

# 空间重采样法恒定束宽波束形成器设计

智婉君 李志舜

(西北工业大学航海工程学院)

**【摘 要】**本文视均匀线列阵为连续线阵的均匀离散采样,将宽带方位估计中的空间重采样思想用到恒定束宽波束形成器设计中,并从滤波器设计的观点出发,将阵元权系数等效为空间滤波器的脉冲响应,提出用恢复公式计算不同频率所对应的阵元权系数,从而利用频域波束形成的方法完成恒定束宽波束形成器设计。

**关键词:** 空间重采样 恒定束宽 空间滤波器 波束形成

## 一、引 言

在基阵信号处理中,常常需要进行宽带信号处理。我们知道,一定频率的信号通过基阵时,基阵等效于一空间滤波器,基阵的方向性函数即是空间滤波器的频率响应函数。对于一个已经设计好的基阵,不同频率的信号通过基阵线性系统时,它所形成的滤波器频率响应函数是不一样的,只有空间滤波器的中心频率(即波束极值)处的响应相同,也就是说,当波束主轴对准目标时,基阵对信号的响应特性不会随频率而改变。因此,对于宽带信号,只有当波束主轴对准目标时才不会产生信号失真。但当目标在波速宽度内(半功率点以内)的非主轴方向出现时,随频率的增加,信号能量将损失愈来愈大。因此,通过基阵的宽带信号会产生波形畸变,特别是信号带宽越大,偏离波束主轴越远,影响越明显。这对于信号检测,参量估计和目标识别等信号处理均会产生不良影响。

恒定束宽的概念就是在解决宽带信号通过基阵系统产生波形畸变这一问题时提出的。所谓恒定束宽,就是指在信号带宽内,基阵波束图主瓣宽度保持恒定。目前恒定束宽的设计方法主要基于两种思想:1,随频率变化改变基阵有效孔径;2,随频率变化改变阵元权系数。

例如,乘幂恒定束宽设计方法<sup>[1]</sup>,其设计思想是:在改变频率时对一给定的基础阵(在上边频条件下设计)适当增加阵元个数并赋予一定权系数。而阵元个数及权系数按乘幂关系变化的。又如线性组合恒定束宽设计<sup>[1][2]</sup>,是在带宽的低频和高频处分别设计一个阵,使两阵在各自的频率点的波束图有相同的束宽,而其它频率点的波束是两个阵的线性组合。这种方法的实质是随入射波频率不同,采用不同的阵元参加工作,并对参加工作的阵元采用不同的权系数。这两种方法都属于组合阵的方法,即不同频率对应不同的子阵,整个基阵系统是这些子阵的组合。组合阵方法不仅实现起来复杂,而且存在两个问题:1,由于实际情况的限制,阵元间隔不可能太小,阵元数目不可能太多,而频率连续变化,所以这种方法只能近似满足要求;2,基阵尺寸也限制了信号带宽。

另一类方法对基阵不作任何调整,所有阵元都参加工作,仅用数学方法计算不同频率对应的权系数,以形成恒定束宽波束。求权系数最为普遍的方法是基于一最小二乘原理解方程组,对任一频率,都可以求得一组权,用这组权系数形成的波束与基准波束的误差达到最小。对均匀线列阵,不可以基于傅立叶变换的关系,采用数值积分方法<sup>[1]</sup>。这两种方法的运算量都较大。

本文提出一种恒定束宽条件下,随频率变化的阵元权系数的计算方法。其最大的特点是运算简单。既克服

了组合阵方法的不足（无需真正布放很多阵元，只是假设存在很多虚拟子阵），又免去作大量的矩阵运算或数值积分（直接给出计算公式）。

## 二、空间滤波器概述

我们首先定义空间频率。对沿  $e$  方向传播的平面波可表示为  $e^{j(\omega t - \omega \langle r, e \rangle / c)}$ ,  $e$  是传播方向的单位矢量,  $r$  是空间一阵元的坐标矢量,  $\langle r, e \rangle$  表示内积。

