

主动式多卜勒声纳的自适应波束形成

J.N.Maksym

(加拿大大西洋防御研究中心(DREA))

摘要 本文考虑在一个移动的运载体上主动式声纳系统发射长连续波脉冲的情况下,降低混响的问题。在 WTI (动目标显示)雷达中,可认为杂乱回波在给定的多卜勒单元内是从一确定的方位上来的。与此情况有些不同的是,在主动式多卜勒处理声纳中混响在角度范围上是扩展了,主要因为散射体、波浪以及其他同类的东西都是在运动着。因此,抑制混响就需要接收机的指向性图具有更宽的零点。

本文将从保持主瓣的约束条件下使波束形成器总的输出功率最小的观点出发,讨论基阵最佳化的基本问题。混响噪声场的协方差矩阵可以根据波浪运动所引起的扩展的经验结果以及接收换能器的几何特性来模造。由这些理想化的模型,计算并画出在各种不同的多卜勒频率单元、运载体速度与海况条件下最佳化的基阵响应图。

其次,对实际换能器作了测量,在考虑到换能器本身的局限性的情况下,检验了自适应波束形成的实际性能。由于换能器响应图的不理想,影响了整体响应最佳化的程度,在这方面有一些结论。这些结论表明,有可能改进主动式换能器的设计。这对于在主动式声纳中充分发挥最佳与自适应技术的作用是很必要的。

引 言

在北大西洋防御研究中心(DREA)现在正在进行将最佳基阵处理技术用于主动式声纳的研究。本文阐述在此研究中所得到的一些结果。我们在这个讨论会上介绍这些结果,是为了说明这种处理的一些实际应用以及指出在实际系统中应该作的一些具体考虑。特别是本文讨论的问题,都是在各个传感元件自身具有复杂的指向性图的情况下产生的。这在主动式系统中是一个普遍的现象。在这种系统中接收传感器是一些复合的谐振结构,而且置于导流罩或拖曳体中,自然存在各种各样挡板反射与绕射效应。基阵处理的大部分讨论中,考虑的是理想元件,它们具有良好的指向特性,而且是透声的。本文的结果说明,在这些条件不满足时,必须对基阵作仔细的就地测量。即使作了这样的测量,实际阵增益仍然不可能象根据理想传感器预计的那样好。

我们这儿考虑的主动式声纳的问题,是在混响背景有方向性的情况下如何使接收阵响应最佳。为了能最好地检测动目标而采用窄带信号与滤波的方法时,就出现这种情况。当声纳载体本身运动时,混响有多卜勒频移,而且随运动方向的相对角度变化。这个效应与散射体

* 原文题目: "Adaptive Beamforming in an Active Doppler Sonar."

运动带来的频率扩展是联在一起的。当我们通过一特定的多卜勒滤波器观察时，可看到该效应与有限的发射脉冲宽度一起所造成的混响的方向特性。这里所讨论的最佳基阵处理的目的在于设计一波束图，突出地抑制混响最大的那些方向。

本研究中所用的一研究用声纳，其发射与接收工作频率为 10 千赫，是用 24 个拼件合成的圆柱换能器。圆柱换能器的标称半径为 28 厘米，高约为此值的两倍。每个拼件在水平面内形成波束时被看作为一个阵元。对于波导声纳，这是一种合理的简化。因为这种情况下信号与混响局限在水平方向附近的一个很窄的角度范围内。整个系统的示意图见图 1。图中，24 个拼件中的 10 个形成一接收波束，即频率为 f 的多卜勒通道。在多卜勒处理声纳中这种换能器应用的典型情况是在每个多卜勒频率上形成 24 个相邻的波束。

