

基于阵列接收数据重采样的频率不变波束形成器*

朱维杰 孙进才

西北工业大学航海工程学院, 西安 710072

摘要 提出一种具有不随频率变化的波束图的宽带基阵处理方法. 该方法只需要使用一个真实阵列, 然后通过插值方法产生多个虚拟阵列的输出, 最后对这些虚拟阵列输出进行叠加得到整个基阵的输出. 其优点是阵元数少、易于实现, 且只需用传统的窄带阵列设计方法在参考频率下设计基阵来满足对波束图的要求. 仿真结果说明了该方法的有效性.

关键词 波束形成 阵列信号处理 空间重采样 频率不变波束图

在阵列信号处理中, 通常使用波束形成技术^[1]来接收沿期望方向传播的信号, 从而抵消或抑制来自其他方向的干扰. 其处理方法是先将基阵阵元对空间信号的采样输出进行适当的延迟补偿, 然后对其加权求和以提高输出信噪比. 对于窄带信号, 时间上的延迟与一定的相移对应, 且复权系数可以同时调整信号的幅值与相位. 因此窄带信号的波束形成是通过一组复权系数来获得阵增益及指向性的. 波束形成器的性能, 如空间分辨率、波束图等取决于基阵的相对孔径, 即和绝对孔径与所处理信号波长的比值有关.

在实际应用中, 特别在麦克风阵列、水下通信等领域中, 通常要求基阵能够不失真地接收宽带信号, 因此要求波束形成器的波束图具有与频率无关的特性, 即频率不变性. 但是, 对于一个固定权值(权值不随频率变化)的基阵, 当它接收不同频率的信号时, 由于基阵的相对孔径不同, 其波束图也不相同. 因此, 对于沿某一方向传播的宽带信号, 基阵对该宽带信号的不同频率成分的增益各不相同, 所以使用该基阵接收宽带信号就会产生波形畸变, 并且信号带宽越大波形畸变越严重. 为了能够不失真地接收宽带信号, 人们提出了不同的方法, 其中主要的有自适应波束形成法^[2,3]和线性组合阵列法^[4]. 一个具有 M 个阵元的自适应波束形成器, 可以在单个频率上对波束图产生 M 个约束. 若要在 L 个频点上同时满足约束条件, 则需要每个阵

元上接 L 个延迟单元. 虽然自适应波束形成器可以在有限的频点上保持基阵的波束图基本不变, 但它却很难在一定的连续频率范围内产生完全相同的波束图. 线性组合基阵法则是在 L 个频点上分别设计 L 个子阵, 所有子阵都具有相同的波束图, 而在其他频率处的输出则是这 L 个子阵的线性组合. 但是, 这种方法不仅实现起来相当困难, 而且在其他频率点处波束图的一致性较差.

本文提出的宽带波束形成方法只需用一个真实阵列, 通过插值方法产生不同的虚拟阵列, 使不同的虚拟阵列对应于宽带信号的不同频率成分, 各个虚拟阵列都具有相同的波束图, 从而实现信号的宽带接收. 该方法不仅可以保证基阵的波束图在较宽的频率范围内基本保持不变, 并且降低了基阵设计的复杂性.

1 窄带波束形成器

设由位于同一平面的 M 个相同阵元组成的基阵接收频率为 f 的、位于远场的平面波, 平面波的传播方向与基阵的法线方向的夹角为 θ , 如图 1 所示. 则整个基阵的输出可以表示为各个阵元输出的加权和, 即

$$y(t) = \sum_{m=0}^{M-1} w_m s_m(t) = \mathbf{W}^T \mathbf{S}, \quad (1)$$

2001-09-30 收稿, 2001-11-12 收修改稿

* 航天科技创新基金资助项目

E-mail: zwjif@263.net

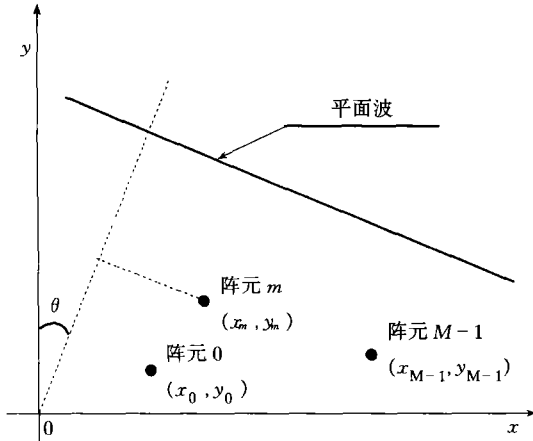


图1 基阵示意图

式中, $\mathbf{W} = [w_0 \ w_1 \ \dots \ w_{M-1}]^T$ 为基阵的加权矢量, $w_m (m=0, 1, \dots, M-1)$ 为第 m 个阵元的权系数, $\mathbf{S} = [s_0(t) \ s_1(t) \ \dots \ s_{M-1}(t)]^T$ 为信号矢量, $s_m(t) (m=0, 1, \dots, M-1)$ 为第 m 个阵元的输出.