由于  $\omega t - \omega \langle r, e \rangle / c = \omega t - \omega \frac{\langle r, e \rangle}{|r|} \cdot \frac{|r|}{c} = \omega t - \omega_e \tau$ , 我们定义  $\omega_e = \omega \frac{\langle r, e \rangle}{|r|}$  为空间频率。这样, 沿  $e$  方向传播

的平面波可以表示为  $e^{j(\omega t - \omega_e \tau)}$ , 具有空间频率  $\omega_e$  的声波经基阵系统后输出  $\left( \sum_{i=1}^M a(i) e^{-j \omega_e \tau_i} \right) e^{j \omega t}$ , 定义空间

滤波器频率响应:

$$H(\omega_e) = \sum_{i=1}^M a(i) e^{-j \omega_e \tau_i} \quad (1)$$

(1) 式实际就是基阵方向性函数的另一种表达形式。声波传播方向的改变（即  $\omega_e$  改变），就会导致基阵输出的变化。

考虑一个含有  $M$  个阵元的均匀线列阵，阵元间距  $d$ ，声波入射方向与基阵法线夹角  $\alpha$ ，如图 1 所示。以左边第一阵元为参考，则相应的空间滤波器响应是

$$H(\omega_\alpha) = \sum_{i=1}^M a(i) e^{-j \omega_\alpha \tau_i} = \sum_{i=1}^M a(i) e^{-j(\omega \sin(\alpha))(d(i-1)/c)} \quad (2)$$

由于 (2) 式可以看出空间频率与时间频率的关系。空间滤波器的频率响应是时间频率与入射方向的二维函数。对于一宽带信号来讲，基阵系统形成的空间滤波器的频率响应如图 2 所示。

可见，对同一入射方向的信号，空间滤波器随时间频率不同而有不同的响应值，这就使得宽带信号通过基阵系统时频谱发生畸变。由于阵元权数的变化直接影响空间滤波器的频率响应函数，所以我们希望能通过改变阵元权系数以获得所需的恒定束宽。

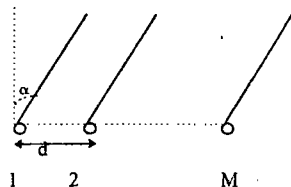


图 1

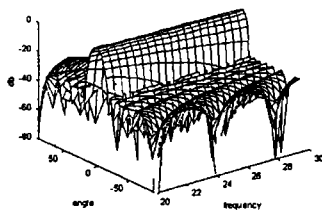


图 2

### 三、空间重采样及阵元权系数计算

仔细考察 (2) 式, 令  $\varphi = \omega \sin(\alpha) d / c$ , 简化之, 则  $H(\varphi) = \sum_{i=1}^M a(i) e^{-j\varphi(i-1)}$

我们发现,  $H(\varphi)$  与  $a(i)$  成一对傅氏变换, 由于  $H(\varphi)$  代表空间滤波器的频率响应。所以我们称  $a(i)$  为空间滤波器的脉冲响应。这样定义后各个参数具有明显的物理意义:  $d/c$  是采样间隔<sup>1</sup>,  $\varphi$  是空间数字频率。

当基阵确定后, 采样间隔一定, 因此对同一入射方向的宽带信号, 数字频率  $\varphi$  不同, 产生不同的空间滤波器频率响应。当  $M$  一定时, 如果有  $\omega d = \text{常数}$ , 就会产生不同时间频率的信号在同一方向的相同响应。

考虑到采样定理和阵元间的相关性, 一般要求阵元间距为信号频率所对应的半波长。如果基阵对某一时间频率  $\omega_0$ , 有  $d = \frac{\lambda_0}{2}$ , 我们称  $\omega_0$  为基准频率, 那么对另一时间频率  $\omega_x$ , 有  $d = \frac{\lambda_x}{2} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda_x}$ , 可见基阵已经等效地改变了采样间隔 (阵元间距不等于该频率所对应的半波长)。空间重采样就是简单地调整空间间隔, 使之成为  $\omega$  的函数。

