

基于时空解析恒模算法的 CDMA 智能 天线系统盲信号分离

冯爱刚,殷勤业,邓 科

(西安交通大学电信学院信息工程研究所,陕西西安 710049)

摘 要: 针对恒模算法只能由迭代算法实现和解析恒模算法分辨用户数受限等问题,本文在解析恒模算法基础上,提出时空解析恒模算法(ST-ACMA),并将其应用于 CDMA 智能天线系统盲信号分离. 通过将传统时域或空域的恒模算法扩展到时空域,将求解盲波束权矢量的问题等效成信号子空间盲信号恢复问题,通过多个矩阵的联合对角化处理,闭式得到所有用户信号. 数值仿真结果表明,该方法有效地解决了解析恒模算法可分辨用户数受阵元数限制的问题,提高了盲信号分离的性能,有效地克服了多址干扰.

关键词: 时空解析恒模算法; 智能天线系统; 盲信号分离; 时空二维信号处理

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 03-0328-04

Blind Source Separation with Space-Time Analytical CMA in CDMA Smart Antenna Systems

FENG Ai-gang, YIN Qin-ye, DENG Ke

(Information Engineering Institute, School of Electronics and Information Engineering Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract: The constant modulus algorithm(CMA) is suffered from the complex iteration computation and the analytical CMA (ACMA) is limited with resolvable source number. After analyzing the ACMA, a space-time ACMA is proposed to achieve blind source separation in CDMA smart antenna systems. By extending the traditional CMA only in time domain or in space domain to the space-time domain, the analytical solution is obtained with several joint approximate diagonalization of eigenvector matrices, and converts the problem of solving the blind beamforming weight to signal subspace. Numerical simulations illustrate that the proposed approach can overcome the limitation to the number of sources, and efficiently reduce the multiple access interference (MAI).

Key words: space-time analytical CMA; smart antenna system; blind source separation; space-time signal processing

1 引言

智能天线系统(SAS)能有效地利用用户的空间信息来减小多址干扰和码间串扰^[1,2],通过联合使用时域和空域信息提高了接收信号质量、增加了系统容量,解决了与日俱增的通信资源匮乏问题.因此,基于阵列天线的时空二维信号处理成为新一代移动通信系统的关键技术.盲自适应方法由于无需训练序列,而使信道传输效率得以提高,基于信号恒模(CM)特征的恒模算法(CMA)^[3~8]作为一种常用的盲自适应方法受到广泛关注.

很长一段时间人们总认为 CMA 是一个非线性问题,只能由迭代算法实现,无法得到闭式解析解.而迭代方法主要存在以下问题:存在局部极小点,若没有合适的初值,则会落入无法预知的极小点中,且收敛速度依赖于初值的选取;一次迭代运算只能得到一个用户信号,需选择不同的初值点以期收敛

到不同用户,弱信号用户常常被湮没;恒模信号的源数无法确定,必须依赖先验知识.

Van der Veen 和 Paulraj 提出的解析恒模算法(ACMA)^[7,8],解决了初值选取的问题,对采样数据量要求少,通过闭式解一次分离所有的恒模信号.但是该方法不足之处是:所能分离的信号恒模源数必须小于等于天线阵元数,这就限制了盲信号分离的性能.针对以上问题,本文在分析 ACMA 算法的基础上,将其由一维空域处理扩展到二维时空域处理,并应用到 CDMA 智能天线系统中实现多用户信号的盲分离.时空解析恒模算法将求解盲波束权矢量的问题等效成信号子空间盲信号恢复问题,通过多个矩阵的联合对角化处理,闭式得到所有用户信号.该方法可处理的恒模源数大大提高,而且由于其联合对角化的维数仅与恒模源数有关,因此与时空恒模(ST-CMA)方法^[5,6]相比,在用户数多的条件下还具有运算量小的优势.通过对 ST-ACMA 的性能分析,及与迫零算法(ZF)、

收稿日期:2001-12-05;修订日期:2002-04-18

基金项目:国家自然科学基金(No. 69872029);教育部博士生专项基金(No. 1999069808)

Wiener 接收及传统迭代 CMA 的性能对比,可以看出 ST-ACMA 性能趋近于最优的空时 Wiener 解。

2 信号模型

假设基站采用 M 个阵元的均匀线阵,移动台发射的信号为 BPSK 调制的 DS-SS-CDMA 信号,则在加性高斯白噪声信道中基站接收到的第 i 个阵元的信号可以表示为:

$$r_i(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sqrt{p_k} g_{k,l} [n] a_{k,l,i} b_k[n] s_k(t - nT_b - \tau_{k,l,i}) + u_i(t) \quad (1)$$

