

# 宽带恒定束宽波束形成器的设计与实现

张保嵩 马远良

(西北工业大学声学工程研究所 西安 710072)

1998年8月24日收到

**摘要** 本文提出了一种设计宽带恒定束宽波束形成器的方法。这对应用于海底探测和分类问题的声纳系统来说是十分重要的。对于给定频带宽度的信号,选择一定数量的频率点来表达其频率响应。对于一个给定的频点,可以通过现有方法导出满足恒定束宽要求的加权矢量,例如对于一个线列阵,可用切比雪夫多项式得到其加权矢量。因此对于一个具有 $N$ 个阵元的宽带阵,如果选择 $M$ 个频率点,可以得到一个 $N \cdot M$ 的加权矩阵。这个矩阵的每一行代表一个阵元的频率响应,而这个频率响应可以由采用模型参考自适应方法设计的FIR滤波器来实现。这样一组 $N$ 个FIR滤波器的输出之和就是波束形成的输出,它可以很方便地通过DSP硬件来实现。本文给出了一个使用这种方法设计的例子,结果是令人满意的。

**关键词** 宽带恒定束宽波束形成器, FIR滤波器, 模型参考自适应方法

## Beamformer for broadband constant beamwidth through FIR and DSP implementation

Zhang Baosong Ma Yuanliang

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

**Abstract** The paper presents a method to design a beamformer for broadband constant beamwidth. Such a beamformer is important in sonar systems for sea bottom observation and classification applications. For a given frequency band, a number of frequency points are chosen to represent the response. For each frequency point a beamforming weighting vector can be deduced to satisfy a given beamwidth requirement by existing methods, for example the Chebyshev shielding coefficients can be deduced for a linear array. Therefore, for a broadband array of  $N$  elements and for  $M$  chosen frequency points, a  $N \cdot M$  weighting matrix in which each row represents a frequency response of an array element, which can be satisfied by a FIR filter designed by the model-reference adaptive technique. The sum of outputs from a bank of  $N$  FIR filters provides a beamformed output and so it is very handy to be implemented by DSP hardware. A design example shows that the results are satisfactory.

**Key words** Beamformer for broadband constant beamwidth, FIR filter, Model-reference adaptive technique

# 1 引言

在宽带信号处理中，一种最常用的方法是利用目标回波的频谱特性进行目标检测和分类。为了确保其准确性，要求所发射宽带信号的不同频率分量均匀地照射在目标上，同时宽带回波信号能够被不失真地接收。基于此，波束形成器应该是宽带恒定束宽波束形成器。因此，很有必要研究宽带恒定束宽波束形成器。近些年来，人们研究很多的是窄带波束形成算法<sup>[1-8]</sup>。所有这些方法最终都是求解出满足一定性能准则的加权系数。我们提出的问题是能否将这些窄带波束形成算法应用于宽带恒定束宽波束形成器？答案是肯定的。我们知道，对于一组加权系数，对于不同的频率，一个线列阵的波束宽度是不同的（假设，波束方向不变）。说得更准确一点，波束宽度随频率的增大而减小。为了使波束宽度在给定的频带范围内保持恒定，对于不同的频率，我们利用现有的窄带波束形成方法求出相应的加权系数，使其满足恒定束宽的要求，然后设计出满足特殊要求的 FIR 滤波器组，使宽带恒定束宽的波束形成得以实现。在本文中，我们设计了一个宽带恒定束宽波束形成器，仿真结果表明这种方法是可行的。

# 2 设计原理

考虑一个有  $N$  个阵元的直线阵，如图 1 所示  $f_j(\theta)$  代表第  $j$  个阵元的方向图， $d_j$  代表第  $j$  个阵元和第  $j+1$  个阵元间的距离。假设一个单频 (CW) 信号从  $\theta$  角方向入射到该阵上，这里  $\theta$  角是从垂射方向测量的，如图 1 所示。

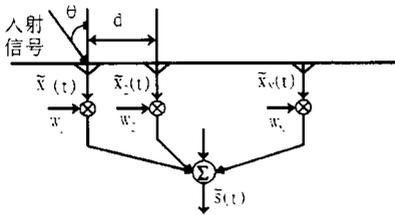


图 1 有  $N$  阵元的线列阵

设  $\tilde{x}_j(t)$  是第  $j$  个阵元的接收 (解析) 信号，我们定义信号向量  $X$  为

$$X = [\tilde{x}_1(t), \tilde{x}_2(t), \dots, \tilde{x}_N(t)]^T, \quad (1)$$

这里上标  $T$  代表转置。阵列输出信号  $\tilde{s}(t)$  是每个  $\tilde{x}_j(t)$  乘以复加权  $w_j$ ，然后相加，

