**波束赋形基本算法浅析与仿真**

孟麟芝

（山东大学信息科学与工程学院）

**摘 要：本文首先分析了相控阵波束形成的基本思想、基本算法，基于此本文简要描述了何为自适应波束形成，分析了几种最优权矢量选取准则，并做了简要仿真。最后，分析了波束赋形技术的发展现状与前景，以及机器学习在其中的应用。**

**关键词：波束赋形；无线通信；相控阵雷达；阵列信号处理**

**Analysis and simulation of the basic algorithm of beamforming**

*MENG Lin-zhi*

(School of Information Science and Engineering, Shandong University)

**Abstract:** Firstly, the basic idea and algorithm of phased array beamforming are introduced, based on which this paper briefly describe what adaptive beamforming is, derive several optimal weight vector selection criteria, and do a brief simulation. Finally the development status, prospect of beamforming technology and the application of machine learning are analyzed.

**Key words:** Beamforming; Wireless communication; Phased array radar; Array signal processing

# 引言

蜂窝移动通信系统蓬勃发展，多用户的接入导致对信道的需求急剧增加，频谱复用技术显得日益重要，人们常用多址技术解决这一问题，如FDMA、CDMA、TDMA、SDMA等。其中空分多址（Spatial Division Multiple Access, SDMA）是一种新发展的技术，是当下的热门方向。它的基础技术便是波束赋形（Beamforming, BF）技术，亦称空域滤波。其实质是依据环境的变化对阵元的幅值、相位进行调整，使所有阵元发射信号叠加得到的增益集中在某个或某几个方向，形成“波束”[1]。

另外，近年来人工智能特别是深度学习在计算机视觉、自然语言处理、语音识别等领域获得了巨大成功[2]。人工智能的出现为各行业发展指明了新方向，许多领域的研究者都期望将其引入，突破原本的技术模式，解决传统方法难以解决的问题，开拓新的天地，无线通信领域也不例外。“智能通信”被认为是 5G 之后无线通信发展的主流方向之一[3]，智能天线技术更是其根本，基于人工智能的波束赋形技术也是当下研究的热点。

# 1 相控阵波束形成

传统的雷达通常是不断绕中轴对空间各个方向进行扫描的雷达，当阵列接收信号功率达最大时，来波方向必垂直于阵列平面入射。但一些阵列过于庞大，难以转动，且机械转动仍显缓慢，因而相控阵波束形成法（也称常规波束形成法）应运而生。

这种方法给每个阵元赋予一个加权因子，使天线某方向上产生较大增益，在其他方向上增益较小，实现了天线的“指向”。若所有阵元的加权系数都为1，则天线指向阵列的法线方向，这时形成的天线方向图称为静态方向图。若天线与来自该方向的信号共轭匹配，产生匹配滤波作用，则称为匹配滤波型波束形成，下面进行简要讲解。

以一维元等间隔线阵为例，每个阵元间隔为，各通道用一个复加权系数调整该通道的幅值和相位。



图1.1 元等间隔线阵示意图

设来波方向为，不考虑俯仰角，这时总的阵列接受信号为：

若用矩阵表示各阵元输出及加权系数，则有：

则：

其中代表矩阵的共轭转置。

设入射信号为，从图中可以看出，若以第一个阵元为参考，则第二个阵元接收信号与第一个阵元传播路径差为，则相位差为：

各个阵元的接收信号为：

其中称为方向向量，它刻画了来波的方向。

若，则由公式（3）：

此即的最大值，这一结果称为空间匹配滤波[4]，这时天线指向来波的方向。所以如果将权值设为，即可将波束指向方向。在MATLAB中进行编程，测天线的方向图，得到的结果如图1.2。可见可以通过调整权重实现将天线指向任意方向，且指向多个方向也是可行的。

匹配滤波方式在高斯白噪声背景下是最佳的，存在更复杂的干扰时则要另行考虑，将在下一节进行讨论。

图1.2 对不同方向实现匹配滤波的示例

# 2 自适应波束赋形

从前一节的讨论中，我们了解了匹配滤波型权向量的形式，但不难注意到，这种方法是“确知”的，没有体现出自适应的特性，它不能依照环境进行适时调整。能否提出一种算法，能在特定方向上形成主波束接受有用信号，且在其他方向上形成零陷抑制干扰信号，并在给定的最优化准则下依据环境变化不断调整权值？下面不妨先从自适应算法中最优权值的调整入手，感受这一类算法。

