

# CDMA 系统中自适应阵列天线的改进算法

徐彦琴 张志涌

南京邮电学院电子工程系 210003

**摘 要** 为改善调节阵列天线阵元权向量自适应算法的收敛稳定性,本文提出了一个改进算法。该新算法不仅稳定、简单,而且能大大降低误码率。仿真结果对本算法给予了有力的支持。

**关键词** CDMA 自适应阵列天线 LMS 算法

码分多址(CDMA)系统是第三代移动通信系统的一种核心技术。影响码分多址系统性能的两个重要因素是:多址干扰和远近效应。由于各用户的扩频码很难达到完全正交,以及多径信号的存在,导致了多址干扰。而所谓远近效应是指:由于远处用户信号到达接收器时功率较弱,而发生强干扰信号淹没弱用户信号的情况。

为克服多址干扰对系统性能的影响,各国学者研究并提出了诸多的解决方案,比如采用多用户检测、RAKE 接收、智能天线技术等。其中智能天线的特殊一类:自适应阵列天线以其特有的优势正受到越来越多的关注。

## 1. 问题提出

自适应阵列天线利用空间滤波克服多址干扰,为用户信号提供定向高增益,而对其他方向的干扰保持零限或较低的增益。自适应阵列天线由天线阵、波束形成器以及自适应算法组成,其原理框图如图 1 所示。

在调节天线波束的自适应算法中,LMS 算法运用最广。该算法通常需要参考信号。算法的稳态结果由参考信号和接收信号的相关性决定。虽然系统不强求参考信号与所需信号完全一致,但要求与所需信号很好相关。相关性越强,自适应阵列天线的性能就越佳。然而,因为天线权向量的调整是基于误差信号进行的,当误差信号中含有较强剩余干扰和噪声时,LMS 算法的收敛性就很难保证。为此,本文提出 LMS 的改进算法。

## 2. CDMA 系统前端阵列天线

### 2.1 信号模型

假设:同步 CDMA 系统中,有  $K$  个用户同时发射。其中第  $k$  个用户信息码为  $b_k(t)$ ,扩频码为  $S_k(t)$ ; 比特间隔为  $T_b$ , 每个扩频码序列包含  $G$  个 Chip, 每个 Chip 的间隔为  $T_c$ , 且  $T = T_b/G$ ; 扩频码与信息码均为  $\pm 1$  电平;接收到的信号功率为  $P_k$ ; 所有发射信号的载

