

一种新的天线阵列盲自适应波束形成算法

唐 恬 , 姜 军 , 张 平

(北京邮电大学电信工程学院 , 北京 100876)

摘要 针对 DS-CDMA 的上行链路多用户检测 , 提出了一种基于天线阵列的盲自适应波束形成算法。针对强干扰采用线性约束最小方差准则(LCMV) , 利用正交分解将 LCMV 简化为非约束的最小化优化问题 , 采用共轭梯度(CG)算法求得最优解。对期望用户信号波形的使用保证了用户符号信息的最优恢复。仿真结果表明 , 该算法相对传统算法可以获得更高的信号干扰比(SINR)。该算法不需要天线阵列单元数大于用户数 , 因此具有更好的实用性。

关键词 波束形成 ; 多用户检测 ; 天线阵列 ; 盲自适应

中图分类号 TP929.5

文献标识码 A

A New Blind Selfadaptive Beamforming Algorithm for Antenna Array

TANG Tian JIANG Jun ZHANG Ping

(School of Telecommunication Engineering , Beijing University of Posts and Telecommunications , Beijing 100876 , China)

Abstract An antenna array based blind selfadaptive beamforming algorithm is proposed for uplink multiuser detection in the DS-CDMA system. The linear constraint minimum variance (LCMV) criterion is chosen to deal with strong interference. With orthogonal decomposition , LCMV is reduced to an unconstrained minimization problem , the conjugate gradient (CG) algorithm is used to obtain the optimal solution. The desired user ' s signal waveform is utilized to ensure optimal recovery of the user ' s symbol information. Simulation result shows that signal - to - interference and noise ratio (SINR) of the proposed algorithm is better than that of the traditional algorithm. The new algorithm doesn ' t require the number of array elements to be greater than that of the users , which makes it have better practicability.

Key words beamforming ; multiuser detection ; antenna array ; blind selfadaptive

0 引言

基于天线阵列处理的波束形成是 CDMA 系统中重要的干扰抑制方法 , 也是近年来的一个热点研究领域。 Guo 提出了 CDMA 系统中基于天线阵列的最小均方误差(MMSE)接收机^[1]。 Rong 提出了最小二乘解扩重扩多目标恒模阵列(LS-DRMTCMA)算法 , 它结合信号的恒模特性 , 利用用户 PN 码信息进行天线阵列权重矢量的自适应调整 , 具有算法简单、稳健性好等特点^[2]。利用 LCMV 准则也可以实现盲自适应波束形成。考虑这样一个前提 : 向用户信号方向产生有效波束 , 在干扰信号方向形成零点 , LCMV 准则就是在这个前提下尽量最小化波束形成器输出功率。然而在 DS-CDMA 系统中直接利用 LCMV 准则对接收信号处理不能保证用户符号信息的最优恢复 , 对解扩处理的考虑是必须的。本文结合信号解扩与 LCMV 准则 , 提出了一种新的天线阵列 DS-CDMA 系统上行链路空时自适应多用户检测算法 , 通过计算机仿真证明了该算法相对 LS - DRMTCMA 算法的性能优势。

1 系统模型

考虑一个 DS-CDMA 系统的上行同步信道 , 有 K 个用户同时向一个具有接收天线阵列的基站发送二进制信息。第 k 个用户的基带信号表示为 :

$$x_k(t) = \sqrt{p_k} b_k s_k(t) \quad (1)$$

式中 , p_k 、 b_k 和 $s_k(t)$ 分别表示第 k 个用户的信号功率、信息符号和扩频信号波形。

考虑基站天线阵列是有 M 个天线单元的线性阵列 , 它们保持半波长等间隔。简单而不失一般性 , 假定每一个天线单元是全向的。来自第 k 个用户的信号在第 m 个天线单元上表示为 :

$$y_{mk}(t) = \sqrt{p_k} b_k s_k(t) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(m-1)d \sin \theta_k} \quad (2)$$