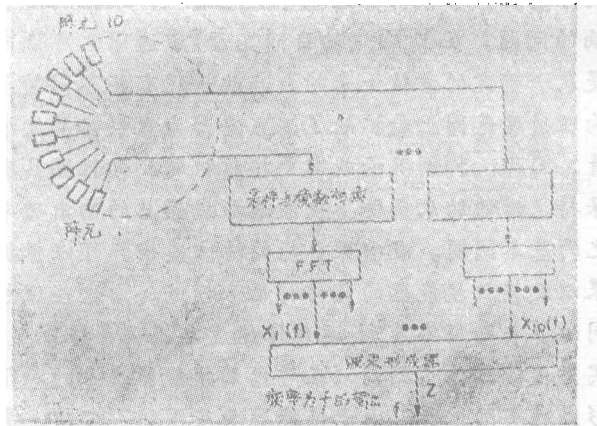


图 1 多卜勒处理声纳

波束的指向性图不只是取决于阵的几何尺寸与波束形成系数，而且也取决于阵的每个拼件的指向性图。在这个研究用声纳中，发射与接收用此同一换能器。该换能器封装于一可变深度声纳体壳中。在这些条件下，拼件的指向性图不是角度的平滑函数，而是类似于图 2 中的那样。该图中所示为一典型拼件的功率响应。图 2 中还画了一心形曲线，作为一理想拼件响应的例子。这在后面用来比较平滑的拼件响应与实测拼件响应对波束形成的相对作用。实测拼件响应是对可变深度声纳体壳中换能器进行校准测量得到的。

混响噪声的模型

为了确定自适应波束形成所能取得的最大改进，必须在每个多卜勒频率上模拟混响场的方向特性。为此我们假定，混响是由水平面内均匀分布的散射点上的一些反射造成的。从方位角 θ 上的一个稳定点来的反射，其回声的频率为

$$f = \frac{2v}{\lambda} \cos\theta \quad (1)$$

其中 v 为声纳载体速度， λ 为与发射频率相应的声波长。散射点通常是随机运动的，所以从方位角 θ 上的一个散射点来的多卜勒频率 Δf 是一随机变量。从经验得到，在一秒钟连续波发射的情况下，它的概率密度函数正比于^[1]

$$p(\Delta f) = \begin{cases} e^{-\gamma |\Delta f|^\beta}, & |\Delta f| \leq f_0 \\ \alpha e^{-\beta |\Delta f|}, & |\Delta f| > f_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中参量 α, β, γ 与 f_0 在三种风速条件下的值列于表 1 中。由方程 (1) 与 (2) 以及表 1，对任何给定的多卜勒频率，可以确定混响功率作为方向的函数。图 3 给出了一个例子。其中所示

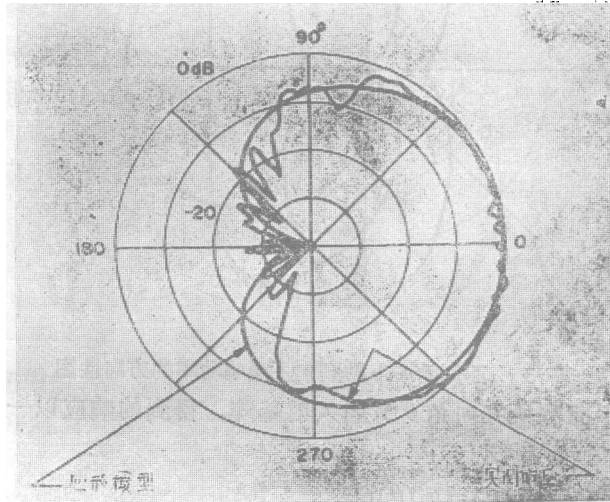


图 2 一典型拼件的功率响应图

为三个选定频率下得到的混响方向性图，工作条件为载体速度 5 节，风速 10 节以及一秒钟连续波发射脉冲的情况。

表 1 混响频率扩展的参量

风 速 (节)	α	β	γ	f_0 (赫)
< 3	1.122	0.253	0.046	5.0
~10	1.778	0.216	0.018	8.0
~20	3.981	0.1445	0.00375	17.5