现在若空间中有一个感兴趣的信号，其波达方向为，则其方向向量为；有个干扰信号，其波达方向为，则其方向向量为这时应对干扰信号和噪声都进行抑制，该如何调整各阵元的权值？

设每个阵元通道上的加性高斯白噪声为，它们都具有相同的方差，这样一来，每个阵元上接收到的信号可表示为：

将感兴趣信号与干扰信号合并到一个矩阵，得到如下表示：

记作：

假设是平稳随机过程，求输出在内的平均功率：

式中为的协方差矩阵，要注意的是。

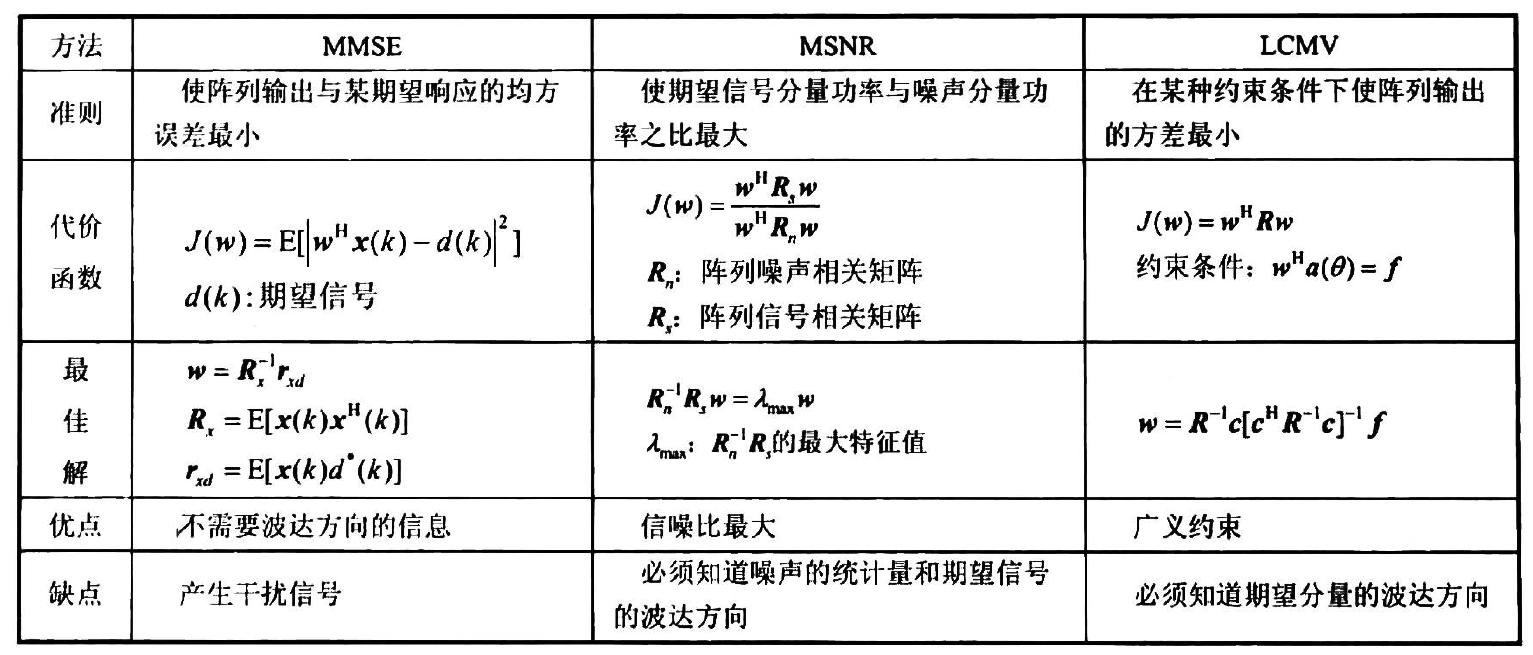
可以看出，在式（12）中，令，即可将干扰信号抑制，这一条件称为干扰置零条件。但仅令干扰信号置零可能导致噪声输出过大。要想同时抑制噪声和干扰信号有许多种方法，如最小方差无畸变响应（MVDR）准则寻求满足置零条件时使得总功率取最小值的，可以归纳为如下问题：

