

一种基于周期平稳信号特性的递归盲波束形成算法*

陈宇欣** 何振亚

(东南大学无线电工程系 南京 210096)

【摘要】 提出了一种快速盲波束形成递归算法, 可以大大降低运算复杂度, 该算法尤其适用于对运算量有要求的阵列系统。实验结果验证了其有效性。

关键词 盲波束; 自适应; 波束形成; 周期平稳

中图分类号 TN911.7

近年来, 利用通信信号的周期平稳特性进行盲波束形成受到人们的重视, 该方法既不需要知道波达方向, 也不需要提供训练数据。Gardner等人提出了一类SCORE算法^[1], 其中的Cross-SCORE格外引人注目, 但其巨大的运算量令人难以承受。Q.Wu和K.M.Wong等人提出的C-CAB算法性能与SCORE性能相似^[2], 而运算量有所下降。SCORE的运算量在于矩阵求逆和特征值求解, C-CAB只剩下矩阵求逆, 利用矩阵求逆引理, 每次快拍时的运算量为 $O(M^2)$ 量级(M 为矩阵阶数)。本文采用了一种递归算法, 可以将运算量进一步降到 $O(M)$ 量级。

1 数据模型和周期平稳信号

通常通信信号都具有非零周期平稳特性, 如载频、波特率、导频等。周期平稳就是在某些时延 τ 或频移 α 情况下, 其周期平稳相关或共轭周期平稳相关不为零。周期平稳相关和共轭周期平稳相关分别定义为

$$R_{xx}^\alpha(\tau) = \overline{[x(n)x^H(n+\tau)\exp(-j2\pi\alpha n)]_x} \quad (1)$$

$$R_{xx}^{\alpha*}(\tau) = \overline{[x(n)x^T(n+\tau)\exp(-j2\pi\alpha n)]_x} \quad (2)$$

式中 $\overline{[\]_x}$ 定义为无限时间观测域上的平均; α 为周期平稳频率; 上标*、 T 和 H 分别为共轭、转置和共轭转置。为简便起见, $R_{xx}^\alpha(\tau)$ 和 $R_{xx}^{\alpha*}(\tau)$ 统一表示为

$$R_{xx} = \begin{cases} R_{xx}^\alpha(\tau) & u = x(n+\tau)\exp(-j2\pi\alpha n) \\ R_{xx}^{\alpha*}(\tau) & u = x^*(n+\tau)\exp(-j2\pi\alpha n) \end{cases} \quad (3)$$

假设阵列由 M 个阵元组成, 接收的数字信号 $x(n)$ 为 $M \times 1$ 维复矢量, 表示为

$$x(n) = \sum_{k=1}^K d(\theta_k)s_k(n) + i(n) + v(n) \quad (4)$$

式中 $s(n)$ 为有用信号; $d(\theta)$ 为由 θ 角方向到达信号的导引矢量; $i(n)$ 为干扰信号; $v(n)$ 为 $M \times 1$ 维白噪声。信号提取算法的目的就是根据某种准则找到权值矢量 w , 使有用信号可由下式提取

$$\hat{s}(n) = w^H x(n) \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

2 盲自适应波束形成算法

2.1 SCORE算法及CAB、C-CAB算法

SCORE算法可以看作是对两个 $M \times 1$ 矢量 w 和 c 使下式为最大^[1]

$$\max_{w,c} |w^H R_{xx} c|^2 \quad \text{st.} \quad \begin{cases} w^H R_{xx} w = 1 \\ c^H R_{xx} c = 1 \end{cases} \quad (6)$$

1999年10月4日收稿

* 国家攀登计划认知科学重大科研项目及国家自然科学基金资助项目, 编号: Grant NSC92097

** 男 28岁 博士

式中 R_{xx} 由式(3)定义; R_{xx} 、 R_{uu} 分别为 $x(n)$ 和 $u(n)$ 的自相关矩阵。 α 、 τ 的选择以信号周期平稳相关而干扰与噪声不相关为准则。式(6)的求解牵涉到广义特征值问题, 运算量很大。文献[2]中证明, 对于 SCORE 算法, $w_{\text{SCORE}} \propto R_{xx}^{-1}d(\theta)$ 。当信号功率很强时, R_{xx}^{-1} 对于由 $d(n)$ 张成的信号子空间相当于正交投影算子, 这就降低了 SCORE 算法的性能。文献[2]提出

$$\max_{w,c} |w^H R_{xx} c|^2 \quad \text{st.} \quad \begin{cases} w^H w = 1 \\ c^H c = 1 \end{cases} \quad (7)$$

可证明 $w_{\text{CAB}} \propto d(\theta)$ 。由于它在波达方向形成了波束, 从而在干扰功率低或干扰易于分离时性能良好, 但 CAB 算法不能在干扰方向陷零, 当强干扰由天线方向图边带进入时导致性能下降。Q.Wu 等人又提出 C-CAB 算法^[2], 使得 $w_{\text{CCAB}} = R_{xx}^{-1} w_{\text{CAB}}$ 。其中 w_{CAB} 可由文献[2]中的快速算法算出, 乘法运算量为 $O(M)$ 量级。由于 CAB 算法求得的权矢量 w_{CAB} 与导引矢量的一致估计成正比, 因此 C-CAB 与 SCORE 应该有渐进一致的性能。利用矩阵求逆引理求解 R_{xx}^{-1} , C-CAB 的乘法运算量降为 $O(M^2)$ ^[2]。