波 束 形 成

为了采用现今最佳波束形成与自适应波束形成的文献中基本上标准化的符号^[2]，我们用一复矢量 \mathbf{X} 表示波束形成器输入 $x_1(f), \dots, x_{10}(f)$ 。于是可以用复数内积表示波束形成：

$$z = \mathbf{W}^+ \mathbf{X} \quad (3)$$

其中， \mathbf{W} 是一些复数构成的矢量，这些复数就是波束形成器的系数；符号 + 表示复数共轭转置运算。

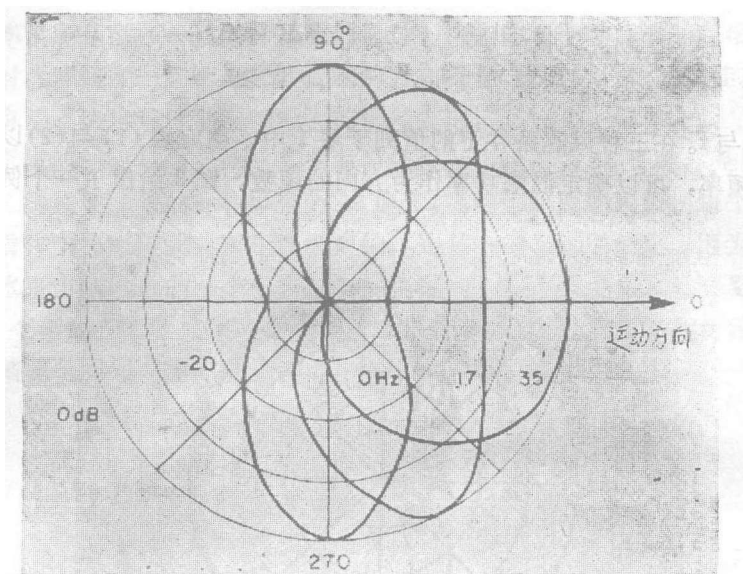


图 3 不同的多卜勒频率下混响功率的方向性图

当一单位幅度的平面波从方向角 θ 方向入射基阵，得到的响应以一复矢量 $S(\theta)$ 表示，其第 i 个元素为

$$S_i(\theta) = g_i(\theta) e^{jkR \cos(\theta - \theta_i)} \quad (4)$$

其中， $k = 2\pi/\lambda =$ 波数； $g_i(\theta)$ 为第 i 个拼件的复响应； θ_i 为第 i 个拼件的方位； R 为换能器的半径。

矢量 $S(\theta)$ 即所谓的“信号方向矢量”，它表示以入射波在原点的幅度和相位为参考时，

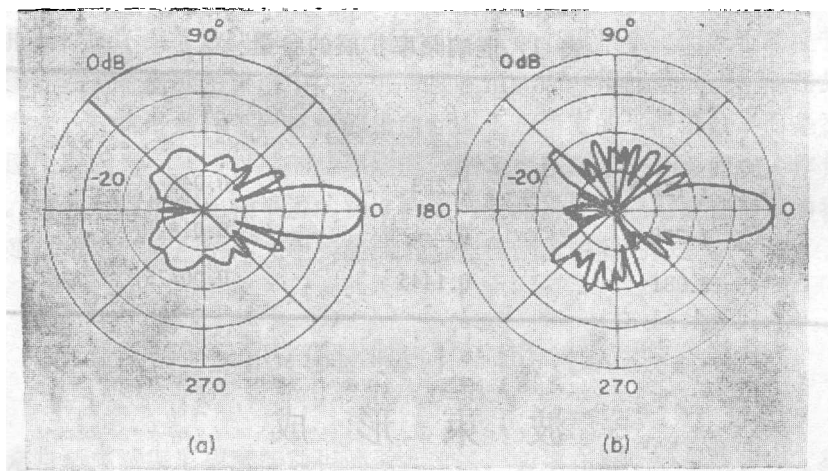


图 4 普通束控后的波束功率指向性图

(a) 用心形拼件响应计算得到 (b) 用换能器校准数据计算得到

拼件输出的幅度和相位关系。通常将相位补偿到一个平面上的波束形成器，可用下式表示：

$$W = \frac{1}{M} S \quad (5)$$

其中 M 为阵元数。图 4 为一波束功率指向性曲线的极坐标图。此曲线图是在按方程 (5) 作相位补偿，并且 W 各元素的幅度按 $\{3, 7, 11, 13, 15, 15, 13, 11, 7, 3\}$ 束控取值的情况下得到的。与此

