瓣,以实现方向不变恒定束宽波束。

设有一 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入射角 θ 到达基阵,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 代表矩阵的转置。设信号幅度为 A ,平面波信号频率为 ω_0 ,则观察矢量 $\mathbf{x} = [\tilde{x}_1(t), \tilde{x}_2(t), \dots, \tilde{x}_N(t)]^T = A e^{j\omega_0 t} \mathbf{u}$, $\mathbf{u}$ 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。阵的声压波束图为:

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

定义主波束左边第一个零点和右边第一个零点分别为 θ_L 和 θ_R 。定义区域 $[\theta_L, \theta_R]$ 为主瓣区域, $[\theta_L, \theta_R]$ 之外的区域为旁瓣区域。观察式(3)可知,要控制波束形状,仅需改变权矢量。

自适应阵可根据干扰强度和方向自动调整权矢量。最佳权矢量可以通过式(4)获得^[6]:

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

式中, μ 为任意非零标量, Φ_u 为干扰和噪声的总协方差矩阵, A_i 为干扰的幅度。设期望信号的方向角为 θ_d ,则其指向向量 $\mathbf{u}_d$ 可由式(2)令 $\theta = \theta_d$ 获得;干扰的方向角为 θ_i ,则干扰指向向量 $\mathbf{u}_i$ 由式(2)令 $\theta = \theta_i$ 获得, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵,*代表复共轭。

如果在某一方向加入一个干扰源,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^[6]。

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^[10]。当干扰源少于 $N-2$ 时,可以在波束图上形成零陷;当干扰源多于 $N-2$ 时,虽不能形成零陷,但会整体降低波束的旁瓣级。

根据这一原理,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,适当减小干扰强度^[6]。实验证明这样可以有效控制旁瓣。

2.3 方向不变恒定束宽波束形成算法

要实现方向不变恒定束宽波束图,需要预先设定波束的主瓣宽度。采用指向某一方向的原始波束主瓣宽度作为参考宽度,在其它指向上的波束宽度均以此参考宽度为准。可变主旁瓣比采用每次迭代运算所获波束图旁瓣的最小峰值^[7]。这样,旁瓣区其

它峰值均会得到一定的压制,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,则运用上述算法,可保证主瓣波束宽度不变,变化的仅是旁瓣高度。

自适应综合的方向不变恒定束宽波束形成算法的控制过程具体可以分为以下几个步骤:

第一步,初始化过程。令 $k=0$, k 为迭代次数。在整个观察角内均匀分布 M 个假定的干扰源,方向分别为 $\theta_{im}, m=1, \dots, M$, 强度设为 0。采用式(2)~(4)形成无干扰时的初始化波束,波束峰值归一化为 1;

第二步,确定初始化波束的主瓣区域 $[\theta_L(k), \theta_R(k)]$, 并以此宽度(即锐度角)作为参考波束宽度;

第三步,计算旁瓣区域最小峰值,并将其设定为第 k 次迭代(初始 $k=0$)的期望波束旁瓣级 $D(\theta_{im}, k)$, 期望得到均匀旁瓣;

第四步,开始迭代,自适应地调整干扰源的强度。第 $k+1$ 次迭代时的干扰源强度为:

$$\xi_{im}(k+1) = \begin{cases} 0, & \theta_{im} \in [\theta_L(k), \theta_R(k)] \\ \max[0, \Gamma_{im}(k)], & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\Gamma_{im}(k) = \xi_{im}(k) + K[p(\theta_{im}, k) - d(\theta_{im}, k)]$, K 为一常量因子,称为迭代增益; $d(\theta_{im}, k)$ 表达式如下:

$$d(\theta_{im}, k) = \frac{1}{10^{D(\theta_{im}, k)/20}} \quad (6)$$

得到 $\xi_{im}(k)$ 后, 式(4)中的 Φ_u 成为

$$\Phi_u = \sigma^2 \left[I + \sum_{m=1}^M \xi_{im}(k) \mathbf{u}_{im}^* \mathbf{u}_{im}^T \right]$$