设每个阵元的方向灵敏度为 $g_m(\theta) (m=0, 1, \dots, M-1)$, 那么对于传播方向为 θ 的平面波, 信号矢量可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{S} &= [s(t - \tau_0(\theta)) \ s(t - \tau_1(\theta)) \ \dots \ s(t - \tau_{M-1}(\theta))]^T = \\ &= s(t) [g_0(\theta) e^{j2\pi f \tau_0(\theta)} \ g_1(\theta) e^{j2\pi f \tau_1(\theta)} \ \dots \\ & \quad g_{M-1}(\theta) e^{j2\pi f \tau_{M-1}(\theta)}]^T = \\ &= s(t) \text{diag}[\mathbf{g}(\theta)] \mathbf{a}(\theta, f) = \\ &= s(t) \mathbf{U}(\theta, f), \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\tau_m(\theta) (m=0, 1, \dots, M-1)$ 为 θ 方向的平面波在第 m 个阵元和参考点之间的传播延迟, $\mathbf{a}(\theta, f) = [e^{j2\pi f \tau_0(\theta)}, e^{j2\pi f \tau_1(\theta)}, \dots, e^{j2\pi f \tau_{M-1}(\theta)}]^T$ 为基阵的方向矢量, $\text{diag}(\cdot)$ 表示用矢量的各元素为矩阵对角线元素构成的对角矩阵, $\mathbf{g}(\theta) = [g_0(\theta), g_1(\theta), \dots, g_{M-1}(\theta)]^T$ 为基阵阵元的灵敏度矢量, $\mathbf{U}(\theta, f) = \text{diag}[\mathbf{g}(\theta)] \mathbf{a}(\theta, f)$.

基阵的波束图定义为基阵对频率为 f , 方位为 θ 的单位幅度的平面波的幅度响应, 即

$$p(\theta, f) = |\mathbf{W}^T \mathbf{U}(\theta, f)|. \quad (3)$$

若基阵是由无指向性的 M 个相同阵元组成, 即 $g_m(\theta) = 1 (m=0, 1, \dots, M-1)$, 则(3)式变为

$$p(\theta, f) = |\mathbf{W}^T \mathbf{a}(\theta, f)|. \quad (4)$$

显然, 波束图不仅是信源方位 θ 的函数, 而且

还是频率 f 的函数. 也就是说, 对于不同的频率, 基阵的波束图是不同的. 频率不变波束形成的目的就是通过对一定的信号处理方法, 使得基阵的波束图在某一频率范围 $[f_l, f_h]$ 内保持不变或基本不变, 即要满足

$$\begin{aligned} p(\theta, f) &= |\mathbf{W}^H \mathbf{a}(\theta, f)| \approx \\ p(\theta, f_0) &= p(\theta), \\ \forall \theta &\in [0, 2\pi], \forall f \in [f_l, f_h]. \end{aligned} \quad (5)$$

2 具有频率不变波束图的宽带波束形成器

考察(4)或(5)式可以发现, 造成波束图随频率变化的原因是基阵的方向矢量 $\mathbf{a}(\theta, f)$ 是频率 f 的函数. 第 m 个元素可以表示为

$$a_m(\theta, f) = e^{j2\pi f \tau_m(\theta)}. \quad (6)$$

若以坐标原点为参考点, 设第 m 个阵元的坐标为 (x_m, y_m) , 如图1所示, 则传播延迟 $\tau_m(\theta)$ 可以表示为

$$\tau_m(\theta) = (x_m \sin \theta + y_m \cos \theta) / c, \quad (7)$$

式中, c 为平面波的传播速度. 那么, 方向矢量的第 m 个元素为

$$a_m(\theta, f) = e^{j2\pi f (x_m \sin \theta + y_m \cos \theta) / c}. \quad (8)$$