其中，为维的约束响应矢量[5]。这一问题可以用拉格朗日乘数法求解，具体过程不再给出。

其他的最优权值选取准则有最小均方误差（MMSE）准则、最大信噪比（MSNR）准则、线性约束最小方差（LCMV）准则等，它们各有优势。值得注意的是LCMV准则可以退化为MVDR准则。可以证明，这几种方法在理想情况下得到的结果是等价的，可以写成通式如下：

其中为不含期望信号的阵列响应，这一解通常为维纳解[1]。

表2.1 三种波束成形算法比较[1]



以LCMV算法为例在MATLAB中进行测试。设有三个信号，一个期望信号从20°方向而来，SNR=10，其他两个干扰信号分别从-20°和30°方向而来，INR=10。设阵元数为18，间隔为，依据LCMV算法得到的天线方向图如下：



图2.1 LCMV算法得到的天线方向图

可见期望角度处归一化增益为0dB，两个干扰信号对应的角度处有很大的零陷，满足干扰置零条件，另外随着SNR、INR的变化，权值也将不断调整，这是匹配滤波型波束形成做不到的。

这里所说的算法仅仅是波束赋形算法中的冰山一角，当下热门的自适应波束赋形算法还有自适应旁瓣相消法、广义旁瓣相消法、多级维纳滤波器等等。限于篇幅与精力，本文无法一一详细分析，下一节中将对其它算法做一些简要介绍，以此分析波束赋形技术的发展现状与前景。

# 3 发展现状与前景

谈波束赋形技术发展，不得不谈阵列信号处理的发展。其理论研究开始于上世纪六十年代，迄今已经有五十多年的历史。它主要经历了如下三个阶段[6]：上世纪60年代的研究热点主要聚集于自适应波束控制上，例如自适应相控天线等；上世纪70年代的研究热点主要是自适应零点控制，例如自适应滤波和自适应干扰置零等技术；上世纪80年代的研究热门是空间谱估计，例如最大熵（Maximum Entropy, ME）估计、最大似然（Maximum likelihood, ML）估计等。人们的不断研究使得阵列信号处理理论日趋完善。

然而，波束赋形技术面临着一个很实际的问题：无论是传统常规波束形成器，还是Capon最小方差无失真响应MVDR波束形成器，均需基于一定的先验信息，如阵列几何结构、阵元的幅相响应、目标源信号的波达方向等，才能够进一步构造波束形成器的权向量来完成波束形成任务。当这些先验信息完全精确，算法都具有很好的性能，但在实际应用场合这几乎是不可能的。

针对这一问题，研究者们提出了许多盲波束形成算法，它们不需要上述的一系列先验概率信息，而是利用信号本身特性，如非高斯性、循环平稳性和恒模性等完成波束形成，这一方向仍在不断发展，需要人们继续探索。

说到此，不难感受到波束赋形中已逐渐浮现“智能”的概念，近几年已有研究利用DNN解决来波方向估计（DOA）问题[7]、双用户MISO信道下波束赋形问题[8]等。关于人工智能的引入，一些研究者认为大多波束赋形问题无需使用复杂的深度学习处理，但不能否认，人工智能在波束赋形中的应用将是现在及未来一段时间内的研究热点。

# 参考文献

1. 张小飞, 陈华伟, 仇小锋. 阵列信号处理及MATLAB实现[M]. 电子工业出版社, 2015.
2. MAO Q, HU F, HAO Q. Deep learning for intelligent wireless networks: a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018(99):1.
3. 张静, 金石, 温朝凯,等. 基于人工智能的无线传输技术最新研究进展[J]. 电信科学, 2018, 034(008):46-55.
4. 王永良, 丁前军, 李荣锋. 自适应阵列处理[M]. 清华大学出版社, 2009.
5. 王志力. 阵列方向图综合技术及自适应波束形成算法研究[D]. 电子科技大学.
6. https://wenku.baidu.com/view/4c2b4676240c844769eaeef1.html.
7. T. Nosho and M. Fujimoto, "Investigation of Hyperparameters for DOA Using Machine Learning," 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2021, pp. 505-506, doi: 10.23919/ISAP47053.2021.9391361.
8. H. J. Kwon, J. H. Lee and W. Choi, "Machine Learning-Based Beamforming in Two-User MISO Interference Channels," 2019 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIC), 2019, pp. 496-499, doi: 10.1109/ICAIIC.2019.8669027.