式中 , d 表示相邻天线单元的间隔 ; λ 表示平面波的波长 ; θ_k 表示第 k 个用户信号的到达方向角(DOA)。可以推出来自第 m 个天线单元的接收信号表达式 :

$$y_m(t) = \sum_{k=1}^K \sqrt{p_k} b_k s_k(t) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(m-1)d \sin \theta_k} + v_m(t) \quad (3)$$

收稿日期 2005-09-25

基金项目 科技部 863 课题基金资助项目(2004AA123180)。

式中, $v_m(n)$ 表示第 m 个天线单元上的加性高斯白噪声 (AWGN)。

在接收机前端, 一个码匹配滤波器对接收信号进行采样。来自第 m 个天线单元的第 n 个符号间隔的第 l 个码周期的接收数据可以表示为:

$$y_m(n, l) = \sum_{k=1}^K \sqrt{p_k} b_k(n) s_k(l) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(m-1)d \sin \theta_k} + v_m(n, l) \quad l = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中, N 表示处理增益。

定义如下列向量: $s_k = [s_k(1) \ s_k(2) \ \dots \ s_k(N)]^T$, $v_m(n) = [v_m(n, 1) \ v_m(n, 2) \ \dots \ v_m(n, N)]^T$, $y_m(n) = [y_m(n, 1) \ y_m(n, 2) \ \dots \ y_m(n, N)]^T$ 。可以得到:

$$y_m(n) = \sum_{k=1}^K \sqrt{p_k} b_k s_k \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(m-1)d \sin \theta_k} + v_m(n) \quad l = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

2 盲自适应波束形成

为了恢复期望用户信号, 一组线性滤波器 $w_m = [w_m(1) \ w_m(2) \ \dots \ w_m(N)]^T$, $m = 1, 2, \dots, M$ 被应用到接收信号:

$$\begin{aligned} z(n) &= w^H y(n) = \sum_{m=1}^M w_m^H y_m(n) = \\ &= \sum_{m=1}^M w_m^H \sum_{k=1}^K \sqrt{p_k} b_k(n) s_k \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(m-1)d \sin \theta_k} = \\ &= \sum_{k=1}^K \sqrt{p_k} b_k(n) w^H g(\theta_k) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, w 、 $y(n)$ 和 $g(\theta_k)$ 都是 $(M \cdot N) \times 1$ 的列向量:

$$\begin{aligned} w &= [w_1^T \ w_2^T \ \dots \ w_M^T]^T; \\ y(n) &= [y_1^T(n) \ y_2^T(n) \ \dots \ y_M^T(n)]^T; \\ g(\theta_k) &= [s_k^T s_k^T e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}2d \sin \theta_k} \ \dots \ s_k^T \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(M-1)d \sin \theta_k}]^T. \end{aligned}$$

假定所关注的是第一个用户, 为了恢复这个期望用户信号, 信道与多用户检测器的联合响应需要指向这个用户信号的方向, 与此同时, 为了抑制其他用户信号的干扰, 在干扰信号的方向上应该形成零点, 也就是:

$$w^H g(\theta_i) = \begin{cases} 1 & i = 1 \\ 0 & i = 2, 3, \dots, K \end{cases} \quad (7)$$

利用式(7)得到:

$$C^H w = f \quad (8)$$

式中, $C = [g(\theta_1) \ g(\theta_2) \ \dots \ g(\theta_K)]$; $f = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$ 。

根据 LCMV 准则, 天线阵列输出信号功率服从一系列线性约束而最小化。得出一个带有约束的最优化问题:

$$\min_w E\{|z(n)|^2\} = \min_w E\{w^H y(n) y^H(n) w\} = \min_w w^H R w,$$

服从式(8)。这里 $E[\cdot]$ 表示求数学期望, R 是天线

阵列的自相关矩阵, 定义为:

$$R = E\{y(n)y^H(n)\} \quad (9)$$

矩阵 R 的每个元素表示不同信号源的相关结果, 例如 R_{ij} 表示阵列的第 i 和 j 天线单元的相关值。使用拉格朗日乘数法解决这个最优化问题, 最优化结果:

$$w_{\text{opt}} = R^{-1} C \{C^H R^{-1} C\}^{-1} f \quad (10)$$

根据式(10), 一旦获得系统中所有用户的 DOA 以及接收信号的相关值, 就可以建立 LCMV 波束形成器。然而在算法实现中计算逆矩阵是非常复杂的工作, 提出一种高效的迭代算法来解决这个问题, 这个算法基于共轭梯度(CG)算法来更新自适应权重矢量。将权重矢量分解为 2 个正交成分^[3], 一个依赖于矩阵 C 的列扩展空间, 表示为 w_q , 另一个依赖于矩阵 C 的零空间, 表示为 $-C_a w_a$:

$$w = w_q - C_a w_a \quad (11)$$

这个 $M \cdot N \times (M \cdot N - K)$ 维信号矩阵 C_a 是满秩的, 而且满足 $C C_a^H = 0$ 。根据式(8)的限制, 得到:

$$C^H w = C^H(w_q - C_a w_a) = C^H w_q = f \quad (12)$$

于是 w_q 可以通过最小二乘(LS)准则得到:

$$w_q = C(C^H C)^{-1} f \quad (13)$$

结合式(11), LCMV 准则变为:

$$\begin{aligned} \min_w E\{|z(n)|^2\} &= \min_w w^H R w = \\ &= \min_w w_a^H C_a^H R C_a w_a - \\ &\quad w_q^H C_a^H R w_q - w_q^H R C_a w_a \end{aligned} \quad (14)$$

可见 LCMV 波束形成被简化为式(14)描述的非约束最小化问题。因为 $C_a^H R C_a$ 是对称且正定的, 通过 Fermat 定理, 推出:

$$C_a^H R C_a w_a = C_a^H R w_q \quad (15)$$

CG 算法可以用来解这个线性方程, Chang 给出了该解法细节^[4]。

3 仿真结果

对提出的盲自适应波束形成算法进行计算机仿真, 验证其性能。所有的仿真都是基于一组 8 个单元的天线阵列和扩频因子 32 的 DS-CDMA 信号。PN 序列通过移位寄存器产生, 按码速率采样。仿真时随机产生期望用户 DOA, 干扰信号 DOA 在 $30 \sim 150^\circ$ 之间均匀分布, 干扰用户的信噪比(R_{SN})是 0 dB。

进行 2 类仿真, 第一类仿真根据提出的波束形成器结构采用归一化波束模式, 期望用户的 R_{SN} 是 -10 dB。图 1(a)画出了系统中存在 5 个到达用户, 期望用户 DOA 是 108° 角时, 归一化波束形成器响应对方向角的函数曲线。可见该响应在期望用户的 DOA

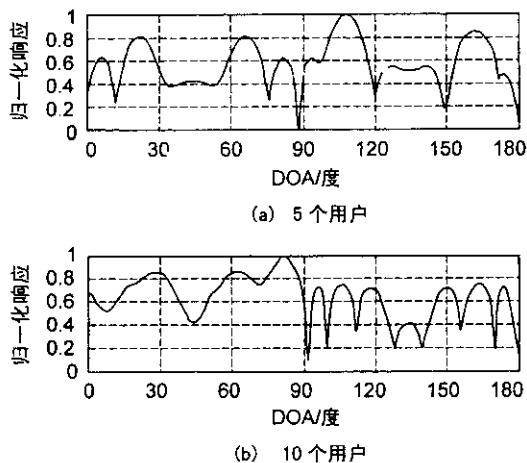


图 1 方向图

上形成主波束，在其他 DOA 位置上形成零波束。这意味着提出的方法可以高效地压缩来其他用户的干扰和噪声。

我们也关心波束形成器性能受多址干扰影响的程度，考虑负载用户数大于天线单元数的情况（区别于要求负载用户少于天线单元数的子空间算法^[5]）。图 1(b)画出了系统中存在 10 个到达用户，期望用户 DOA 是 82°角时，归一化波束形成器响应对方向角的函数曲线。可见这种情况下该波束形成器仍然是有效的。