类似的束控一般是用来降低旁瓣级的。图 4(a) 的波束功率指向性图是在每个拼件响应都是实的并用一心形曲线模拟的情况下得到的。此心形曲线函数为

$$g_i(\theta) = \frac{1 + \cos(\theta - \theta_i)}{2} \quad (6)$$

其中 θ_i 为第 i 个拼件的方位角。图 4(b) 的功率指向性图是用换能器校准数据计算得到的前视波束。此情况下的响应看来是更为随机的。事实上，由于各拼件自身响应间的差别，使得各波束响应的细部也是不同的。

当噪声场具有方向性时，比如象图 3 中所示混响场那样，图 4 的指向性不能保证最佳抑制。人们可以想到有可能在混响最大的一些方向上形成指向性响应的零点。最小方差波束形成器就是这样一个波束形成器。其权重矢量为

$$\mathbf{W} = \frac{\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{S}(\theta)}{\mathbf{S}^+(\theta)\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{S}(\theta)} \quad (7)$$

其中 \mathbf{Q} 为噪声的协方差矩阵，定义为

$$\mathbf{Q} = \varepsilon\{\mathbf{X}\mathbf{X}^+\} \quad (8)$$

其中 $\varepsilon\{\cdot\}$ 表示统计期望值， \mathbf{X} 是只有混响时波束形成器的输入。方程 (7) 使总的输出功率最小，而保证在观察方向上入射一单位幅度的平面波时其功率输出为 1。

混响的协方差矩阵

有了混响的功率函数 $N(\theta)$ ，并已知拼件响应，就可以从下式推得此协方差矩阵的表式：

$$\mathbf{W}^+\mathbf{Q}\mathbf{W} = \int_0^{2\pi} N(\theta) |\mathbf{W}^+\mathbf{S}(\theta)|^2 d\theta \quad (9)$$

\mathbf{Q} 的元素可以从上式与方程 (4) $S_i(\theta)$ 的表式推得。于是元素 q_{mn} 表为

$$q_{mn} = \int_0^{2\pi} N(\theta) g_m(\theta) g_n^*(\theta) e^{jkR[\cos(\theta - \theta_m) - \cos(\theta - \theta_n)]} d\theta \quad (10)$$

其中 * 表示复共轭。

在功率函数为 $N(\theta)$ 的混响场中，实际换能器的协方差矩阵可以由一些校准测量来计算。测量中用一平面波声源，其中心频率为 10 千赫，换能器相对于源的取向取得足够密。在 DREA 设计组成了实时测试设备，可以对 24-拼件的换能器输出同时进行复数采样、模数转换、数字滤波、中间转换并记录在磁带上。由于这样的设备使得校准测量有了可能。这些测量总起来我们称做换能器的相干校准。在取向 θ_1 方向上对第 i 个拼件的一个典型测量，在数学上包括

$$\mathbf{x}_i(\theta_1) = g_i(\theta_1) e^{jkR\cos(\theta_1 - \theta_i) + j\psi_i} \quad (11)$$

其中 $g_i(\theta_1)$ 为测得的第 i 个拼件在 θ_1 方向上的复响应。 ψ_i 为一未知相位项，它与传播距离及发射器相位有关。在每个 θ_1 上，由上述拼件响应就可形成阵的响应矢量 \mathbf{X}_1 ，阵的响应矩阵可以按照下面的复外积运算来计算：

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{X}_1\mathbf{X}_1^+ \quad (12)$$

此矩阵与未知相位项 ψ_i 无关，后者在求复外积的过程中消去了。在 0° 到 360° 的范围内等间

隔的一些 θ_i 值上的阵响应矩阵的总体，可用来计算阵的协方差矩阵：

$$Q = \sum_{i=1}^{360} N(\theta_i) M_i \quad (13)$$

方程(13)是方程(10)积分的一个简单近似计算，如果需要的话，也可以用更为复杂的形式如辛卜生公式来代替。

结 果

最佳的波束形成器的响应图在混响功率最大的那些方向上将具有最小的响应。这一点可从图 5 和图 6 中看出。该图所示是海况相应为 10 节风速、声纳在水中移动速度为 5 节的情况。最佳化是这样完成的：先按照方程(10)或(13)计算协方差矩阵，再用方程(7)解出波束形成