式中 K 为基站接收到信号的用户总数, N 为观测期内的码元个数, T_b 为比特周期, $\sqrt{p_k}$ 表示第 k 个用户的信号幅度, $b_k[n] \in \{+1, -1\}$ 是第 k 个用户的第 n 个信息码元, $u_i(t)$ 为第 i 个阵元的白噪声输出,每个阵元的噪声输出相互独立且服从均值为零,方差为 σ^2 的高斯分布,噪声和信号互不相关, $s_k(t)$ 为第 k 个用户的归一化特征波形,可表示为:

$$s_k(t) = \frac{1}{G} \sum_{p=0}^{G-1} c_k[p] \Psi(t - pT_c) \quad (2)$$

式中 G 为扩频增益, $\{c_k[p]\}_{p=0}^{G-1}$ 为第 k 个用户的扩频序列,它反映了用户的时域特征, $\Psi(t)$ 为归一化的脉冲成形函数,设其持续期为 $[0 \sim T_c]$, $T_c = T_b/G$ 为码元周期。

$a_{k,l,i}$ 为 $a_{k,l}$ 的第 i 个元素, $a_{k,l}$ 为 $M \times 1$ 的导向向量,它反映了第 k 个用户的第 l 条多径的空域特征。在均匀线阵情况下,导向向量可以表示为:

$$a_{k,l} = \left[1, \exp\left(\frac{j2\pi d}{\lambda} \cos\theta_{k,l}\right), \dots, \exp\left(\frac{j2\pi d}{\lambda} (M-1) \cos\theta_{k,l}\right) \right]^T \quad (3)$$

式中 $\theta_{k,l}$ 为第 k 个用户的第 l 条多径的入射角度, d 为阵元间距, λ 为载波波长。

$g_{k,l}[n]$ 和 $\tau_{k,l}$ 分别是第 k 个用户第 l 条多径的复增益和时延,假设信道复增益在比特持续期内保持不变,且同一用户的多径之间信道复增益互不相关。由于 DOA 和时延变化相对缓慢,因此假设其在观测期内保持不变。为了表述方便,假设每一个用户的多径个数都等于最大多径数 L ,当用户多径个数小于 L 时,多余多径的复增益、时延和导向向量为零。定义时空特征波形矩阵为:

$$\tilde{H} = [a_{1,1} \otimes s_{1,1}, \dots, a_{1,L} \otimes s_{1,L}, a_{2,1} \otimes s_{2,1}, \dots, a_{K,L} \otimes s_{K,L}] \quad (4)$$

式中 $s_{k,l}$ 是对应于第 k 个用户第 l 条多径的特征波形形状量。考虑 M 个阵元时,阵列输出为:

$$r[n] = \tilde{H}s[n] + u[n] \quad (5)$$

本文中, $[\otimes]^T$ 表示矩阵转置, $[\otimes]^H$ 表示共扼转置, $[\otimes]^\dagger$ 表示 Moore-Penrose 伪逆,“ $\otimes$ ”表示 Kronecker 积。

3 智能天线系统的盲信号分离

3.1 解析恒模算法

考虑 d 个独立源传输的复值信号 $s_i(t)$ 具有恒定包络,即 $|s_i(t)| = 1$ 。信号由 M 个阵元的天线阵接收,通过下变频到基带后以周期 T 采样得到阵列接收信号矩阵:

$$X = A \cdot S + N, M \times N \quad (6)$$

式中 $A = [a_1, a_2, \dots, a_d]$ $C^{M \times d}$ 是阵列响应矩阵。盲信号分离的目的就是寻找一个波束形成矩阵 $W = [w_1, w_2, \dots, w_d]$ $C^{M \times d}$,使得:

$$S = W^H \cdot X \quad (7)$$

在无噪声且恒模源数小于阵元数的条件下,公式(6)中阵列接收 X 的秩为 d ($d < M$)。如果能得到一个 $1 \times M$ 的权矢量 w , $w^H X = s$ 为用户信号,那么 w 具有不唯一的解。ACMA 可以看作一个降维预滤波器,如图 1 所示:

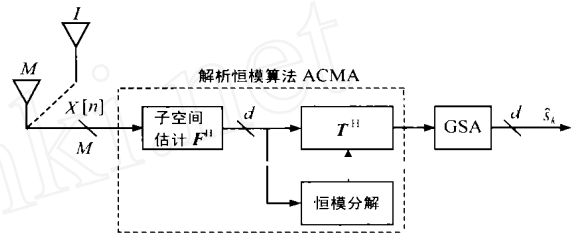


图 1 ACMA 盲信号分离结构框图

$$W = F \cdot T \quad (8)$$

式中 F 是 $M \times d$ 的降维矩阵,满足 $\text{span}(F) = \text{span}(A)$, T 是 $d \times d$ 的矩阵。通过降维矩阵运算后有:

$$\tilde{X} = F^H X = F^H \cdot A \cdot S + F^H \cdot N \quad (9)$$

式中 $\tilde{A} = F^H \cdot A$, $\tilde{N} = F^H \cdot N$,将式(8)带入式(7)中有:

$$S = W^H \cdot X = T^H \cdot \tilde{X} \quad (10)$$

ACMA 将恒模信号分解的问题转化为在 X 的信号子空间分解 CM 信号,而这些解应该具有 Kronecker 积的形式,再由联合矩阵对角化恢复出不同恒模源信号的权矢量。当存在噪声时我们只能得到近似联合矩阵对角化解,经过几次 Gerchberg-Saxton 算法 (GSA) 迭代使其收敛到期望用户信号。GSA 迭代算法形式如下

$$\begin{cases} s^{(k+1)} = P_{CM}(w^{(k)*} X) \\ w^{(k+1)*} = s^{(k+1)} X^\dagger \end{cases} \quad (11)$$

式中 $P_{CM}(s) = \left[\frac{s(1)}{|s(1)|}, \dots, \frac{s(n)}{|s(n)|} \right]$, $s^{(k+1)} = P_{CM}(s^{(k)} X^\dagger X)$,而 $X^\dagger X$ 是 X 在其行空间上的投影。

3.2 恒模算法的时空扩展

CMA 的时空扩展可以看作均衡器与波束形成器组成的空时滤波器,定义加权矩阵 w 具有以下形式:

$$W = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \dots & w_{1,M} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \dots & w_{2,M} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ w_{L,1} & w_{L,2} & \dots & w_{L,M} \end{bmatrix} \quad (12)$$

经多径衰落信道,所期望的用户信号经空时滤波器之后具有恒模特性,阵列接收信号矩阵 X 为:

$$X[n] = \begin{bmatrix} r_1^1[n] & r_1^2[n] & \dots & r_1^M[n] \\ r_2^1[n] & r_2^2[n] & \dots & r_2^M[n] \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ r_L^1[n] & r_L^2[n] & \dots & r_L^M[n] \end{bmatrix} \quad (13)$$

引入矩阵的向量化算子:

$$x[n] = \text{vec}(X[n]), LM \times 1 \quad (14)$$

$$w = \text{vec}(W), LM \times 1 \quad (15)$$

空时滤波器输出 $y[n]$ 可以写作:

$$y[n] = w^H x[n] \quad (16)$$

构造 ST-CMA 恒模代价函数:

$$J_{\text{ST-CMA}}(w) = E[|w^H x[n]| - 1|^2] \quad (17)$$

类似地,由第二节的信号模型,第 k 个用户的扩频序列为 $c_k = [c_k[0], c_k[1], \dots, c_k[G-1]]$. 由 Kronecker 积构造时空权矩阵 W ,并截取无码间串扰 (ISI) 的一段数据,则有:

$$W = A \odot C = [a_1 \odot c_1^T, \dots, a_d \odot c_d^T]$$

$$= \begin{bmatrix} a_{11}c_1[m_1] & \dots & a_{d1}c_d[m_1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1L}c_1[m_1 + \tilde{L} - 1] & \dots & a_{dL}c_d[m_1 + \tilde{L} - 1] \end{bmatrix} \quad (18)$$

ST-ACMA 用户估计输出为:

$$\hat{s}[n] = W^H r[n] = W^H \tilde{H}s[n] + W^H u[n] \quad (19)$$

W 是空时联合解码权矩阵,类似 ACMA 的形式,我们可以得到相应的 ST-ACMA 的解. 由于联合矩阵对角化的维数只与用户数相关,因此,虽然空时联合解码权矩阵 W 维数很高,但经过预滤波降维处理后运算量只与用户数有关.

