

文章编号:1006-2467(2003)03-0316-04

码分多址移动通信系统中的一种新智能天线结构

戎 璐, 谢剑英

(上海交通大学 自动化系, 上海 200030)

摘 要: 利用码分多址(CDMA)系统中的用户伪随机(PN)码信息,提出了一种新的自适应智能天线结构.它采用双参考信号的特殊结构,同传统的智能天线结构相比,既不依赖需要占用系统带宽的训练序列,也不会造成具有较大延时的反馈环路.为验证这一新智能天线结构的性能,提出了一种实现算法,并进行了收敛性分析.仿真结果表明,该智能天线结构及其算法在无训练序列的 CDMA 环境下完全可行,且其性能非常接近传统的依赖于训练序列的智能天线算法的性能.

关键词: 智能天线;码分多址;自适应波束形成

中图分类号: TN 929.533

文献标识码: A

New Smart Antenna Receiver Structure in CDMA Mobile Communication Systems

RONG Lu, XIE Jian-ying

(Dept. of Automation, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

Abstract: A new receiver structure was proposed for adaptive smart antennas in CDMA mobile communication systems, requiring only the knowledge of the desired user's pseudo noise (PN) code sequence. With a special structure based on a pair of reference signals, it has several advantages over the conventional structures, i. e. there is neither need of training signal, which may degrade the spectrum efficiency, nor need of feedback circuit that may suffer from large delay and other drawbacks. In order to test the feasibility of the new structure, an algorithm was also provided as a possible realization of the structure. The convergence of the algorithm was proved. The simulation results show that the algorithm under the new receiver structure works well in a CDMA environment without training signal, and its performance approximates to that of its counterparts, which is dependent on the training signals.

Key words: smart antennas; code division multiple access(CDMA); adaptive beamforming

码分多址(CDMA)系统是干扰受限系统,可以通过利用智能天线减少多址干扰和同道干扰来达到增加系统容量或提高系统性能的目的.时间参考波束形成(TRB)方法是最适合 CDMA 系统的自适应智能天线实现方法之一,但是它强烈依赖于预知参考信号^[1~3].

本文提出的智能天线结构,利用期望用户的伪

随机(PN)码信息,采用了双参考信号的系统结构,避开对导频信号的依赖,从而扩展了 TRB 算法在 CDMA 环境中的应用范围.同 Compton 等^[4]所采用的经解扩后再重扩频的方法相比,具有多干扰时不因反馈耦合造成性能显著下降,不需要缓存接收信号,适合于各种扩频增益等优点.

为了验证这种新智能天线结构的可行性,本文通过对 LMS 算法加以改造,初步实现了这种智能天线结构,并证明了其收敛性.仿真实验结果同理论分析结果基本吻合,验证了该智能天线结构在无导频信号的 CDMA 系统环境中的可行性.

收稿日期:2002-02-20

作者简介:戎 璐(1975),男,博士生,主要从事 CDMA 移动通信系统中的智能天线研究.

1 CDMA 系统中智能天线一般结构

CDMA 系统中自适应智能天线的一般结构如图 1 所示。接收信号经过下变频和模数转换后,通过一个波束形成网络,得到输出 $y(k)$,波束形成网络的权重向量由 TRB 算法控制,而实现 TRB 算法所需要的输入参数主要包括阵列上的接收信号 $x(k)$ 和输出 $y(k)$ 同本地参考信号 $d(k)$ 间的误差。

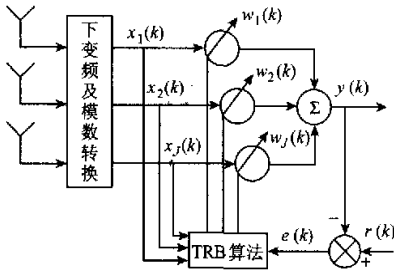


图 1 CDMA 系统中自适应智能天线的一般结构

Fig. 1 A general receiver structure of adaptive smart antennas in CDMA systems

在 CDMA 系统中,参考信号 $d(k)$ 一般由占用一定系统带宽的导频信道提供(见图 2(a)),或者是在对接收信号完成解调后,利用恢复的信息比特重构(见图 2(b))^[5~7]。

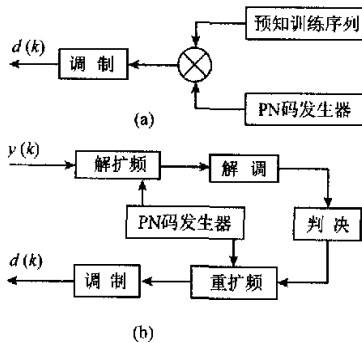


图 2 CDMA 系统中获得本地参考信号的两种方法

Fig. 2 Two strategies to generate local reference signals

典型的最小均方(LMS)算法的迭代过程如下:

$$y(k) = w(k)^T x(k)$$

$$e(k) = d(k) - y(k)$$

$$w(k+1) = w(k) + \mu x^*(k) e(k)$$

其中: $x(k)$ 、 $w(k)$ 、 $y(k)$ 、 $d(k)$ 和 $e(k)$ 分别为天线阵列上接收的信号、权重、合成后的输出信号、参考信号以及参考信号同输出信号之间的误差。

