

一种稳健的自适应波束形成器¹

郭庆华 廖桂生

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 当信号噪声比超过一定的门限时, 线性约束自适应波束形成器对天线的幅相误差有很高的敏感度, 即使在误差很小的情况下, 期望信号也会如同干扰一样被抑制掉。该文通过对广义旁瓣相消器的阻塞矩阵加以改进, 提出了一种对阵列天线误差有良好稳健性的自适应波束形成器。该方法基于广义旁瓣相消器结构, 可方便地进行部分自适应, 降低运算量。

关键词: 自适应波束形成器, 广义旁瓣相消器, 稳健性, LCMV 准则

中图分类号: TN820 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)01-0146-05

A Robust Adaptive Beamformer

Guo Qing-hua Liao Gui-sheng

(National Key Lab. of Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract The linearly constrained adaptive beamformer is hypersensitive to the amplitude and phase errors of antenna array when the signal-to-noise ratio exceeds a certain threshold. Even if the array imperfections are slight, the beamformer suppresses the desired signals as if they are interference signals. In this paper, a robust adaptive beamformer in the presence of array imperfections is presented by improving the block matrix of the generalized side lobe canceller. Since this method is based on the structure of the generalize side lobe canceller, it is convenient to use its partial adaptive processing to reduce the computation load.

Key words Adaptive beamformer, Generalized side lobe canceller, Robustness, Linearly Constrained Minimum Variance(LCMV)

1 引言

阵列天线自适应波束形成技术在理论上具有十分优良的性能, 但是在实际应用中却不尽人意, 究其原因是阵列天线不可避免地存在各种误差(如阵元响应误差、通道频率响应误差、阵元位置扰动误差、互耦等), 各种误差可以综合用阵元幅相误差来表示。近年来, 许多文章从不同侧面分析了阵列误差对自适应阵性能的影响。文献 [1] 对各种误差的影响进行了分析综述, 基本结论是, 对于只利用干扰加噪声协方差矩阵求逆 (Noise-Along Matrix Inverse, NAMI) 的方法, 幅相误差对自适应波束形成的影响不大(干扰零点深度没有变化, 波束指向有一定的误差); 但是对于利用信号加干扰和噪声协方差矩阵求逆 (Signal-Plus-Noise Matrix Inverse, SPNMI) 的自适应方法, 当信号噪声比 (SNR) 较大时, 虽然干扰零点位置变化不大, 但是在信号方向上也可能形成零陷, 导致输出 SNR 严重下降。线性约束最小方差 (LCMV) 准则是最常用的自适应波束形成方法, 当信噪比超过一定的门限时, 基于 SPNMI 方法的线性约束自适应波束形成器对阵列天线的幅相误差有很高的敏感度, 即使在误差很小的情况下, 期望信号也会如同干扰一样被抑制掉。

¹ 2002-09-24 收到, 2003-01-20 改回

国家自然科学基金、高等学校博士学科点基金和教育部科学技术研究重点项目联合资助课题

广义旁瓣相消器 (GSC) 是 LCMV 的一种等效的实现结构^[2], GSC 结构将自适应波束形成的约束优化问题转换为无约束的优化问题, 分为自适应和非自适应两个支路, 分别称为主支路和辅助支路, 要求期望信号只能从非自适应的主支路通过, 而自适应的辅助支路中仅含有干扰和噪声分量, 其自适应过程可以克服上述 SPNMI 方法中期望信号含于协方差矩阵引起的信号抵消问题。但是, 正如文献 [3] 中所指出, 由于阵列天线误差的存在, GSC 的阻塞矩阵并不能很好地将期望信号阻塞掉, 而使其一部分能量泄漏到辅助支路中, 当信噪比较高的时候, 辅助支路中也含有相当的期望信号能量, 类同 SPNMI 方法, 此时会出现严重的上下支路期望信号抵消的现象。文献 [3] 将泄漏的期望信号功率作为惩罚函数, 提出了人工注入噪声的方法, 使 GSC 具有稳健性, 人工注入的噪声必须具有合适的功率。文献 [4] 指出, 波束形成器的稳健性可用它的白噪声增益来衡量, 对白噪声增益的限制可用对自适应权向量进行二次不等约束来代替, 使自适应权向量的范数小于一定的值, 同样可以提高 GSC 的稳健性。

在本文中, 通过一次特征分解和投影运算, 对 GSC 的阻塞矩阵 B 加以改进 (如图 1 所示), 尽量减少泄漏到辅助支路中的期望信号的能量, 可以使 GSC 具有很好的稳健性。