两种空时算法运算量分析如下:对于 $m \times n$ 维的矩阵 X 进行 SVD 分解得到 Σ, V 的运算量为 $2mn^2 + 4n^3$,因此 ST-ACMA 的运算量大约为 $O(N^3)$,而 ST-CMA 对每用户每次迭代的运算量大约在 $O(N^2)$,一般说来 ST-CMA 的运算量要比 ST-ACMA 小. 考虑恒模误差在 10^{-6} 的条件下,ST-CMA 一般需要 20 - 100 次迭代收敛,可以看出当迭代次数较大、用户数较多 (且仍满足 $d^2 \leq N$) 时,ST-CMA 的运算量又会比 ST-ACMA 大. 为了充分利用两者的优势,可以考虑在信号盲分离时采用 ST-ACMA 得到初值,而利用 ST-CMA 跟踪锁定每一个用户.

4 算法性能分析

(1) ST-ACMA 可分辨的用户数 $d \leq M \times L_c$, 其中 L_c 为扩频码长, M 为阵元数,而 ACMA 可分辨的用户数 $d \leq M$, 所以 ST-ACMA 可分辨用户数是 ACMA 的 L_c 倍;

(2) ST-ACMA 与时空 Wiener 接收的关系:

考虑传统的波束形成,如果已知 A , 那么有 $W^H = A^\dagger, S$ 可以由下式估计:

$$S = \arg \min_S \|X - AS\|_F^2 = A^\dagger X \quad (20)$$

波束权矩阵 $W = (A^\dagger)^H$, 称之为 ZF 波束形成器,当 $W^H A = I$ 时,所有的干扰源均被抑制,使输出获得最大信干比 (SIR).

如果已知训练序列 s , 那么有:

$$W^H = \arg \min_W \|W^H X - S\|_F^2 = S X^\dagger \quad (21)$$

式中 $X^\dagger = X^H (\frac{1}{N} X X^H)^{-1}$, 因此式 (21) 可写为:

$$W^H = \frac{1}{N} S X^H (\frac{1}{N} X X^H)^{-1} = R_{xs}^* R_x^{-1} \quad (22)$$

式中 $R_x = \frac{1}{N} X X^H$ 是采样数据协方差矩阵,而 $R_{xs} = \frac{1}{N} \cdot X S^H$ 收敛于 A , 则 $W \rightarrow R_x^{-1} A$. 这一最优解称之为线性最小均方误差解 (LMMSE) 或 Wiener 解,由于并非所有的干扰源均被抑制,即 $W^H A \neq I$, 因此只能得到输出源的有偏估计,且信干噪比 (SINR) 最大. 文献 [8] 中证明 ACMA 收敛于 Wiener 解,同理可以得到 ST-ACMA 亦收敛于时空 Wiener 解.

5 仿真实验

实验中采用均匀线阵,阵元数 $M = 8$,阵元间距为半波长. CDMA 智能天线系统中载频是 1.8 GHz, 调制方式是 BPSK, 扩频码采用位长 $L_c = 31$ 的 Gold 序列. 采用 3 径衰落信道模型,脉冲函数是滚降系数 0.5 的升余弦函数. 多径的延时在 $[0, 4T_c]$ 均匀分布,用户 DOA 在 120 度范围内均匀分布. 实验结果均为 100 次 Monte-Carlo 实验后的平均值. 算法的性能由平均信干噪比 (SINR) 和恒模误差 (CME) 来衡量,分别记作 S_{SINR} 和 E_{CME} .

5.1 算法的收敛性能比较

实验对 ST-ACMA 与 ST-CMA 算法收敛速率进行比较,图 2 给出了 ST-ACMA + GSA 与 ST-CMA 的恒模误差 E_{CME} 随着迭代次数 P 的收敛情况. ST-ACMA 得到的是解析解,不存在迭代运算,但由于噪声及多址干扰的影响,解析解仍需经过 2 ~ 5 次 Gerchberg-Saxton 迭代才能收敛. 可以看出解析恒模算法为 GSA 提供了相当好的初值,ST-ACMA 性能明显优于 ST-CMA.