频为  $\omega_c$ ，相位为  $\delta_k$ 。那么接收到用户  $k$  的信号可表示为：

$$r_k(t) = \sqrt{p_k} b_k(t) S_k(t) \exp\{j\omega_c t + j\delta_k\} \quad (1)$$

## 2.2 前端阵列天线

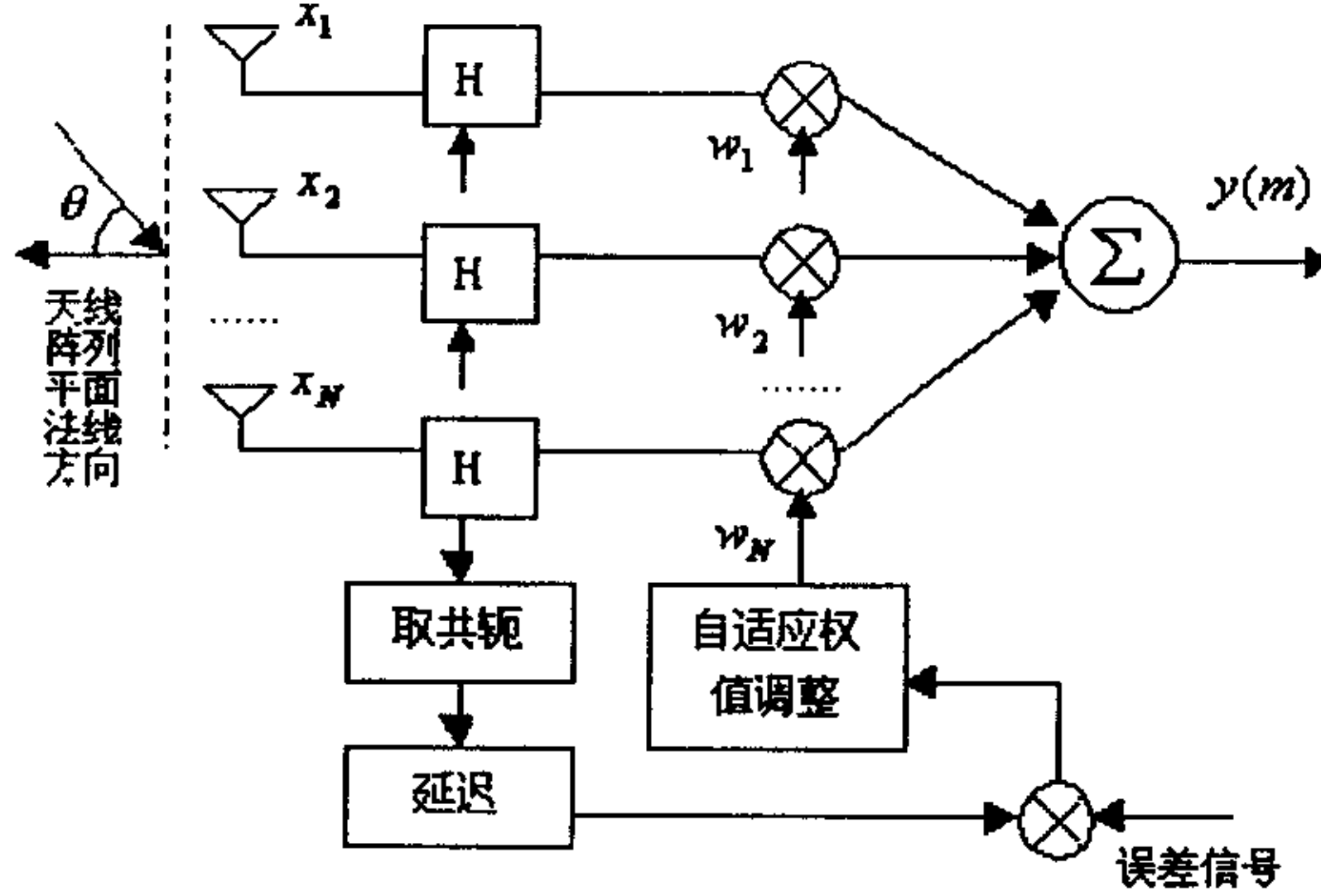


图1 自适应阵列天线原理框图

图1示意了阵列天线的原理框图。假设阵列天线为等间距直线阵，包括  $N$  个全向阵元，阵元相距  $L$ ，载波波长为  $\lambda$ 。其中， $H$  代表正交分解， $\underline{w} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$  为阵元的复权向量， $\theta$  表示用户入射方向与阵列法线间的夹角。 $x_n, n=1, 2, \dots, N$  为阵元  $n$  所接收到的经过解调的基带信号。根据式(1)，考虑噪声和干扰，得到阵元  $n$  在时刻  $T = mT_c$  的采样基带信号为：

$$x_n(m) = \sum_{k=0}^{K-1} \sqrt{P_k} b_k(m) S_k(m) \exp\left[-j \frac{(n-1)L}{\lambda} 2\pi \sin(\theta)\right] + n_w(m) \quad (2)$$

由此得到阵列的输出信号：

$$\begin{aligned} y(m) &= \sum_{n=1}^N \operatorname{Re}[w_n^*(m) x_n] \\ &= \sum_{n=1}^N \{\operatorname{Re}[x_n(m)] \operatorname{Re}(w_n) + \operatorname{Im}[x_n(m)] \operatorname{Im}(w_n)\} \end{aligned} \quad (3)$$

令

$$g_k = \sum_{n=1}^N \left\{ \text{Re} \left[ \exp \left( -j \frac{(n-1)L}{\lambda} 2\pi \sin(\theta) \right) \right] \text{Re}(w_n) + \text{Im} \left[ \exp \left( -j \frac{(n-1)L}{\lambda} 2\pi \sin(\theta) \right) \right] \text{Im}(w_n) \right\}$$

将 (2) 式代入 (3) 式, 可得:

$$y(m) = \sum_{k=0}^{K-1} \sqrt{p_k} g_k b_k(m) S_k(m) + z_w(m) \quad (4)$$

其中,  $g_k$  代表了阵列天线对用户  $k$  的影响,  $z_w(m)$  代表经过加权作用后的噪声分量。通过自适应算法, 不断调节阵元权向量, 使阵列天线对多址干扰进行比较有效的抑制。