2 基于双参考信号的智能天线结构

在多径时延扩展相对较小时, CDMA 系统天

线阵列上接收的基带信号可表示为

$$x(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_M(k)]^T = \sum_{u=1}^U c_u \left(\left\lfloor \frac{kT_c - \tau_u}{T_c} \right\rfloor \right) b_u \left(\left\lfloor \frac{kT_c - \tau_u}{T_b} \right\rfloor \right) \times \sqrt{P_u(k)} \alpha_u(k) + n(k) \quad (1)$$

式中: M 为阵元个数; U 为扇区中的活动用户数; T_b 和 T_c 分别为信息比特周期和码片周期; $c_u(\cdot)$ 、 $b_u(\cdot)$ 、 τ_u 、 $P_u(k)$ 和 $\alpha_u(k)$ 分别为用户 u 的 PN 码、信息比特、传播延时、接收功率和阵列响应向量; $n(k)$ 为高斯噪声。

对接收信号的同步是容易实现的,所以不失一般性,在对用户 u 的接收中,可设 $\tau_u = 0$, 于是

$$c_u \left(\left\lfloor \frac{kT_c - \tau_u}{T_c} \right\rfloor \right) b_u \left(\left\lfloor \frac{kT_c - \tau_u}{T_b} \right\rfloor \right) = c_u(k) b_u \left(\left\lfloor \frac{kT_c}{T_b} \right\rfloor \right)$$

注意到每个信息比特周期内 $b_u(\cdot)$ 值保持不变,而 $b_u \in \{-1, +1\}$, 因此,期望的信号序列只包含两种可能。只要在接收端知道用户 PN 码序列 $c(k)$, 就可以同时产生两种可能的参考序列:

$$r_0(k) = \text{mod}(c(k) \cdot (+1)) = \text{mod}(c(k))$$

$$r_1(k) = \text{mod}(c(k) \cdot (-1)) = \text{mod}(-c(k))$$

采用相移键控的调制方式时,上式可简化为

$$r_1(k) = -\text{mod}(c(k)) = -r_0(k)$$

当然,只知道两种可能的参考序列是不够的。因为当信息比特改变时,参考序列也发生改变。如果信息比特的同步是可能的,则还需设计一个判决模块,以周期性地从两种参考序列所得结果中选取一个更符合实际接收信号的结果,并适时对系统中的参变量作出必要的调整。为此,本文提出如图 3(a) 所示的基于双参考信号的智能天线结构;在图 3(b) 中则给出了一种具体的算法实现,以便说明在该智能天线结构中对算法单元中参数的调整过程。

在各种 TRB 算法中, LMS 算法不但具有复杂度低的优点,而且其计算的中间过程包含有利于判决的权重差信息,所以选取 LMS 算法的基本计算单元来构造新的适合于双参考信号的智能天线算法。新算法命名为 DR-LMS 算法,其计算过程如下:

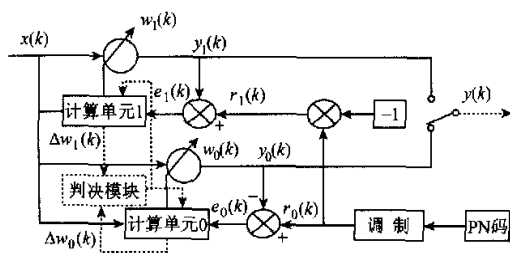
(1) 初始化;

(2) for $k=0, 1, \dots, p-1$

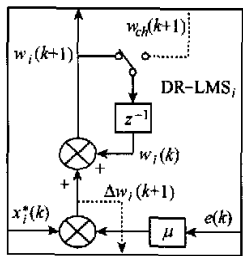
$$\begin{bmatrix} y_0(k) \\ y_1(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_0^T(k) \\ w_1^T(k) \end{bmatrix} x(k)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta w_0(k+1) \\ \Delta w_1(k+1) \end{bmatrix} = \mu \begin{bmatrix} x_0^*(k) (d_0(k) - y_0(k)) \\ x_1^*(k) (d_1(k) - y_1(k)) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} w_0(k+1) \\ w_1(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_0(k) \\ w_1(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta w_0(k+1) \\ \Delta w_1(k+1) \end{bmatrix}$$



(a) 基于双参考信号的智能天线结构



(b) DR-LMS 算法中的计算单元

图 3 基于双参考信号的智能天线结构

Fig. 3 Double reference signals based smart antenna structure

(3) 判决过程. 从两个基本计算单元中提取 $\Delta w_0(k+1)$ 与 $\Delta w_1(k+1)$, 将权重变化较小单元的标号设为二进制变量 ch 的值, $ch \in \{0, 1\}$;

(4) 如果 $k = p-1$, 则

$$w_{\overline{ch}}(k+1) = w_{ch}(k+1), \quad \overline{ch} = ch \oplus 1$$

(5) 返回步骤(2).