2.2 递归算法

从上面的分析可以看到, C-CAB 算法中同样存在矩阵求逆^[3]。实际上 C-CAB 是在 LCMV (线性约束最小方差) 算法中以 w_{CAB} 代替导引矢量从而得出的盲波束形成算法。如果利用 Lagrange 算子将 C-CAB 中的约束问题转化为无约束优化问题, 就可以避免矩阵求逆, 能够进一步减少运算量, 提高计算效率。

定义权矢量迭代公式如下

$$w(n+1) = w(n) - \mu \nabla_w L(w, \lambda) \quad (8)$$

$$L(w, \lambda) = w^H R_{xx} w + \lambda^H (w_{\text{CAB}}^H w - 1) + \lambda^T (w_{\text{CAB}}^T w^* - 1) \quad (9)$$

式(9)为目标函数, 对其求关于 w 的导数, 并令其为零, 得

$$R_{xx} w_{\text{opt}} + w_{\text{CAB}} \lambda_{\text{opt}} = 0 \quad (10)$$

同时权矢量 $w(n+1)$ 满足约束条件

$$w_{\text{CAB}}^H w = 1 \quad (11)$$

由式(8)~(11)得

$$w(n+1) = w(n) - \mu [I - w_{\text{CAB}} (w_{\text{CAB}}^H w_{\text{CAB}})^{-1} w_{\text{CAB}}^H] R_{xx} w(n) + w_{\text{CAB}} (w_{\text{CAB}}^H w_{\text{CAB}})^{-1} [1 - w_{\text{CAB}}^H w(n)] \quad (12)$$

式中 I 为单位阵。为了简化计算, 用输入矢量 $x(n)$ 的外积来代替它的自相关矩阵 R_{xx} , 令 $P = [I - w_{\text{CAB}} (w_{\text{CAB}}^H w_{\text{CAB}})^{-1} w_{\text{CAB}}^H]$, $A = w_{\text{CAB}} (w_{\text{CAB}}^H w_{\text{CAB}})^{-1}$, 由式(12)得

$$w(n+1) = A + P[w(n) - \mu x(n)x^H(n)w(n)] \quad (13)$$

令 $y(n) = w^H(n)x(n)$, $C = (w_{\text{CAB}}^H w_{\text{CAB}})^{-1}$, 则式(13)变为

$$w(n+1) = A + w(n) - \mu x(n)y^*(n) + w_{\text{CAB}} C \left[\sum_{i=1}^M w_{\text{CAB},i} w_i(n) - \mu y^*(n) \sum_{i=1}^M w_{\text{CAB},i} x_i(n) \right] \quad (14)$$

式中 $w_{\text{CAB},i}$ 、 $x_i(n)$ 分别表示这两个矢量中的第 i 个值。从式(14)可以看出该算法的计算复杂度在 $O(M)$ 量级。

2.3 收敛性能分析

对式(13)求均值, 得

$$E[w(n+1)] = A + P\{E[w(n)] - \mu R_{xx} E[w(n)]\} \quad (15)$$

定义 $V(k) = E[w(k)] - w_{\text{opt}}$, 其中 $w_{\text{opt}} = R_{xx}^{-1} w_{\text{CAB}} [w_{\text{CAB}}^H R_{xx}^{-1} w_{\text{CAB}}]^{-1}$ 。易得

$$\begin{cases} A = (I - P)w_{\text{opt}} \\ PR_{xx}w_{\text{opt}} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

由式(15)、(16)及 $V(k)$ 的定义得

$$V(k+1) = PV(k) - \mu PR_{xx}V(k) \quad (17)$$

另外，不难验证 P 的幂等性 $P^2 = P$ 。对式(17)左乘 P 可得

$$PV(k+1) = P^2V(k) - \mu P^2 R_{xx}V(k) = PV(k) - \mu PR_{xx}V(k) = V(k+1) \tag{18}$$

由式(17)、(18)可得

$$V(k+1) = V(k) - \mu PR_{xx}PV(k) = (I - \mu PR_{xx}P)V(k) \tag{19}$$

因此，收敛条件为

$$0 < \mu < 1/\max \lambda_{PR_xP} \tag{20}$$

当满足收敛条件时，权矢量收敛于优化解 w_{opt} ，亦即 $w \propto R_{xx}^{-1}w_{CAB}$ 。

3 计算机性能仿真

实验中采用有8个传感器阵元的等间距线性阵列，阵元间距为目标信号载频的半波长。

例1 目标信号为BPSK信号，100%升余弦调制，由 40° 方向进入阵列。载频 $f_c = 0.3$ ，波特率 $f_b = 0.2$ ，步长 $\mu = 10^{-4}$ ，输入 $SNR = 0$ dB，背景噪声为白噪声。图1为输出信噪比最终收敛于优化解。图2是经过20 000次迭代后，在入射方向 40° 形成一个准确的主波瓣。