$$\tilde{s}(t) = \sum_{j=1}^N w_j \tilde{x}_j(t) = W^T X, \quad (2)$$

这里  $W$  是加权向量，

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T, \quad (3)$$

如果到达是 CW 或窄带信号，其中心频率是  $\tilde{\omega}_0$ ， $X$  可表达为

$$X = A e^{j\tilde{\omega}_0 t} U, \quad (4)$$

这里  $A$  是信号的幅度， $e^{j\tilde{\omega}_0 t}$  是时间因子， $U$  是包含阵元间相移  $\phi_j(\theta)$  和阵元方向图  $f_j(\theta)$  的向量，

$$U = [f_1(\theta), f_2(\theta)e^{-j\phi_2(\theta)}, f_3(\theta)e^{-j\phi_3(\theta)}, \dots, f_N(\theta)e^{-j\phi_N(\theta)}]^T, \quad (5)$$

这里

$$\phi_j(\theta) = 2\pi \left[ \sum_{k=1}^{j-1} d_k \right] \sin \theta, \quad j \geq 2 \quad (6)$$

综合 (4) 和 (2) 得到阵列输出  $\tilde{s}(t)$ ，

$$\tilde{s}(t) = A e^{j\tilde{\omega}_0 t} W^T U. \quad (7)$$

定义阵列的幅度波束图为

$$P(\theta) = |W^T U|. \quad (8)$$

对于给定频率，其波束图可由上式得出。对于宽带信号，则需选择一定数量的频率点来进行波束设计。对于一个给定的频点，可以通过现有方法导出满足恒定束宽要求的加权矢量，例如对于一个线列阵，可以得到其 Dolph-Chebyshev (DC) 加权系数。因此对于一个具有  $N$  个阵元

的宽带阵，如果选择  $M$  个频率点，可以得到一个  $N \cdot M$  的加权矩阵。这个矩阵的每一行代表一个阵元的频率响应，而这个频率响应可以由采用模型参考自适应方法设计的 FIR 滤波器来实现。这样一组  $N$  个 FIR 滤波器的输出之和就是波束形成的输出，图 2 表明了这个过程 [13]。

这个图只代表波束主瓣方向垂直于线列阵时的情况。如果波束方向不垂直于线列阵，那么需在每个阵元的后面施加一定的时延补偿（图中没有画出）。如果想形成多波束，那么需在每个阵元后加以多抽头延迟线。

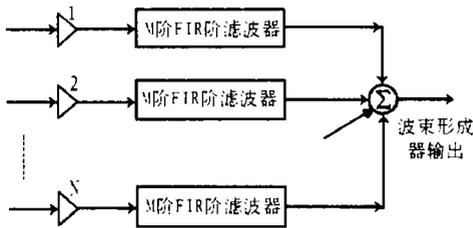


图 2 宽带波束形成滤波器结构

下面讨论设计 FIR 滤波器的问题。这里采用了模型参考自适应法 [10-12]。如图 3 所示，信号源由  $M$  个具有不同频率的正弦信号组成，它既是自适应 FIR 波器的输入，也是伪滤波器的输入，伪滤波器描述了满足束宽要求的设计指标。信号源的组成由下式表示：

$$x(n) = \sum_{i=1}^M c_i \sin(2\pi f_i n), \quad (9)$$

伪滤波器的输出，也就是期望的自适应 FIR 滤波器的输出为

$$d(n) = \sum_{i=1}^M a_i c_i \sin(2\pi f_i n + \theta_i), \quad (10)$$

这里  $a_i$  是在频率  $f_i$  处的幅度响应， $c_i$  是在频率  $f_i$  处的正的代价因子 ( $0 < c_i \leq 1$ )。  $c_i$  越大，在频率  $f_i$  处就越接近于满足要求。注意，在这里，FIR 滤波器的相移为零。自适应 FIR 滤波器采用 LMS 算法。当其收敛后，就得到一组稳定的加权系数。在  $N$  个阵元后以这些系数为其冲击响应的  $N$  个 FIR 滤波器在要求的频