假设存在一虚拟的连续线阵, 根据以上的分析, 我们可以视该阵为一模拟滤波器, 有冲激响应  $ac(X)$ , 它满足这样的条件: 实际存在的均匀线阵是该连续线阵的均匀采样, 形成数字滤波器, 有脉冲响应  $a(i)$ ,  

$$a(i) = d \cdot ac((i-1) \cdot d) \quad i=1, 2, \dots, M \quad (3)$$

为了获得满足上述条件的虚拟模拟滤波器的冲激响应, 我们再次假设, 对任意时间频率  $\omega_x$  都存在均匀离散阵, 阵元间距  $d_x = \frac{\lambda_x}{2}$ , 这些离散阵具有相同的权系数  $a'(i)$ , 也就是说, 它们所代表的数字滤波器具有相同的脉冲响应, 由于满足  $\omega_x d_x = \text{常数}$ , 所以可以保证他们具有相同的响应。

根据信号处理理论中由数字信号到模拟信号的恢复公式, 即可得到对应于任意时间频率的虚拟模拟滤波器的冲激响应,

$$ac_{\omega_x}(X) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \frac{a'(i)}{\lambda_x/2} \frac{\sin(\pi(X-i)\frac{\lambda_x}{2}/\frac{\lambda_x}{2})}{\pi(X-i)\frac{\lambda_x}{2}/\frac{\lambda_x}{2}} \approx \sum_{i=1}^M a'(i) \frac{\sin(\pi(X-(i-1))\frac{\lambda_x}{2}/\frac{\lambda_x}{2})}{\pi(X-(i-1))\frac{\lambda_x}{2}/\frac{\lambda_x}{2}} \quad (4)$$

依 (3) 式对该模拟滤波器进行重新采样,  $a_{\text{arr}}(i) = d \cdot ac_{\text{arr}}((i-1)d)$ , 即可得到  $\omega_x$  所对应的一组权系数。也就是说, 对每一阵元都可计算出频带范围内任意频率点所对应的权系数。图 3 给出基准频率 20KHz 所对应的权系数及由上述方法计算出的 39.2 KHz 对应的权系数。

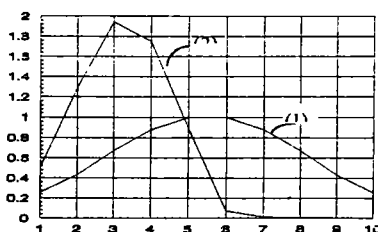


图 3 (1) 基准频率 20KHz 对应的权系数  $a'(i)$ ;  
 (2) 空间重采样法计算出的权系数(39.2KHz)

<sup>1</sup> 有些文献定义  $\omega_{ec}$  为空间频率, 则  $d$  为空间采样间隔, 不影响计算结果。作者在下文公式 (3) (4) 中也略去了常数因子  $c$ 。

### 四、恒定束宽波束形成器设计

宽带波束形成器可以分别在时域或频域完成<sup>[6]</sup>。

我们用频域波束形成的方法设计宽频带波束形成器。根据上述方法，可以计算出随频度变化的阵元权系数  $a_i(f)$ ，令  $H_i(f)=a_i(f)$ 。这样，就可以对各阵元所接收到的信号进行滤波，再将滤波后的结果求和输出。如果要将波束定向在  $\alpha_0$  方向上，可以再用一组相移滤波器  $W_i(f)=e^{j2\pi f d \sin(\alpha_0)(i-1)/c}$ ，对  $H_i(f)$  的输出进行再滤波。波束形成的框图见图 4。

图 5 是本文方法计算出的空间滤波器频率响应，与图 2 比较，可以看出恒定束宽的结果，在我们所讨论的带宽范围内，波束宽度基本保持恒定，误差小于  $0.5^\circ$ 。