例2 目标信号与干扰分别由 40° 和 -30° 方向进入阵列。目标信号 $f_c = 0.3$ ，干扰载频与其相差0.05，其他条件与例1相同。我们比较了在不同输入 SNR 情况下的性能。其中实线代表所提出的递归算法，虚线代表C-CAB算法。图3中目标信号输入 SNR 为10 dB，干扰输入 INR 为0 dB。图4中目标信号输入 SNR 为10 dB，干扰输入 INR 也为10 dB。因为以 $x(n)$ 的外积代替其自相关矩阵 R_{xx} ，在低输入 SNR 情况下，它的收敛速度稍微慢了一些。不过，相对于它的小运算量，这个缺点有时是可以忽略的。

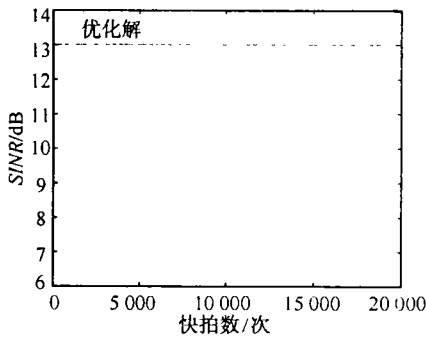


图1 输入为0 dB信号时输出信噪比

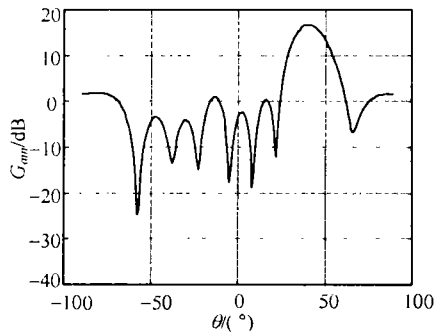


图2 20 000次快拍后的波瓣图

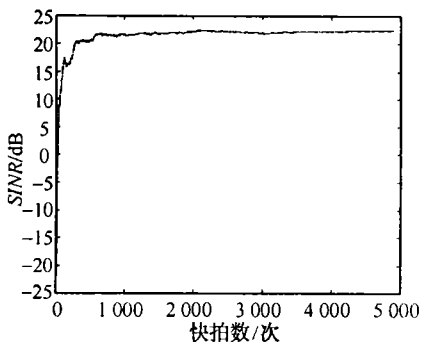


图3 信号为10 dB，干扰为0 dB时输出信噪比

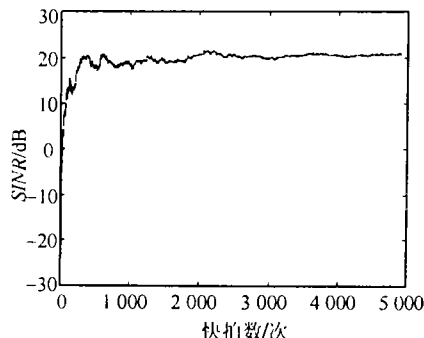


图4 信号为10 dB，干扰为10 dB时输出信噪比

4 结束语

本文提出了一种递归结构的基于信号周期平稳特性的盲自适应波束形成算法,并分析了其收敛性能,新算法的计算量仅为 $O(M)$ 量级。在仿真实验中可以看到,当输入 $SINR$ 比较高的时候,收敛性能令人满意;而在低输入 $SINR$ 情况下,其收敛速度稍微降低了一些,这就需要在实际工作中进行综合考虑。因此,在对计算量有所限制的情况下,如使用一些低性能DSP器件的阵列系统,这种递归算法有一定的价值。

参 考 文 献

- 1 Agee B G, Shell S V, Gardner W A. Spectral self-coherence restoral: a new approach to blind adaptive signal extraction using antenna arrays. Proc IEEE, 1990, 78,(4): 753~767
- 2 Wu Q, Wong K M. Blind adaptive beamforming for cyclostationary signals. IEEE Trans SP, 1996, 44(11): 2757~2767

A Blind Adaptive Beamforming Algorithm for Cyclostationary Signals

Chen Yuxin He Zhenya

(Department of Radio Engineering, Southeast University Nanjing 210096)

Abstract By utilizing the cyclostationary character of the communication signals, many blind beamforming algorithms are proposed in this paper, such as SCORE, CAB. However, their computation burden is heavy. To overcoming the shortcoming, a recursive blind beamforming algorithm is presented. The efficiency of the proposed method is confirmed by computer simulation.

Key words blind beam; adaptive; beamforming; cyclostationary

· 科研成果介绍 ·

基于MPEG-1的视频点播系统

主研人员: 余堃 周明天 王敏毅 孙雅章 徐莉 邹坚

MPEG-1视频点播系统可运行在Window95、Window NT环境下,支持TCP/UDP/NETBIOS多种传播模式,在普通10 Mbps以太网上可以同时点播6路MPEG-1节目,支持标准VOD系统的快进快退和中间播放等功能。该系统基于Web点播,节目表制作基于Web方式,使用HTML格式,界面友好,使用方便。

· 科 卞 ·