2 广义旁瓣相消器结构简介

线性约束最小方差准则可表示为

$$w = \arg \min_w w^H R_X w, \quad \text{s.t. } C^H w = f \quad (1)$$

其中 R_X 为阵列协方差矩阵, 构成 C 的列向量张成约束子空间, 式 (1) 的最优解为

$$w = R_X^{-1} C (C^H R_X^{-1} C)^{-1} f \quad (2)$$

如图 1 所示, 在与 LCMV 等效的广义旁瓣相消器结构中, 权向量 w 被分解为自适应权和非自适应权两部分, 其中非自适应部分位于约束子空间中, 而自适应部分正交于约束子空间。系统的权向量可表示为^[5]

$$w = w_q - B w_a \quad (3)$$

其中

$$w_q = C (C^H C)^{-1} f, \quad w_a = (B^H R_X B)^{-1} B^H R_X w_q \quad (4)$$

B 为阻塞矩阵, $B^H C = 0$, B 的作用就是将期望信号阻塞掉而不使之进入辅助支路, 组成 B 的列向量位于约束子空间的正交补空间中。令 $y_c = w_q^H x$, $z = B^H x$, 则自适应权向量又可表示为 $w_a = R_Z^{-1} p_Z$, w_a 是使上下支路均方误差最小化的维纳解, 其中 $R_Z = B^H R_X B$ 是 z 的协方差矩阵, $p_Z = B^H R_X w_q$ 是 z 和 y_c 的互相关向量。若 z 中含有很少的期望信号时, GSC 仍能正常工作, 但若 z 中所含的期望信号超过一定程度时, 将会引起严重的期望信号相消现象。

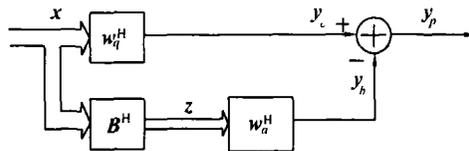


图 1 广义旁瓣相消器结构

3 阵列幅相误差模型及提高 GSC 稳健性的方法

3.1 幅相误差模型 在理想阵列天线的情况下, 不失一般性, 可假定所有阵元增益均为单位增益, 然而在实际情况下, 阵元增益存在幅度误差和相位误差, 分别用 Δa_i 和 Δp_i 表示第 i 个阵元的均值为零的随机幅度误差和相位误差, 因此, 第 i 个阵元的复增益可表示为

$$g_i = (1 + \Delta a_i)e^{j\Delta p_i}, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

其中 M 为阵元数目。当阵列的幅相误差较小时, 第 i 个阵元的复增益可表示为

$$g_i \approx 1 + \Delta a_i + j\Delta p_i = 1 + \Delta g_i, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

其中 $\Delta g_i = \Delta a_i + j\Delta p_i$ 表示第 i 个阵元的均值为零的复增益误差。假定各个阵元的复增益误差相互独立, 具有相同的方差, 且在一定的快拍数之内保持不变。复增益误差的方差:

$$\sigma_g^2 \triangleq E[|\Delta g_i|^2], \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad \sigma_g^2(\text{dB}) \triangleq 10 \lg \sigma_g^2 \quad (7)$$

复增益矩阵 $\mathbf{G} \triangleq \text{diag}[g_1 \quad g_2 \quad \dots \quad g_M]$ 。若 $\mathbf{a}(\theta)$ 表示理想情况下的导向矢量, 则存在幅相误差情况下的导向矢量为 $\mathbf{G}\mathbf{a}(\theta)$, 因此, 阵列接收到的数据矢量可表示为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{G}\mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (8)$$

其中 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1) \quad \mathbf{a}(\theta_2) \quad \dots \quad \mathbf{a}(\theta_p)]$, $\mathbf{s}(t) = [s_1(t) \quad s_2(t) \quad \dots \quad s_p(t)]^T$, $\mathbf{n}(t)$ 为白噪声矢量, p 为期望信号和干扰的总数目。