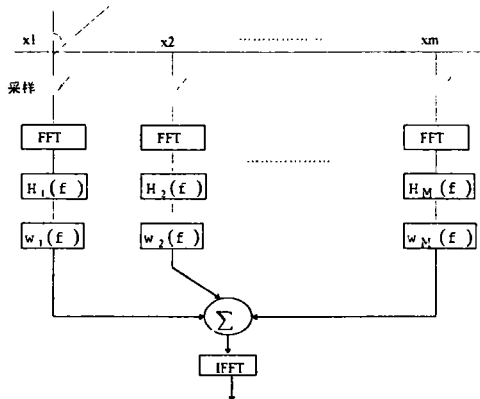


图 4 恒定束宽波束形成原理框图

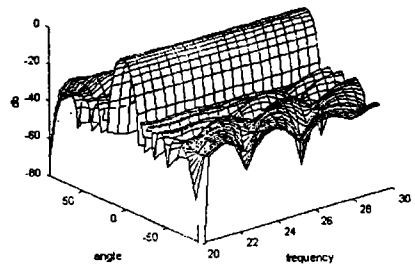


图 5

### 五、结论

- (1) 本文从空间滤波器设计的观点出发，以空间重采样理论为基础，求得不同频率下的阵元权系数的计算公式，使得阵元权系数的计算更为简便直观；
- (2) 利用频域波束形成的方法，设计宽频带恒定束宽波束形成器，在我们讨论的频率范围内，波束宽度的误差小于  $0.5^\circ$ 。

### 参考文献

[1] 李贵斌, 声纳基阵设计原理, 第 1 版, 海洋出版社, 1995.

[2] R.P.Smith “Constant Beamwidth Receiving Arrays for Broad Band Sonar Systems” ACUSTICA Vol.23 pp.21-26 1970.

[3] John H.Doles. and Frank D.Benedict “Broad-Band Array Design Using the Asymptotic Theory of Unequally Spaced Arrays” IEEE Trans. Antennas and Propagat. Vol.36, pp.27-32, No.1,Jan, 1988.

[4] J.Krolik and D.Swingle “Focused Wide-Band Array Processing by Spatial Resampling” IEEE Trans.

---

Acoust., Speech, Signal Processing Vol.38, pp.356-360, Feb, 1990.

[5] [美] R.E. 克劳切, L.R. 拉宾纳著, 酆广增译, 徐思均校, 多抽样率数字信号处理, 人民邮电出版社, 1988。

[6] Lal C. Godara “Application of the fast Fourier transform to broadband beamforming” J.Acoust. Soc. Am 98(1), pp.230-240 July 1995.

[7] 邹理和, 数字信号处理, 国防工业出版社, 1990。

## The Constant Beamwidth Beamformer Design Based on Spatial Resampling Method

Zhi Wanjun Li Zhishun

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University)

**Abstract:** In this paper, the linear equal-spaced array is regarded to be the discrete sampling of the continuous array, then the concept of spatial sampling in the wideband DOA estimation can be used here to design the constant beamwidth beamformer. From the viewpoint of the filter design, the weight of the sensors is as the impulse respond of the spatial filter, so a representation to compute the weight is naturally obtained by the way of the interpolating function. In the end, the constant beamwidth beamforming is realized in the frequency domain.

**Key words:** Spatial resampling, Constant beamwidth, Spatial filter, Beamforming

---

(上接第 10 页)

[7] S. Mallat et al., “singularity detection and processing with wavelets,” IEEE Trans. On information theory vol.38 no.2, PP.617-643 March 1992.

[8] J.Canny, “A computational approach to edge detection,” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.8, No.6, pp.679-698, 1986.

## A New Method of Gray Level Corner Detection Based on Multiscale Image

Tian Yuan Liang Dequn Wu Gengshi

(Xi'an Jiao Tong University)

**Abstract:** Corner detection plays an important role in the field of computer vision, because the corners include a large amount of useful information. In this paper, using differential geometry theory and wavelet transform, we propose a new method that can detect corners in multiscale images. Its special points as follow. 1. Needn't get edges first, we can detect corners in gray level directly; 2. To reduce the number of corners that introduce by noise and locate the important corners position accurately, we used wavelet transform to characterize corner in multiscale. The effectiveness of the new method is confirmed by the experiment in the end of this paper.

**Key words:** corner detection, wavelet transform differential geometry