### 2.3 LMS 算法

由于 LMS 算法实现简单, 所以在实际中得到了广泛的应用。该算法采用最小均方准则。其递推公式为:

$$\underline{w}(m+1) = \underline{w}(m) + 2\mu e^*(m) \underline{x}(m) \quad (5)$$

其中,  $\underline{w}(m) = [w_1(m), w_2(m), \dots, w_N(m)]^T$ ,  $\underline{x}(m) = [x_1(m), x_2(m), \dots, x_N(m)]^T$ ,

$e(m) = r(m) - y(m)$  为误差信号,  $r(m)$  为参考信号。参数  $\mu$  为自适应步长, 控制算法收敛性。

### 3. 算法改进

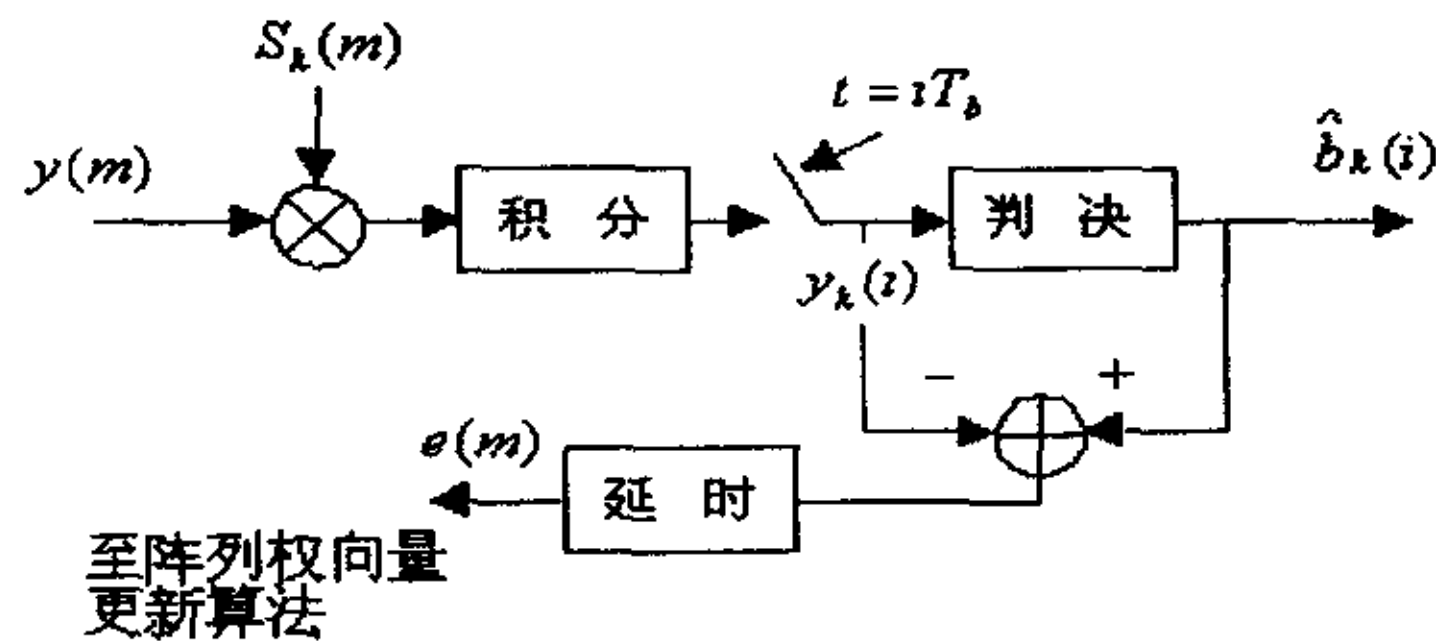


图 2 改进算法误差信号的产生

天线输出  $y(m)$  解扩时, 由于不同用户扩频码接近正交, 干扰用户信号被大大抑制。参考信号  $r(m)$  由解扩后信号经再次扩频而得。可是, 由于原算法据  $e(m) = r(m) - y(m)$  获得

误差信号, 而  $y(m)$  中包含相当大的干扰和噪声, 结果导致  $e(m)$  包含了显著的干扰和噪声, 使 LMS 算法收敛性难以保证, 特别在远近效应的情况下。

为保证算法收敛性, 本文对 LMS 算法的改进是: 采用判决器的判决误差作为 LMS 迭代运算信号。具体地说: 在每个比特 (而非 chip) 周期内, 构成接收端判决器输出与输入信号之间的差信号; 将该信号延时若干 (在 1 到  $G$  之间) 个 Chip, 反馈至自适应算法环节, 以计算新的权值。改进算法误差信号的产生如图 2 所示。