带范围内可满足束宽恒定的要求。

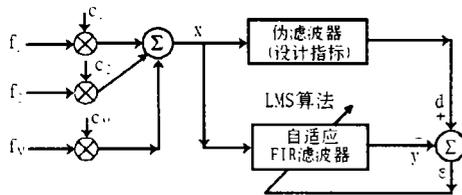


图 3 由模型参考自适应法实现 FIR 滤波器

### 3 关于加权方法的讨论

在现有的加权方法中，比较简便有效的方法就是 DC 束控方法，对于均匀线列阵而言，DC 束控方法可以产生平坦的旁瓣，能够很好地满足要求。但是 DC 束控方法也有一定的局限性，对于单元指向性存在差异的情况，DC 束控方法就不再能产生平坦的旁瓣。我们设计宽带恒定束宽波束形成器时，要求除在各频点上满足恒定束宽的要求外，还应使其旁瓣尽量平坦。凹槽噪声场法可以很好地满足我们的要求 [9]，它可以适用于很宽广的条件，阵元非各向同性、阵元间隔非均匀、以及阵形非直线的阵都可采用这种方法来设计满足一定要求的加权系数。例如，有一个 25 阵元阵列，其尺寸结构为：

$$dd = 1500/20000 \quad (11)$$

$$d_i = dd(i-1) + (dd/32)(i-1)^2/i \quad (12)$$

$$(1 \leq i \leq N)$$

这里  $dd$  是频率为 20000Hz 时的波长， $d_i$  是第  $i$  个阵元和第 1 个阵元的距离。单元指向性为：

$$b(\theta) = 20 \lg \left| \frac{\sin[(\pi L/\lambda) \sin(\theta)]}{(\pi L/\lambda) \sin(\theta)} \right| \quad (13)$$

式中  $\theta$  为入射波与线阵垂线间的夹角， $\lambda$  是信号的波长， $L$  是阵元的长度，这里， $L=7.2\text{cm}$ 。假设发射的信号频率为 18000Hz，则  $\lambda=8.33\text{cm}$ ，希望波束定向于 10 度方向，并产生 -50dB 的旁瓣级，图 4 是 DC 方法画出的波束，图 5 是用凹槽噪声场法画出的波束，可以看出，凹

槽噪声场法要比 DC 法效果好。

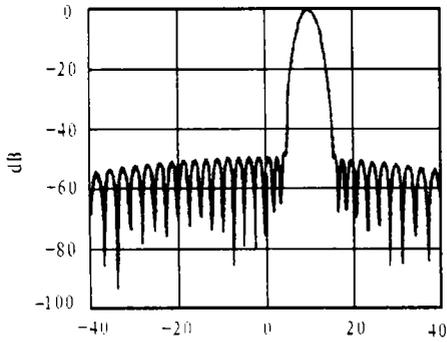


图 4 由 DC 方法画出的波束

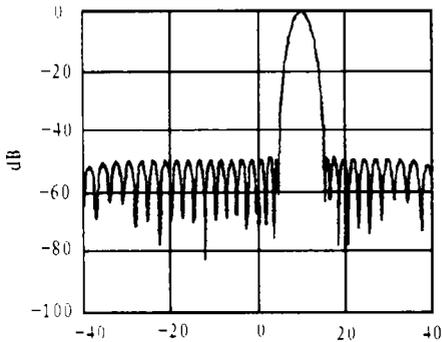


图 5 由凹槽噪声场法画出的波束

## 4 设计实例

下面的例子表明了宽带恒定束宽波束形成器设计的过程，利用上面的 25 阵元的阵列，宽带信号频率变化范围是 10kHz-18kHz，带宽为 53.3%，假设波束定向于 10 度方向。在这个例子里，等间隔地选择 9 个频点。表 1 给出了波束形成加权系数均为 1 时的频率束宽对应关系。

假设我们想使束宽在这个频带内恒定为  $4.2^\circ$ 。首先对不同的频率采用凹槽噪声场法求出满足恒定束宽要求的加权系数，图 6 给出了各个频率分量形成的束宽恒定的波束。表 2 给出了图 6 中频率束宽对应关系。

接下来设计 FIR 滤波器，在此之前应先考虑延迟的问题。因为波束方向需定向于 10 度方向，因此需要在每个阵元后施加定向延迟。

定向延迟由两部分组成，一部分由整数长度的延迟线实现，另一部分延迟由滤波器实现。由延迟线实现的延迟为采样周期的整数倍，由滤波器实现的延迟是延迟线补偿后的剩余部分，是一个小于采样周期的值，滤波器要实现这部分补偿，要求设计的滤波器具有权值非对称的特性。