5.2 算法盲信号分离性能比较

阵元数 $M = 8$, 实验对三种恒模算法输出信干噪比 S_{SINR} 随用户数 K 的变化趋势进行了比较,如图 3 所示. 可以看出 ST-ACMA 与 ST-CMA 性能相近,而且在用户数较多的情况下

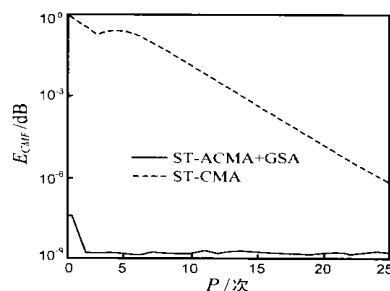


图2 两种算法收敛性能比较

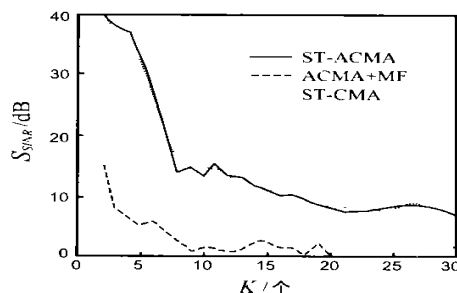


图3 输出信号 S_{SINR} 随用户数的变化

ST-ACMA 输出信号信干噪比优于 ST-CMA. 从图上看, ACMA 算法当用户数多于 8 后性能显著下降, ST-CMA 当用户数多于 30 时性能也显著下降, 而 ST-ACMA 当用户数多于 30 时性能还很好, 可见 ST-ACMA 有效地解决了 ACMA 可分辨用户数受天线阵元数限制的问题. 图 4 比较了 ST-ACMA 与 ZF、Wiener 接收之间的关系, 可以看出 ST-ACMA 的性能趋近 Wiener, 而远优于 ZF.

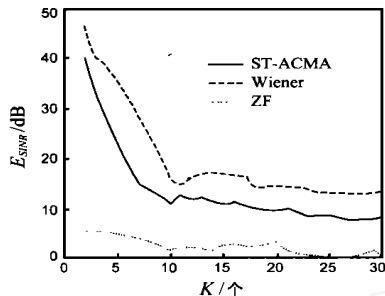


图 4 ST-ACMA 与 Wiener, ZF 的性能对比

6 结论

综上所述, ST-CMA 只能由迭代算法实现, 无法得到闭式解析解, ACMA 可分辨用户数受到天线阵元数限制. 针对以上问题, 本文提出的 ST-ACMA 算法是对 ACMA 方法时空域的扩展, 把基于阵列天线的空时二维信号处理方法应用于 CDMA 智能天线系统中, 提高了系统盲信号分离的性能. 数值仿真结果表明, 该方法具有收敛速度快, 并有效地解决了 ACMA 方法可分辨用户数受阵元数限制的问题.

参考文献:

- [1] J C Liberti, T S Rappaport. Smart Antennas for Wireless Communications [M]. NJ: Prentice Hall, 1999. 88 - 90.
- [2] M Chryssomallis. Smart antennas [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2000, 42(3): 129 - 136.
- [3] Y Sato. A method of self-recovering equalization for multilevel ampli-

tude-modulation systems [J]. IEEE Trans on Communication, 1975, 23 (4): 679 - 682.

- [4] D Gørdard. Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems [J]. IEEE Trans on Communication, 1980, 28(11): 1867 - 1875.
- [5] B Xu, T B Vu. Blind MAI and CCI suppression using adaptive array antennas in DS/CDMA mobile communication systems [A]. Proceedings of Signal Processing [C]. Beijing, China: IEEE Press, 1998, 1. 365 - 368.
- [6] B Xu, et al. Performance enhancement of space-time constant modulus array for smart antenna application [A]. Proceedings of Circuits and Systems [C]. Notre Dame, USA: IEEE Press, 1999. 502 - 505.
- [7] A J Van der Veen, A Paulraj. An analytical constant modulus algorithm [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1996, 44(5): 1136 - 1155.
- [8] A J Van der Veen. Asymptotic properties of the algebraic constant modulus algorithm [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2001, 49(8): 1796 - 1807.

作者简介:



冯爱刚 男, 1974 年出生于宁夏银川, 1996 年、1999 年分别获西安交通大学学士、硕士学位, 现为西安交通大学通信与信息系统博士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理、时空二维自适应信号处理等, 已在国内外发表论文十余篇.



殷勤业 男, 1950 年出生于江苏南京, 教授、博士生导师, 1982 年、1985 年和 1989 年分别获西安交通大学学士、硕士和博士学位, 现为西安交通大学信息工程研究所所长, 主要从事空间谱估计、智能天线、神经网络理论及应用和时频分析等方面的研究工作.