在每个循环周期 p 内两个计算单元并行工作, 相互独立, 它们的参考信号分别为 $r_0(k)$ 和 $r_1(k)$. 但在每个周期结束时, 只有一个权重结果被判决模块选取, 并作为下一周期两个 LMS 处理单元的共同的初始权重.

3 DR-LMS 算法的收敛性

定理 假设相关矩阵 R_{xx} 的最大特征值为 λ_{\max} , DR-LMS 算法的步长因子为 μ , 则 DR-LMS 算法在 $0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$ 的条件下收敛.

证明 设实际接收的期望用户信号序列为 $d(k)$, 则 DR-LMS 算法的权重迭代可以一般性地表示为

$$w(k+1) =$$

$$w(k) + \mu x^*(k) [\pm d(k) - x^T(k)w(k)] \quad (2)$$

对式(2)两边取期望, 可得

$$E\{w(k+1)\} = (I - \mu R_{xx})E\{w(k)\} \pm \mu r_{xd} \quad (3)$$

针对式(3)右端第 2 项前正负号的不确定性, 设

DR-LMS 算法中在第 k 步被判决单元决定的有效参考信号为 $(-1)^{ch(k)} d(k)$, $ch(k) \in \{0, 1\}$, 则由初始权重 $w(0)$ 经递推可得第 $k+1$ 步的权重为

$$E\{w(k+1)\} = (I - \mu R_{xx})^{k+1} w(0) + \mu \sum_{i=0}^k (-1)^{ch(i)} (I - \mu R_{xx})^i r_{xd} \quad (4)$$

在有关 LMS 算法的文献中, 式(4)右端第 1 项的收敛性已得到证明^[6], 即当 $|1 - \mu \lambda_{\max}| < 1$ 时,

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (I - \mu R_{xx})^k \rightarrow 0$$

通过对相关矩阵 R_{xx} 作对角化, $R_{xx} = Q^{-1} \Lambda_{xx} Q$, 可得

$$I - \mu R_{xx} = Q^{-1} \text{diag} \left[\sum_{i=0}^k (-1)^{ch(i)} (1 - \mu \lambda_1)^i, \dots, \sum_{i=0}^k (-1)^{ch(i)} (1 - \mu \lambda_{M-1})^i \right] Q$$

其中, $\lambda_i (i=1, 2, \dots, M-1)$ 为 R_{xx} 的特征值. 因为

$$\begin{aligned} \sum_{i=k}^{k+m} (-1)^{ch(i)} (1 - \mu \lambda_i)^i &\leq \sum_{i=k}^{k+m} |(-1)^{ch(i)} (1 - \mu \lambda_i)^i| = \sum_{i=k}^{k+m} |1 - \mu \lambda_i|^i \leq \\ \sum_{i=k}^{k+m} |1 - \mu \lambda_{\max}|^i &\leq \sum_{i=k}^{\infty} |1 - \mu \lambda_{\max}|^i = \\ \frac{|1 - \mu \lambda_{\max}|^m}{1 - |1 - \mu \lambda_{\max}|} \end{aligned}$$

所以, 经过大量迭代后有

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{i=k}^{k+m} (-1)^{ch(i)} (1 - \mu \lambda_i)^i \rightarrow 0$$

因此, 式(4)右边第 2 项也是收敛的. 证毕

4 仿真

仿真是在 DS-CDMA 环境下进行的. 每个小区有 24 个移动用户, 均匀分布在 3 个 120° 扇区内, 采用三元天线阵列. 码片速率为 1.228 8 Mcchip/s, 信息比特速率为 19.2 Kb/s. 以 DR-LMS 为双参考信号智能天线结构的实现算法, 以基于传统智能天线结构的 LMS 算法作为对照. 为便于比较, DR-LMS 和 LMS 算法的步长都设置为 $\mu = 0.0001$, 权重初值为 0.01. DR-LMS 算法的运行中, 假定无训练序列可以使用; 作为对照的 LMS 算法则假定完全预知用户的所有信息比特, 以作为其参考信号.