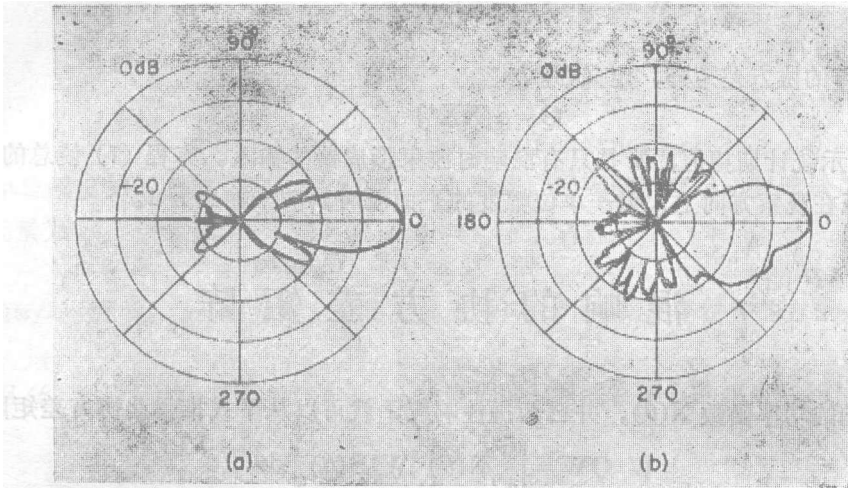


图 5 0赫多卜勒时前视波束的功率响应
(a)用心形拼件响应计算得到
(b)用换能器校准数据计算得到

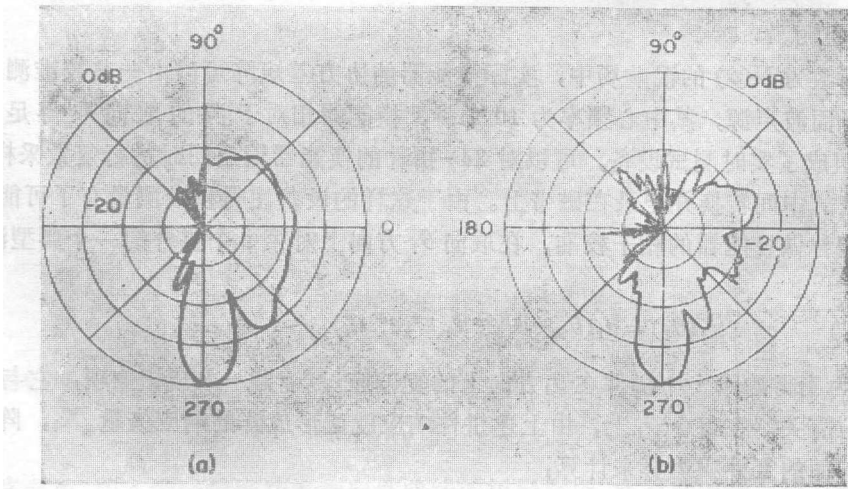


图 6 -35赫多卜勒时旁视波束的功率响应
(a)(b)的说明同图5

系数。在所有情况下,自噪声比一个无方向性换能器的混响低 30 分贝。自噪声的引入表现为 Q 矩阵的对角元素的增大。自噪声加进来的结果是限制了低混响方向的旁瓣级。图 5 与图 6 的 (a) 所示的响应图是在拼件响应为心形模型的情况下得到的,而 (b) 则是用换能器校准测量的数据以及与 (a) 同样的 $N(\theta)$ 计算得到的。图 5 是 0 赫多卜勒时的前视波束,而图 6 为 -35 赫多卜勒时的旁视波束。在第一种情况下最大的混响来自侧面。在第二种情况下则来自后面。从这些典型结果看来,实际的响应图不象那些从理想的心型模型得到的那样有效。

图 7 和图 8 画出三种情况下的相对性能: 1) 基于实测拼件响应 (图 4 (b) 所示) 得到的普通波束; 2) 基于换能器校准得到的最佳波束; 3) 用心形拼件响应得到的最佳波束。为了说明问题,选择了两种情况,一是图 7 中的前视波束,另一是图 8 中的侧视波束。在这两种情况下的性能参量都是相对于一个无方向性接收器而言,基阵抗混响噪声功率得到的阵增益。