3.2 提高 GSC 稳健性的方法 GSC 的阻塞矩阵 \mathbf{B} 一般由约束子空间的正交补空间的一个基构成, 从而有 $\mathbf{B}^H \mathbf{C} = \mathbf{0}$ 。为了便于说明, 假设 $\mathbf{C} = \mathbf{a}(\theta_d)$, 即期望信号导向矢量。在没有天线误差的情况下, $\mathbf{B}^H \mathbf{a}(\theta_d) = 0$, 期望信号被完全阻塞掉; 当存在天线误差时, 实际的导向矢量为 $\mathbf{G}\mathbf{a}(\theta_d)$, 因而此时 $\mathbf{B}^H \mathbf{G}\mathbf{a}(\theta_d) \neq 0$, 由图 1 可看到将有一部分期望信号泄漏到辅助支路中去, 当泄漏的信号能量超过一定的门限时, 就会引起严重的期望信号相抵消现象。为了减少泄漏到 GSC 辅助支路中期望信号的能量, 对阻塞矩阵 \mathbf{B} 加以改进。如图 2 所示, 通过对阵列协方差矩阵 $\mathbf{R}_X = E[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)]$ 进行特征分解得到期望信号和干扰子空间, 统称为信号子空间 \mathcal{U} , 其中 $\mathbf{U} = [\mathbf{v}_1 \quad \mathbf{v}_2 \quad \dots \quad \mathbf{v}_p]$, $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_p$ 是 \mathbf{R}_X 的 p 个大特征值对应的特征矢量。实际的期望信号导向矢量 $\mathbf{G}\mathbf{a}(\theta_d)$ 和干扰导向矢量 $\mathbf{G}\mathbf{a}(\theta_{l,i})$ (其中 $i = 1, 2, \dots, p-1$) 位于信号子空间中, 把 $\mathbf{a}(\theta_d)$ 向信号子空间投影, 得到

$$\mathbf{a}_p(\theta_d) = \mathbf{U}(\mathbf{U}^H \mathbf{U})^{-1} \mathbf{U}^H \mathbf{a}(\theta_d) = \mathbf{U} \mathbf{U}^H \mathbf{a}(\theta_d) \quad (9)$$

显然, $\mathbf{a}_p(\theta_d)$ 比 $\mathbf{a}(\theta_d)$ 更接近实际导向矢量 $\mathbf{G}\mathbf{a}(\theta_d)$, 因此用 $\mathbf{a}_p(\theta_d)$ 的正交补生成的阻塞矩阵 \mathbf{B}_r 比直接用 $\mathbf{a}(\theta_d)$ 的正交补生成的阻塞矩阵 \mathbf{B}_c 有更好的阻塞能力。

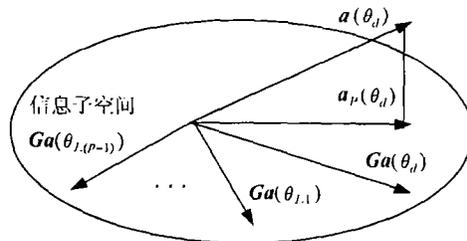


图 2 各导向矢量和信号子空间

4 计算机仿真结果

本节通过计算机仿真来验证改进阻塞矩阵的有效性, 仿真中使用阵元数为 10, 阵元间距为半波长的等距线阵。

(1) 采用一般阻塞矩阵 B_c , 改进阻塞矩阵 B_r 及其部分自适应阻塞矩阵 B'_r (维数为 10×4) 的 GSC 的归一化方向图, 图中分别用虚线, 实线和点划线表示。快拍数为 100, 图 3 和图 4 中, $\sigma_y^2 = 0.01(-20\text{dB})$, 图 5 中, 阵列误差较大, $\sigma_y^2 = 0.1(-10\text{dB})$, 图 3 和图 5 为一个干扰的情况, 图 4 为两个干扰的情况。从仿真结果可以看出, 当存在阵列误差时, 采用一般阻塞矩阵的 GSC 已明显将期望信号抑制掉, 而采用改进阻塞矩阵的 GSC, 甚至在阵列误差较大的情况下都具有良好的稳健性。