在图 2 中,

$$e(m + \tau) = \frac{1}{G} \left( \hat{b}_k(m) - \int_{(m-1)T_b}^{mT_b} y(t) S_k(t) dt \right) \quad (6)$$

式中,  $\tau$  表示延迟因子,  $G$  表示扩频码长度。判决器输出信号  $\hat{b}_k(m)$  为:

$$\hat{b}_k(m) = \text{sgn} \left( \int_{(m-1)T_b}^{mT_b} y(t) S_k(t) dt \right) \quad (7)$$

需要指出: 当系统采用能量归一的扩频码, 即对于任意用户  $k$ , 其扩频码序列  $S_k(t)$  满足:

$$\int_0^{T_b} S_k^2(t) dt = 1 \quad (8)$$

其中,  $T_b = GT_c$  为每比特周期。此时, 误差信号可写为,

$$e(m + \tau) = \hat{b}_k(m) - \int_{(m-1)T_b}^{mT_b} y(t) S_k(t) dt \quad (9)$$

## 4. 仿真结果

假设 CDMA 系统的多址用户数为 3, 各用户采用 31 位 Gold 序列作为扩频码。为了简化, 设各用户信号的初始相位  $\delta_k = 0, k = 0, 1, \dots, K-1$ 。基站接收机的阵列天线由四个等距直线排列的阵元组成, 阵元间距为载波波长的一半, 即  $L = \lambda/2$ 。设阵元权向量的调节步长  $\mu = 0.0001$ , 初始权值  $W_0 = [1, 0, 0, 0]^T$ 。

假设三个多址用户的入射方向分别为  $0^\circ, 30^\circ, -60^\circ$ , 其中第一个用户信号为有用信号, 而其他两个用户信号认为是干扰信号。在仿真中, 固定有用信号到达阵列时的信噪比  $SNR1 = 5\text{dB}$ , 干扰用户到达阵列天线时的信噪比用  $SNR2$  表示, 改变其大小, 分别对改进算法和传统 LMS 算法进行仿真, 绘制出系统的误码率曲线 (图 3)。改进算法的误码率几乎比 LMS 低 2 个数量级。

图 4 描绘了 LMS 算法和改进算法在自适应求解最优权向量时的均方误差曲线。其中指

定用户信噪比  $SNR1 = 5dB$ ，干扰用户信噪比  $SNR2 = 15dB$ 。从图 4 不难看出：

- (1) 由于两种算法都是基于梯度下降法导出的，所以它们的收敛速度相当。但是，相对于 LMS 算法而言，改进算法的运算量小得多。在改进算法中误差信号每一个比特周期更新一次。而在 LMS 算法中，误差信号和权向量则每个 Chip 周期均计算一次。
- (2) 在远近效应显著时，LMS 出现发散现象，而改进算法仍保证收敛。