(8)式表明, 阵元坐标为 (x_m, y_m) 的基阵, 在频率为 f 下的方向矢量 $[a_{1,m}(\theta, f)] (m=0, 1, \dots, M-1)$, 与阵元坐标为 $(\alpha x_m, \alpha y_m) (\alpha > 0)$ 的基阵, 在频率为 f/α 的方向矢量 $[a_{2,m}(\theta, f)] (m=0, 1, \dots, M-1)$ 是相同的, 即

$$\begin{aligned} a_{1,m}(\theta, f) &= e^{j2\pi f (x_m \sin \theta + y_m \cos \theta) / c} = \\ &= e^{j2\pi (f/\alpha) (\alpha x_m \sin \theta + \alpha y_m \cos \theta) / c} = \\ &= a_{2,m}(\theta, f/\alpha) \\ & \quad (m=0, 1, \dots, M-1). \end{aligned} \quad (9)$$

因此, 若在频率 f 处, 使用阵元坐标为 (x_m, y_m) 的基阵及一组权系数形成的波束为 $p_1(\theta, f)$, 而在频率 (f/α) 处, 用相同的权系数及阵元坐标为 $(\alpha x_m, \alpha y_m)$ 的基阵形成的波束为 $p_2(\theta, f/\alpha)$, 则两个基阵的波束图相同, 即 $p_1(\theta, f) = p_2(\theta, f/\alpha)$.

一个宽带信号, 可以将其看作是由 N 个窄带信

号组成. 为了能够不失真地接收宽带信号, 可以设计一个包含 N 个子阵的基阵, 其中每个子阵除了在尺寸上相差一定的比例因子 α 外, 在其他方面均具有完全相同的结构. 每个子阵用来接收对应的窄带信号, 也就是说, 若窄带信号的频率压缩或扩展了 α 倍, 相应的子阵的尺寸就扩展或压缩了 α 倍. 这样在不同的子带上, 对应子阵可以形成相同的波束. 将各个子阵的输出叠加即构成整个基阵的输出, 那么这个基阵就可以用来接收宽带信号, 且基阵在信号带宽内的波束图是不随频率变化的, 与各子阵的波束图是相同的. 具有 N 个子阵的频率不变波束形成器的组成框图如图 2 所示.

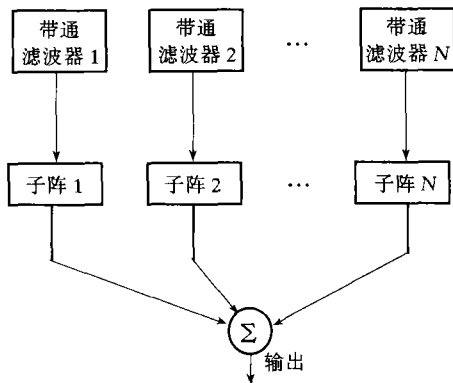


图 2 多子阵频率不变波束形成器

当要求基阵的工作频带较宽时, 图 2 所示的频率不变波束形成器需要的子阵数 N 就很大, 这将给工程实现带来很大困难. 为了避免这一困难, 可以只使用一个真实阵列来接收信号; 对于不同的子带, 可通过对真实阵列插值到对应子带虚拟阵列的输出; 将虚拟阵列的输出叠加即可得到整个基阵的输出, 其实现框图如图 3 所示.

对真实阵列的插值可以使用插值滤波器、FFT 插值等方法. 若真实阵列是均匀线列阵, 还可以利用采样定理进行插值. 由采样定理可知, 若连续时间信号 $s(t)$ 是带宽有限的, 则该连续信号可以由其在离散间隔上的采样值 $s(nT_s)$ (采样间隔 T_s 满足采样定理) 完全确定, 其重构公式为

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(nT_s) \frac{\sin[\pi(t - nT_s)/T_s]}{\pi(t - nT_s)/T_s}. \quad (10)$$

均匀线列阵阵元的输出是对空间信号的采样, 因此, 若满足空间采样定理 (阵元的间距小于信号

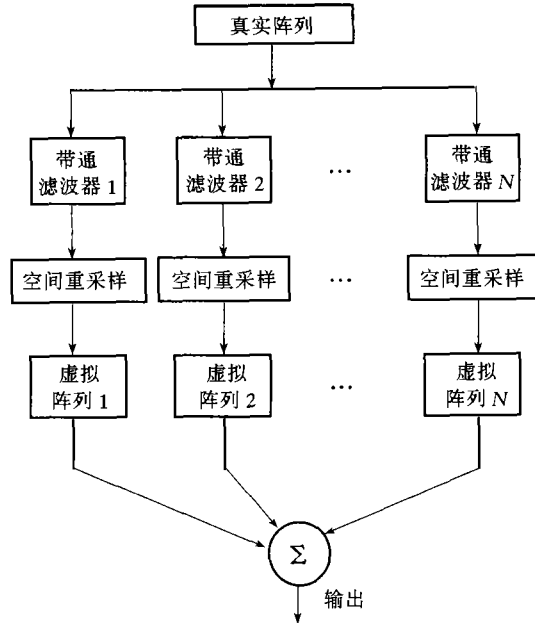


图 3 空间重采样频率不变波束形成器

最高频率对应波长的一半), 则空间信号在任意一点的值可以由真实均匀线列阵的阵元输出惟一确定, 空间信号的重构公式仍可用(10)式表示, 只是将时间变量 t 换为空间位置变量 x . 例如要获得阵元坐标为 x_m 的虚拟线列阵的输出, 只需将虚拟阵列的阵元坐标代入(10)式, 即