第二类仿真，采用波束形成器的输出 SINR 指标来考察它的性能，同时也和 LS-DRMTCMA 算法进行性能比较。SINR 值计算如下：

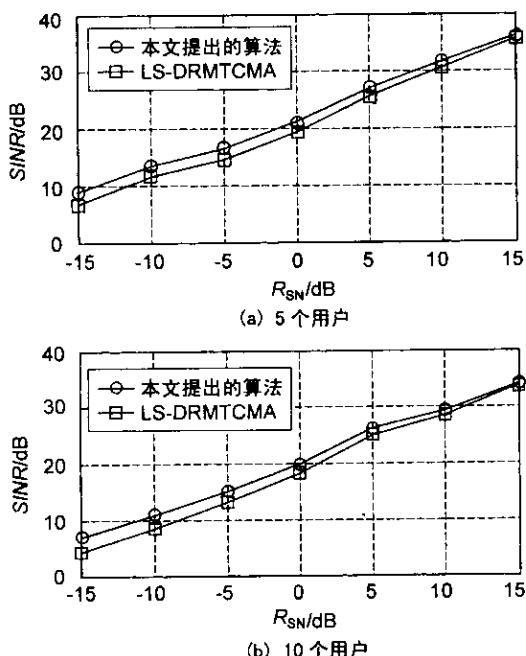


图 2 SINR 性能

$$SINR = \frac{P_1}{w^H H [y' y'^H] w} \quad (16)$$

式中， y' 是所有干扰与噪声之和。画出波束形成器的输出 SINR 对期望用户发射 R_{SN} 的函数曲线。图 2 分别画出系统在 5 个和 10 个用户下的 SINR 表现，可见随着 R_{SN} 增强，系统 SINR 也增强。在同样仿真条件下根据 LS-DRMTCMA 算法进行仿真，也画出它的 SINR 对 R_{SN} 的函数曲线。意料之内，LS-DRMTCMA 算法性能次于提出的算法，因为算法考虑到了波束形成时的解扩过程。随着 R_{SN} 的恶化，本文提出的算法更具有性能优势，在 -10 dB 的 R_{SN} 下，输出 R_{SN} 高于 LS-DRMTCMA 算法约 2.5 dB。

4 结束语

本文提出了一种新的天线阵列盲自适应波束形成算法，计算基于 LCMV 准则的最优权重矢量。LCMV 波束形成被简化为一个非约束最小化问题，用本文提出的基于 CG 算法的自适应算法进行处理。期望用户信号波形在整个处理过程中都被用到，保证了用户符号信息的最佳恢复。计算机仿真证明，提出的算法比 LS-DRMTCMA 算法能得到更高的 SINR 增益。此外，该算法也比传统的子空间算法拥有更广的应用范围，因为子空间算法需要天线阵列单元数大于用户数，而本文提出的算法并不需要这个前提。

参考文献

- [1] Z Guo, K B Letaief. Adaptive MMSE Receiver with Beamforming for DS/CDMA Systems [J]. IEEE Trans. Wireless Communication, 2003, 2(4): 605–610.
- [2] Z Rong, T S Rappaport, P Petrus, J H Reed. Simulation of Multitarget Adaptive Array Algorithms for Wireless CDMA System [J]. IEEE VTC, 1997, 1(47): 1–5.
- [3] L J Griffiths, C W Jim. An Alternative Approach to Linearly Constrained Adaptive Beamforming [J]. IEEE Trans. Antennas Propagate, 1982, 30(1): 27–34.
- [4] P S Chang, A N Willson. Analysis of Conjugate Gradient Algorithms for Adaptive Filtering [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2000, 48(2): 409–418.
- [5] A J Van Der Veen. Algebraic Methods for Deterministic Blind Beamforming [J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(10): 1987–2008.

作者简介

唐恬男 (1981-)，博士研究生。主要研究方向：通信系统物理层关键技术。

姜军男 (1972-)，博士。主要研究方向：数字信号处理。

张平男 (1959-)，博士生导师。主要研究方向：移动通信。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>