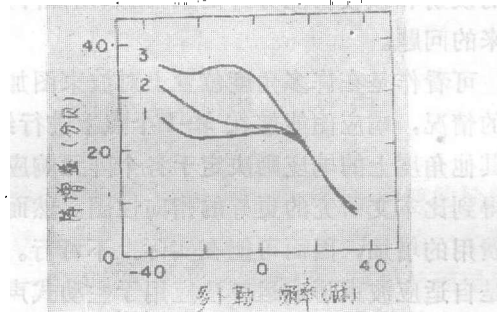


图 7 前视波束抗混响的阵增益; 载体速度 5 节, 风速 10 节
 (1) 加权后的波束形成器, 用校准数据计算得到
 (2) 用校准数据的最佳化结果
 (3) 用心形拼件响应模型的最佳化结果

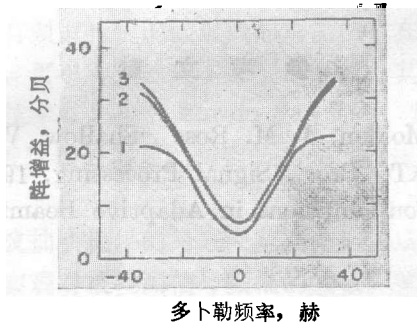


图 8 旁视波束抗混响的阵增益; 载体速度 5 节, 风速 10 节
 (1), (2), (3) 的说明同图 7

可以注意到, 高的阵增益表示对混响噪声抑制得好, 对回声有更好的检测能力。可以看到, 最高的阵增益, 也就是最佳处理可能达到的最高性能改善, 所对应的多卜勒频率, 正是混响出现在波束主瓣外面的那些多卜勒频率。

讨 论

本文提到了在设计最佳波束形成器中的一些实际考虑。由于自适应系统趋于达到最佳,

所以有关可能达到什么样的性能方面的结论，同样也适用于它们。得到的结果着重说明了对各阵元的复响应进行同时测量的重要性。

形成波束的过程，可看作为对一些角度的复函数进行线性组合来形成所要求的响应。这些角度的复函数代表了作过几何相位修正后的各个阵元的响应。几何相位修正由各阵元与阵中心的相对位置决定。在实际的系统中，比如这里所讨论的主动式声纳的情况，换能器以及附近的结构对声波的局部散射使得各阵元的指向性响应图更为复杂。响应作为角度的函数，其变化可用一空间带宽参量来描述。当带宽小至心形模型的情况，就可能找到一线性组合(波束图)，它在混响强的那些角度区域上具有相当低的响应。但若空间带宽很大，象在校准过程中发现的那样，则不能找到阵权重的线性组合，使得响应在所要求的角度范围上达到足够小。

改进性能的方法很多。例如，我们可以用增加声纳体壳的透声性能的方法来改进各阵元的响应。如果主动式声纳的发射和接收功能分开的话，则采用点阵元接收可增加阵的透声性，同时降低由近场波散射带来的问题。

形成最佳波束的过程，可看作是在许多角度位置上对波束图加上一些约束条件。例如，众所周知，对于 M 个拼件的情况，响应图能够在 $M-1$ 个点上进行约束，比如说形成 $M-1$ 个零点。与此同时，在所有其他角度上的响应则决定于各个阵元响应函数的变化。或许可能用更多的阵元来合成波束而得到比本文研究的更好的指向性图。然而，使用更多的阵元还必须考虑相应的设备以及计算费用的增加，因而可能在实际上不可行。

本文提出的研究报告是自适应波束形成运算法应用于主动式声纳的一个更广泛的研究的一部分。当自适应波束形成用于海上记录的实际混响数据时，发现基于理想换能器预计的性能与实际实验的性能间有偏离。

我们在本文中提出的结果表明，这种偏离中相当大的部分可归之于由于各个换能器响应所带来的限制。

(孙允恭译)

参 考 文 献

- [1] R. S. Thomas, J. C. Molden, J. M. Rose "Shallow Water Acoustics Related to Signal Processing", NATO Proc., Signal Processing, 1972.
- [2] H. Cox, "Sensitivity Considerations in Adaptive Beamforming", *ibid.*