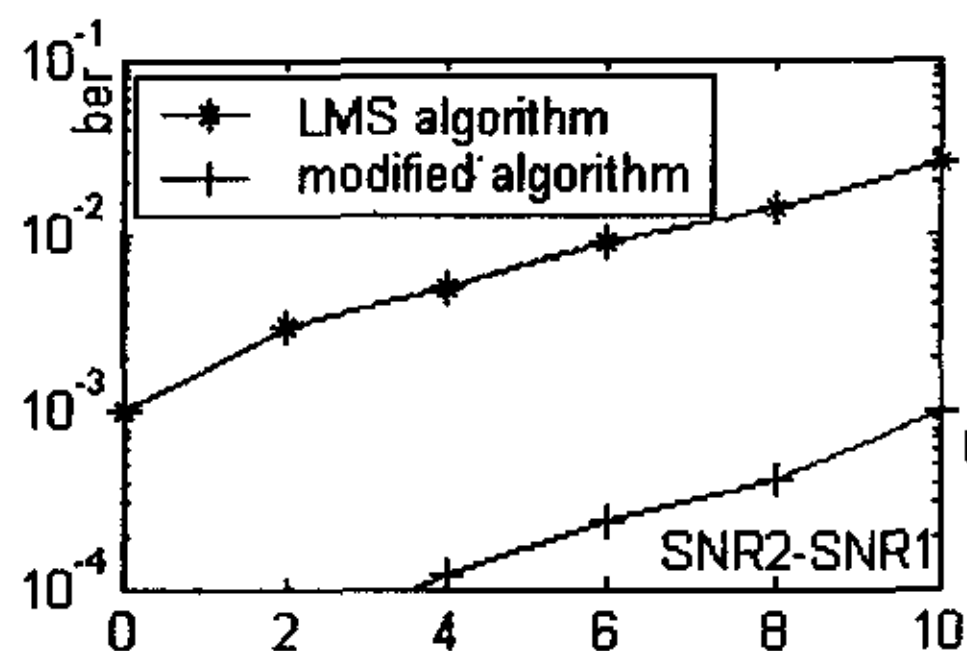


图 3 在不同远近效应背景下两种算法的误码率

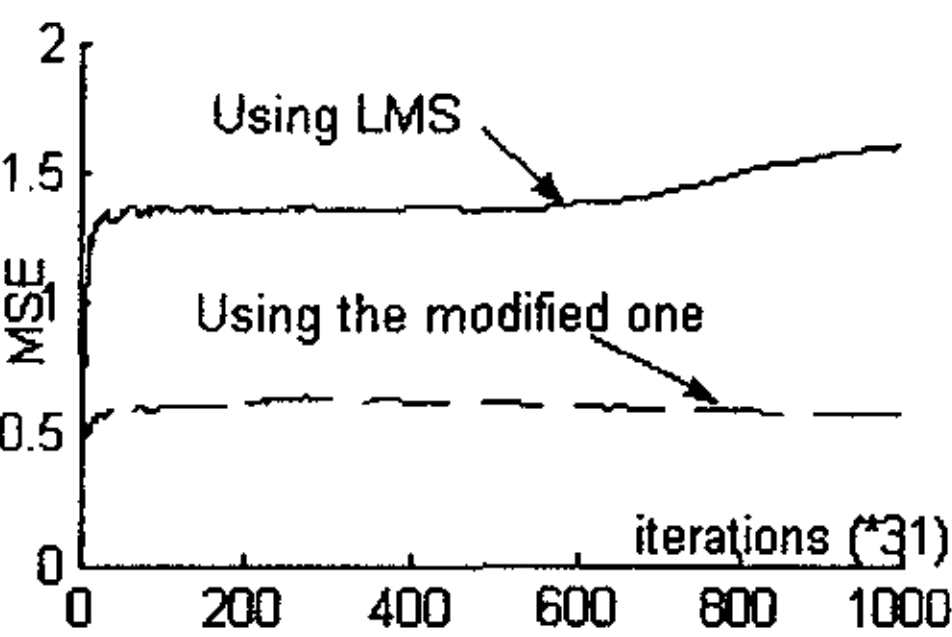


图 4 远近效应显著时，两种算法的收敛曲线

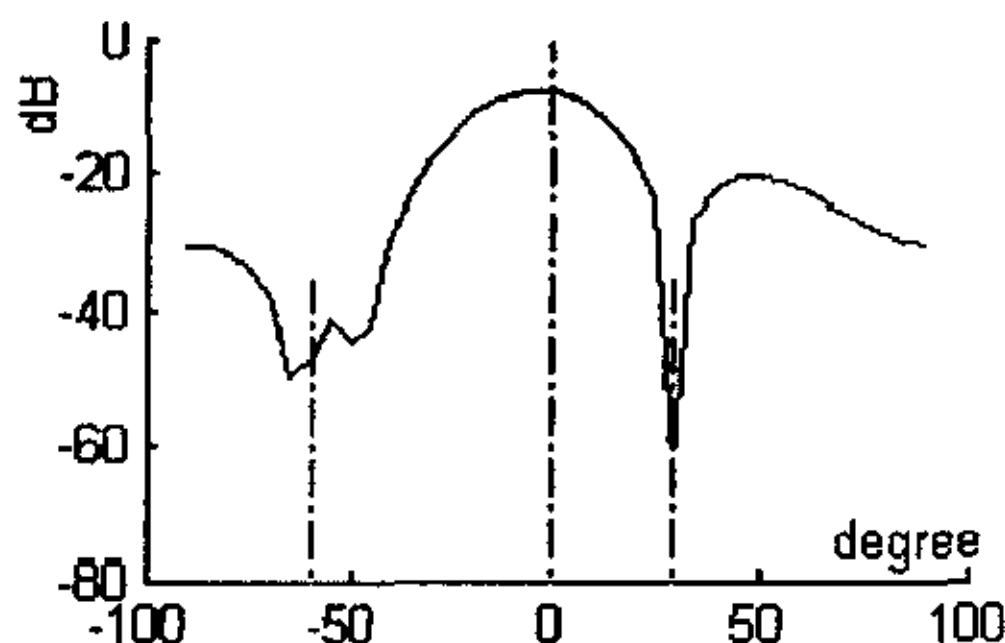


图 5 采用改进方法得到的天线阵列的方向图

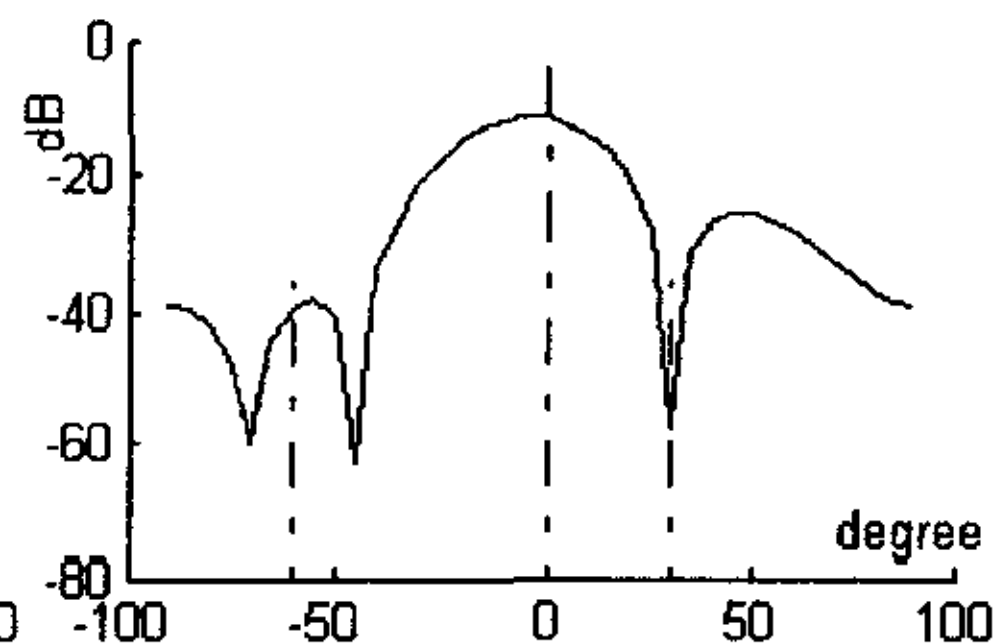


图 6 采用 LMS 方法得到的天线阵列的方向图

图 5、图 6 分别给出了两种算法调节天线阵元权向量后所产生的增益方向图。仿真时，取  $SNR1 = 5dB$ ， $SNR2 = 10dB$ 。图中自左至右的三条虚线分别标志了三个用户的入射角  $-60^\circ, 0^\circ, 30^\circ$  的位置。采用改进算法得到的阵元方向图在这三个用户入射方向上分别获得的增益大约为： $-47dB, -7.5dB, -60dB$ ；而采用传统 LMS 算法得到的增益约为： $-40dB, -11.5dB, -58dB$ 。这些数据同样表明，改进算法可以更有效地抑制干扰信号

## 5. 结束语

本算法在实现天线权向量优化调节时，并不需要训练序列，因此是一种盲算法。由于篇幅关系，本文没有给出改进算法的深层数学背景。关于此，将另文叙述。

## 参 考 文 献

- 1 唐瑜等。CDMA 系统中自适应阵列天线结合参数估计方法抗多址干扰技术的研究[J]。通信学报, 1999, (7)。
- 2 Thompson J.S., et al. Smart Antenna Arrays for CDMA systems, IEEE Personal Com. Oct. 1996.

# A modified algorithm of adaptive array antennas in CDMA systems

Xu Yanqin      Zhang Zhiyong

Nanjing University of Post & Telecommunications

**Abstract**      In order to increase the convergence stability of LMS, adapting the weigh vector of array antennas, the paper proposes a modified algorithm. The novel algorithm is not only stable and simple, but also reduces the bit error rate remarkably. The results of simulation have provided powerful evidences.

**Key words**      CDMA    Adaptive array antenna    LMS algorithm

## 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](http://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](http://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](http://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>