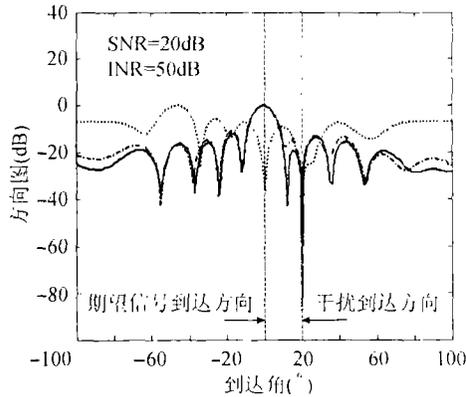


图 3 $\sigma_y^2 = 0.01$, 一个干扰 (到达角 20°) 时的 GSC 归一化方向图

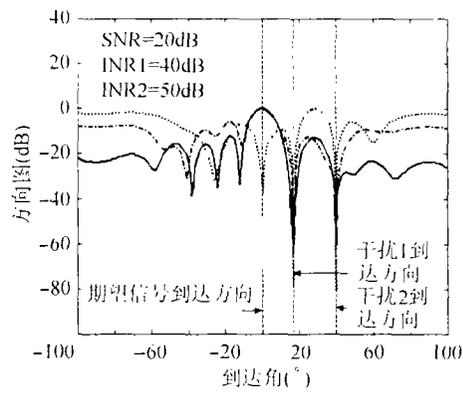


图 4 $\sigma_y^2 = 0.01$, 两个干扰 (到达角 17° 、 40°) 时的 GSC 归一化方向图

(2) 采用一般阻塞矩阵 B_c , 改进阻塞矩阵 B_r 及其部分自适应阻塞矩阵 B'_r (维数为 10×4) 的 GSC 的输出信干噪比 (SINR) 随阵列复增益误差的方差的变化情况 (图 6), 分别用虚线, 实线和点划线表示, 条件为 $\text{SNR}=20\text{dB}$, $\text{INR1}=40\text{dB}$, $\text{INR2}=50\text{dB}$, 期望信号方向 0° , 干扰方向为 17° 和 40° 。从该图中可看出, 采用改进阻塞矩阵 B_r 及其部分自适应阻塞矩阵 B'_r 的 GSC 的输出 SINR 明显高于采用一般阻塞矩阵的 GSC 的输出 SINR, 误差越大越明显。

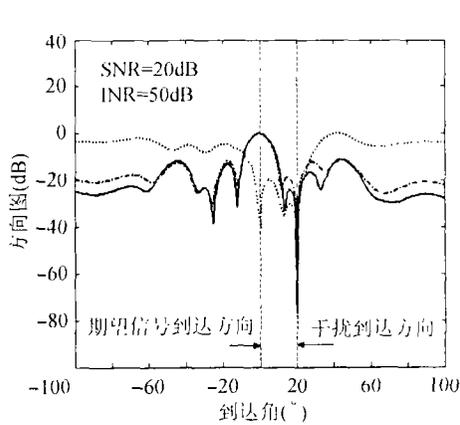


图 5 $\sigma_y^2 = 0.1$, 一个干扰 (到达角 20°) 时的 GSC 归一化方向图

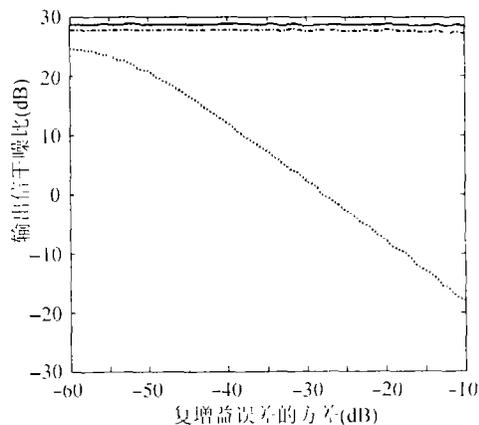


图 6 输出信干噪比随复增益误差的方差的变化曲线

5 结论

本文通过对广义旁瓣相消器的阻塞矩阵加以改进, 可以使之对阵列天线误差具有较强的容差性, 提出了一种稳健的自适应波束形成方法, 文中的计算机仿真结果验证了该方法可使 GSC 具有很好的稳健性。

参 考 文 献

- [1] Godara L G. Error analysis of the optimal antenna array processors. *IEEE Trans. on AES*, 1986, 22(3): 395-409.
- [2] Griffiths L J, Jim C W. An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming. *IEEE Trans. on AP*, 1982, 30(1): 27-34.
- [3] Jablon N K. Adaptive beamforming with the generalized sidelobe canceller in the presence of array imperfections. *IEEE Trans. on AP*, 1986, 34(8): 996-1012.
- [4] Cox H, Zeskind R M, Owen M M. Robust adaptive beamforming. *IEEE Trans. on ASSP*, 1987, 35(10): 1365-1376.
- [5] Tian Z, Bell K L, Van H L. A recursive least squares implementation for LCMP beamforming under quadratic constraint. *IEEE Trans. on SP*, 2001, 49(6): 1138-1145.

郭庆华: 男, 1978 年生, 硕士生, 主要从事阵列信号处理方面的研究.

廖桂生: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 雷达信号处理国家重点实验室副主任, 中国电子学会高级会员, IEEE 会员, 主要从事统计信号处理、智能天线和子波变换在雷达和通信中的应用研究.