图 4 说明了判决模块在基于双参考信号的智能天线结构中的作用. 图中, k_0 表示已接收的比特数. 由图可见, 由于信息比特未知, 单独采用任何一个 LMS 单元都会受到信息比特变化的影响而出现偏离, 无法收敛; 但是, 当有判决模块周期性地协调两个 LMS 单元间的权重后, 一个计算单元发生的偏离能够被另一个计算单元及时纠正, 最终使权重保

持正确收敛. 由于无论信息比特如何变化, 所接收的信号序列必然与两个参考信号之一相吻合, 所以不需要借助于任何训练序列就可以获得收敛.

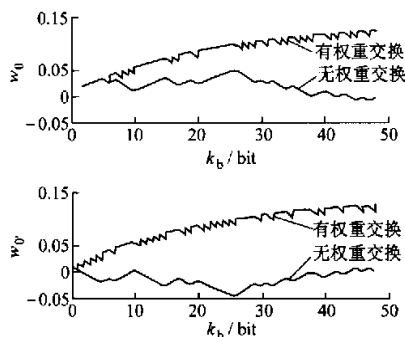


图4 判决模块在双参考信号智能天线结构中的作用

Fig. 4 The role of judge module in double reference signals based smart antenna structure

图5显示了循环周期 p 对DR-LMS算法性能的影响. 显然, 随着 p 的增大, 算法性能很快改善, 当 $p=16$ 时, DR-LMS权重曲线几乎同借助于训练序列的LMS算法的权重曲线重合.

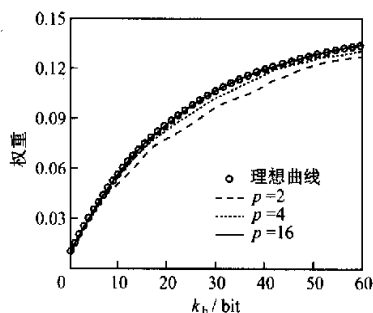


图5 不同循环周期下DR-LMS算法性能的比较

Fig. 5 Comparison of the performance of DR-LMS algorithm under various weight exchanging periods

5 结 语

本文提出了基于双参考信号的智能天线结构,

充分利用了用户PN码提供的有效信息, 与传统智能天线结构相比, 有其独特的优点. 为了验证新结构的可行性, 提出了DR-LMS算法, 分析了DR-LMS算法的性能. 仿真实验结果表明, 基于双参考信号的智能天线结构是可行的. 由于LMS单元本身的计算复杂度非常小, 而且两个单元可以采用并行结构, 所以DR-LMS算法从计算复杂度的角度考虑也是可行的. 在缺乏训练序列的CDMA系统中, 基于双参考信号的智能天线结构可以体现出明显的优势; 而在可以少量地获得训练序列的CDMA系统中, 它也可以有效地利用预知序列信息改善性能. 这方面算法的优化尚有待于进一步深入研究.

参考文献:

- [1] 张 煦. 新一代移动通信系统的发展前景[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(6): 92-96.
ZHANG Xu. Development trends of new generation mobile communications systems [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1997, 31(6): 92-96.
- [2] Thompson J S, Grant P M, Mulgrew B. Smart antenna arrays for CDMA systems [J]. *IEEE Personal Communications*, 1996, 3(5): 16-25.
- [3] Boukalov A O, Haggman S G. System aspects of smart-antenna technology in cellular wireless communications - an overview [J]. *Microwave Theory and Techniques IEEE Trans*, 2000, 48(6): 919-929.
- [4] Compton R T Jr. An adaptive array in a spread-spectrum communication system [J]. *Proc IEEE*, 1978, 66(3): 273-282.
- [5] Chryssomallis M. Smart antennas [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2000, 2(3): 129-136.
- [6] Mozingo R A, Miller T W. Introduction to adaptive arrays [M]. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [7] Choi S, Shim D. A novel adaptive beamforming algorithm for a smart antenna system in a CDMA mobile communication environment [J]. *Vehicular Technology IEEE Transactions on*, 2000, 49(5): 1793-1806.

下期本栏论文摘要预告

基于 Dahlin 控制算法的网络流量控制

沈 伟, 胡立生, 邵惠鹤

(上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030)

摘 要: 在 ATM 网络的 ABR 通信中, 基于速率反馈的流量控制是防止拥塞和保证高吞吐量的有效手段之一, 然而网络的传播时延对其具有很大的不利影响. 采用 Dahlin 控制算法设计流量控制器, 克服了传播时延给控制的快速性和稳定性所带来的不利影响. 理论分析表明, 该算法的动态性能明显优于 PID 控制, 能保证网络缓冲器的不溢出及带宽的公平分配和充分利用, 从而有效地防止了拥塞的发生, 使网络处于良好的运行状态. 仿真结果验证了这一结论.

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,一直致力和专注于微波、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>