在本文中选择了滤波器阶数为 32 阶，这是通过仿真确定的，而且它可以方便地通过 DSP 硬件来实现。通过 LMS 算法得到滤波器的系数。

图 7 给出了经过滤波器后各个频率分量形成的波束。表 3 给出了图 7 中频率束宽对应关系。表中，频率的单位为 kHz，束宽的单位为度。

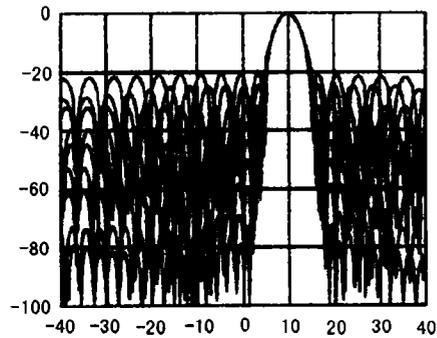


图 6 束宽恒定的波束

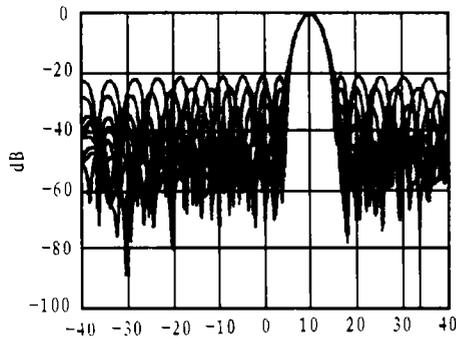


图 7 各个频率分量形成的波束

下面利用宽带信号来检验所设计的宽带恒定束宽波束形成器。假设所接收的是线形调频信号，信号带宽为 8kHz(10kHz-18kHz)，其波形如图 8 所示。图 8 中横坐标的单位为 ms。

使用这种宽带信号形成的波束如图 9 所示, 它的束宽为  $4.2^\circ$ , 由此可以看出, 通过这种方法实现宽带恒定束宽波束形成器是可行的。

表 1 加权系数为 1 时的频率束宽对应关系

频率 (kHz)	10	11	12	13	14	15	16	17	18
束宽 ( $^\circ$ )	4.01	3.64	3.34	3.08	2.86	2.68	2.50	2.36	2.22

表 2 图 6 中频率束宽对应关系

频率 (kHz)	10	11	12	13	14	15	16	17	18
束宽 ( $^\circ$ )	4.26	4.16	4.19	4.17	4.12	4.15	4.15	4.19	4.14

表 3 图 7 中频率束宽对应关系

频率 (kHz)	10	11	12	13	14	15	16	17	18
束宽 ( $^\circ$ )	4.28	4.17	4.18	4.19	4.11	4.18	4.20	4.25	4.10

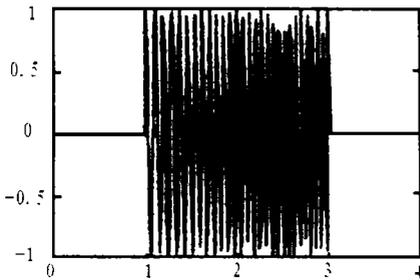


图 8 线性调频信号波形

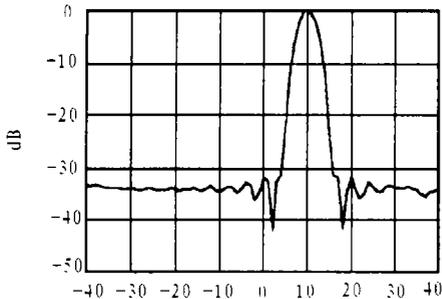


图 9 宽带信号形成的波束

验, 结果表明这种方法是可行的。

致谢 对于孙超教授和丁炜副教授的帮助, 作者在此表示深深的谢意。

### 参 考 文 献

- 1 Villeneuve A T. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Oct. 1984, **AP-32**: 1089-1093.
- 2 Dufort E C. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Aug. 1989, **37**: 1011.
- 3 Shiann-Jeng Yu, Ju-Hong. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, May. 1989, **42**: 676-689.
- 4 Elliott R S. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Jan. 1975: 100-107.
- 5 Elliott R S. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Jan. 1976: 76-83.
- 6 Siney P. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Sep. 1976, **AP24**: 585-598.
- 7 Olen C A, Compton R T. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Oct. 1990, **38**: 1666-1676.
- 8 Stegen R J. *Proc. IRE.*, Nov. 1953, **41**: 1671-1674.
- 9 马远良. 中国造船, 1984, **87**(4): 78-95.
- 10 Zhang Y W, Ma Y L. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Oct. 1994, **19**: 635-638.
- 11 Compton R T. *Adaptive Antennas Concepts and Performance*. Englewood Cliffs, NJ: PrenticeHall, 1985.
- 12 Widrow B. *Adaptive Signal Processing*. Englewood Cliffs, NJ: PrenticeHall, 1985.
- 13 Frost O L. *Proceeding of IEEE*, Aug. 1972, **60**: 926-935.

## 5 结论

本文描述了一种设计宽带恒定束宽波束形成器的方法, 它可以很方便地通过 DSP 硬件来实现。给出了详细的设计步骤和一个设计实例。对于用这种方法设计的宽带恒定束宽波束形成器, 用宽带线性调频信号进行了仿真检