以式(4)计算得到的权矢量代入式(3), 得到 $p(\theta, k)$ 。重新确定新得到的波束旁瓣区域最小峰值 $D(\theta_{im}, k)$ 。如此循环, 直到 $p(\theta, k)$ 的旁瓣均匀。

第五步, 在不同指向上, 采用参考波束宽度 $[\theta_L(k), \theta_R(k)]$, 重复步骤一、三、四, 获得不同指向上的主瓣宽度相同的波束图, 从而实现方向不变恒定束宽波束。

3 应用实例

以下采用均匀线阵和立体阵为例来验证算法的有效性。

3.1 一维线阵情况

采用 10 元均匀线阵, 阵元各向同性。采用主波束指向 30° 处的主瓣区域宽度(锐度角) 27° 为参考波束宽度, 运用上述算法进行方向不变恒定束宽波束形成, 得结果如图 2 所示。

由图 2 可见, 在主波束指向 $\pm 60^\circ$ 范围内时, 主

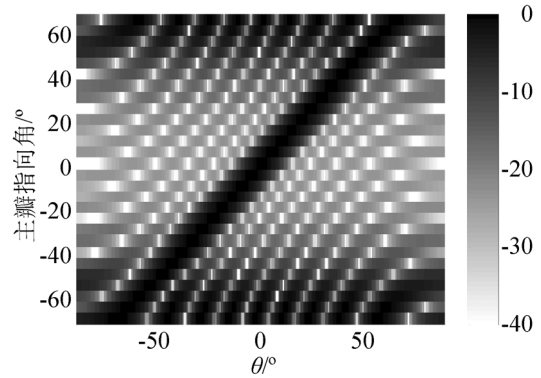


图 2 ULA 方向不变恒定束宽波束
Fig.2 Steering-invariant beam pattern for ULA

波束宽度是基本恒定的, 并且在 $\pm 40^\circ$ 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。例如当主瓣指向 0° 处, 主瓣区域宽度为 24° , 将此宽度作为参考进行恒定束宽波束形成, 同样可以获取方向不变恒定束宽波束图。但是恒宽波束图中当主瓣指向超出 $\pm 40^\circ$ 的范围时, 旁瓣比以主瓣指向 30° 处的锐度角为参考宽度时升高了更多。

分析图 1 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。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° , 当限定在 $\pm 55^\circ$ 范围内, 束宽变化值小于 1° , 仅为 0.78° 。而此时常规波束 3dB 宽度变化的最大值为 11.3° 。

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, 可以较好地实现方向不变恒定束宽; 在 $\pm 60^\circ$ 范围内可以近似实现方向不变恒定束宽。

3.2 立体阵情况

为说明本算法适用于任意阵形, 不失一般性, 选取半球型阵列为例进行方向不变恒定束宽波束形成。工作频率 $f=45 \text{ kHz}$, 半球面阵半径 3λ , 其中 λ 为 f 所对应的波长, 阵型示意图如图 3 所示, 取半球面阵的三排基元参加工作, 其中大圆上排列有 14 个基元, 紧邻的小圆上各排列 13 个基元, 共 40 个基元参加工作。阵元各向同性。采用主波束指向 30° 处的主瓣区域宽度 19° 为参考束宽, 运用上述算法进行方向不变恒定束宽波束形成, 得结果如图 4 所示, 图 5 为 3dB 波束宽度随方向变化曲线。