$$s(x_m) = s(x) |_{x=x_m} \quad (m = 0, 1, \dots, M-1). \quad (11)$$

当获得虚拟阵列的输出后就可以用多子阵频率不变波束形成器的方法形成波束, 实现信号的宽带接收.

3 计算机仿真

设均匀线列阵由 10 个相同的无指向性阵元组成, 信号的最低频率为 50 Hz, 最高频率为 100 Hz, 阵元间距为接收信号最高频率对应波长的一半, 期望信号位于 10° 方向, 设计要求波束定向于期望信号方向, 而在其他方向具有平坦的旁瓣, 旁瓣级为 -30 dB.

以信号的最低频率为参考频率 f_0 , 采用 Chebyshev 加权^[5]或自适应波束形成的方法^[6]可以得到参考频率下的波束图 $p(\theta, f_0)$, 如图 4(a)所示. 其中, 主瓣半功率点宽度 (-3 dB 束宽) 为 13.1° .

将信号带宽分成16个子带,然后使用本文方法在整个信号带宽内形成波束,将不同频率下的波束画在同一张图上,如图4(b)所示.可以看出,不同频率下的波束图基本相同,其主瓣宽度最小为 12.9° ,最大为 13.3° ,相对波束宽度变化在 $\pm 1.6\%$ 以内.若定义相对波束变化率

$$\rho = \frac{\max_{f \in [f_l, f_h]} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |p(\theta, f) - p(\theta, f_0)| d\theta}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} p(\theta, f_0) d\theta}. \quad (12)$$

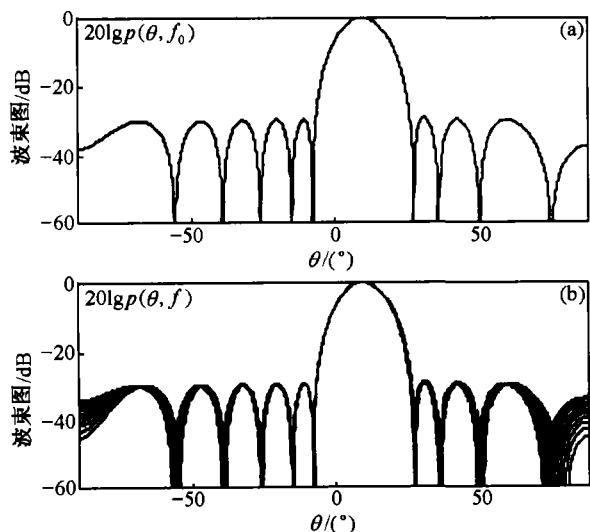


图4 参考波束图及空间重采样法的波束图

则相对波束变化率 $\rho < 4.5\%$.

4 结论

本文提出了基于阵列接收数据重采样的具有不随频率变化特性的基阵处理方法.通过对真实阵列接收数据的插值,产生了多个虚拟阵列的输出,每个虚拟阵列用于接收相应中心频率的窄带信号并形成相同的波束,因此整个基阵便可以在信号带宽内形成一致的波束.该方法可以利用现有的窄带基阵处理方法,降低了宽带基阵设计的复杂性,易于工程实现.虽然插值方法及仿真是以线阵给出的,但该方法很容易推广到平面阵及体积阵.

参 考 文 献

- 1 Van Veen B D, et al. Beamforming: A versatile approach to spatial filtering. IEEE ASSP Magazine, 1988, 5(2): 4
- 2 Monzingo R, et al. Introduction to Adaptive Arrays. New York: Wiley and Sons, 1980. 60~64
- 3 Gabriel W F. Adaptive processing array system. Proc IEEE, 1992, 80: 152
- 4 Smith R. Constant beamwidth receiving arrays for broad band sonar systems. Acoustica, 1970, 23: 21
- 5 Bresler A D. A new algorithm for calculating the current distributions of Dolph-Chebyshev arrays. IEEE Trans on AP, 1980, 28: 951
- 6 Olen C A, et al. A numerical pattern synthesis algorithm for array. IEEE Trans on AP, 1990, 38(10): 1666