从图 4、图 5 的分析可知, 自适应综合的方法应用于半球面阵, 能得到方向不变波束图。半球面阵方向不变波束图的旁瓣整体偏低, 这是因为随着

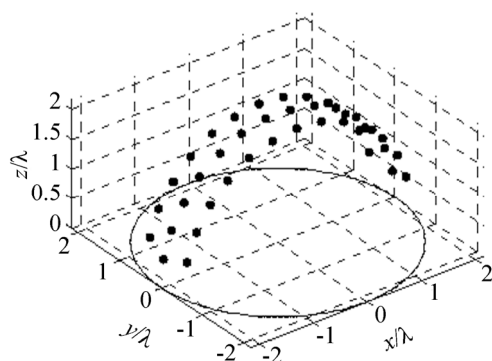


图3 半球面阵示意图

Fig.3 Sketch of semi-spherical surface array

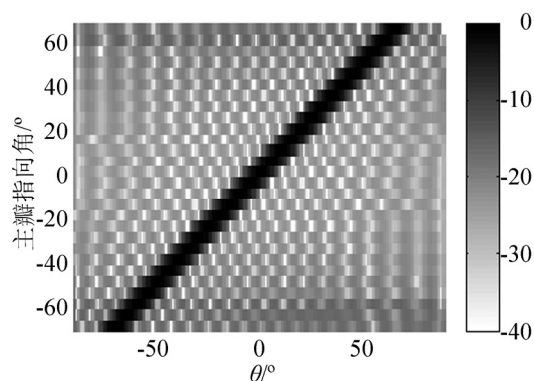


图4 半球面阵方向不变恒定束宽波束

Fig.4 Steering-invariant beam pattern for semi-spherical surface array

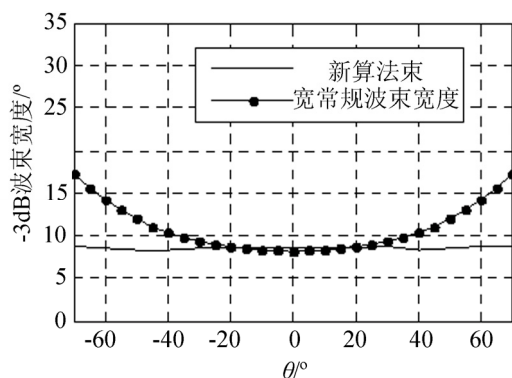


图5 半球面阵 3dB 波束宽度随方向变化曲线

Fig.5 3dB beamwidth vs steering direction for semi-spherical surface array

主波束的偏转,阵列孔径的减小幅度相对于线阵来说要小。但影响还是比较明显的,如图4所示,当主瓣超出 $\pm 60^\circ$ 范围后,旁瓣明显升高,这就是孔径

变小带来的影响。波束宽度的变化能控制在 1° 范围内。

对立体阵的分析表明,本算法不仅适用于一维线阵,而且对任意结构阵列具有适用性,突破了类契比雪夫加权^[3]仅适用于均匀线阵的限制。

4 结论

将自适应加权的方法应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向不变波束形成中,在一定的主瓣指向范围内形成方向不变波束图。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]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. Inc, 2002. 17-89.
- [2] 张贤达, 保铮. 通信信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 258-420.
ZHANG Xianda, BAO Zheng. Communication signal processing [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. 258-420.
- [3] Giuseppe A, Ryuji K. Chebyshev-like sidelobe beampatterns with adjustable beamwidth and steering-invariance [C]. Proceedings for European Wireless 2002 (EW'02), Florence (Italy), 2002, 732-738.
- [4] 李贵斌. 声纳基阵设计原理[M]. 北京: 海洋出版社, 1995. 1-179.
LI Guibing. Principle of sonar array design[M]. Beijing: Ocean Press, 1995. 1-179.
- [5] 杨益新, 卓颖. 基于恒定束宽波束输出的宽带相干源高分辨测向[J]. 声学技术, 2001, 22(1): 7-9.
- [6] 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.
- [7] 幸高翔, 蔡志明. 方向不变恒定束宽波束形成[J]. 声学技术, 2007, 26(5, Pt.2): 209-210.
Xing Gaoxiang, CAI Zhiming. Steering-invariance constant beamwidth beamforming[C]. Technical Acoustics, 2007, 26(5, Pt.2): 209-210.
- [8] Zhou P Y, Ingram M A, Anderson P D. Synthesis of minnimax sidelobe for arbitrary arrays [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1998, 46(11): 1759-1760.
- [9] 向大威, 顾亚平. 自适应声干扰抵消系统[J]. 声学技术, 1996, 15(1): 10-11.
- [10] Compton Jr R T. Adaptive arrays-concepts and performance[M]. Englewood Cliff, NJ: Prentice-Hall, 1988, 75-153.