

# 无线光码分多址中一种改进的盲多用户检测算法

吴鹏飞 柯熙政 梁 薇

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要** 干扰消除是无线光码分多址(CDMA)通信系统中的一项关键技术。分析了基于递归最小二乘(RLS)算法的盲多用户检测算法的原理及性能,并将其应用于采用光正交码的无线光 CDMA 系统中。讨论了该系统中遗忘因子的选取原则及其对算法的收敛性和系统误码率性能的影响。为了克服固定遗忘因子所带来的矛盾,提出了一种改进的变遗忘因子 RLS 盲多用户检测算法,并对遗忘因子进行了修正。结果表明,采用改进的方法后系统能获得较快的收敛速度和跟踪速度,收敛时的估计误差也较小,而且信号干扰比由传统算法的 6 dB 提高到 9 dB。说明采用变遗忘因子的 RLS 算法不仅适合于采用光正交码的无线光 CDMA 系统,而且跟踪期望用户信号的性能良好。

**关键词** 光通信;无线光码分多址;盲多用户检测;递归最小二乘

**中图分类号** TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0206005

## A Modified Blind Multi-User Detection Algorithm for Wireless Optical Code Division Multiple Access Systems

Wu Pengfei Ke Xizheng Liang Wei

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,  
Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract** Interference cancellation is one of the key technologies in wireless optical code division multiple access (CDMA) systems. The principle and performance of blind multi-user detector algorithm based on recursive least square (RLS) are analyzed, and it is applied to wireless optical CDMA using optical orthogonal code (OOC). The selecting principle of forgetting factor, the convergence and error rate performance caused by forgetting factor are discussed. A RLS blind multi-user detection algorithm is proposed using variable forgetting factor. The forgetting factor is modified. The results show that the system using the improved method can get faster convergence speed and tracking speed of convergence and the estimation error is smaller. The signal to interference ratio is improved from 6 dB of the traditional algorithm to 9 dB. The RLS algorithm with variable forgetting factor is suitable for the wireless optical CDMA system using OOCs, and the performance of tracking the desired user signal is very good.

**Key words** optical communications; wireless optical code division multiple access; blind multi-user detection; recursive least square

**OCIS codes** 060.4510; 060.4230; 200.4650

## 1 引 言

无线光码分多址(WOCDMA)是将码分多址(CDMA)技术与无线光通信技术相结合的一种通信方式,它以光作为载波传送各种信息,允许多个用户随机地接入同一信道,具有良好的安全性和优良的

抗干扰能力,并能够充分地利用无线光的可用带宽<sup>[1~5]</sup>,具有很强的技术优势和广阔的应用前景,是目前国内外研究的热点之一。

非相干的 WOCDMA 系统一般采用单极性地址码,其相关性较差,会造成用户间干扰的产生。多

**收稿日期**: 2011-07-15; **收到修改稿日期**: 2011-09-27

**基金项目**: 国家自然科学基金(60977054)资助课题。

**作者简介**: 吴鹏飞(1980—),男,博士研究生,讲师,主要从事无线激光通信和信号处理等方面的研究。

E-mail: wupengf@xaut.edu.cn

**导师简介**: 柯熙政(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事现代信号处理、现代通信技术和导航技术等方面的研究。E-mail: xzke@xaut.edu.cn

址干扰(MAI)是 CDMA 通信系统中的主要干扰之一,多址干扰的存在会严重影响光码分多址(OCDMA)的链路性能,当同时接入的用户数较大时,多址干扰就成为最主要的干扰<sup>[6]</sup>。由于无线光信道的特殊性,背景光噪声和大气湍流噪声等信道噪声同样制约着系统的通信性能,远近效应也是降低 WOCDMA 系统性能的一个重要因素。为了提高系统在多用户环境下的性能,必须采用多用户检测(MUD)技术。

## 2 无线光 CDMA 中的干扰消除技术

在 OCDMA 系统中,多址干扰产生的原因主要在于地址码的不完全正交性。考虑码片同步 OCDMA 系统,设用户数为  $N$ ,假设所有用户地址码具有单位能量,则接收机的输入信号为<sup>[7]</sup>

$$r(t) = \sum_{k=1}^N \lambda_k b_k s_k(t) + \lambda_d, \quad (1)$$

式中  $b_k \in \{0, 1\}$  为用户  $k$  的信息比特值,  $\lambda_k$  为发送光功率,  $s_k(t)$  为用户  $k$  的地址码,  $\lambda_d$  为背景光噪声功率。用户地址码之间的互相关  $\rho_{ik}$  为

$$\rho_{ik} = \frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} s_i(t) s_k(t) dt, \quad (2)$$

令第  $k$  个用户经过传统检测后的输出  $r_k$  为<sup>[7]</sup>

$$r_k = \frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} r(t) s_k(t) dt = \lambda_k b_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \lambda_i b_i \rho_{ik} + n_k, \quad (3)$$

式中  $\sum_{i=1, i \neq k}^K \lambda_i b_i \rho_{ik}$  为多址干扰项,  $n_k$  为背景光噪声项。

如果用户地址码完全正交,则有  $\rho_{ik} = 0 (i \neq k)$ , (3)式中的多址干扰项为零,此时的传统检测就成为了最佳检测,而通常情况下用户地址码不可能完全正交。为了消除(3)式中的多址干扰项,较积极的办法是采用 MUD 技术。

MUD 技术是无线光 CDMA 通信系统抗干扰的关键技术。MUD 在传统检测技术的基础上,充分利用造成多址干扰的所有用户信号信息,使信号恢复的准确度更高,是消除或减弱多址干扰、多径干扰、远近效应的有效手段,具有优良的抗干扰性能。

已有的文献通常采用线性 MUD 技术改善 OCDMA 的系统性能,如解相关 MUD 及线性最小均方误差检测,通过在接收端采用一个线性算子对传统检测的输出进行线性变换<sup>[8]</sup>。也有文献采用非

线性 MUD,即 OS-OPIC(One stage-optical parallel interference cancellation)检测器,再生出每个用户对目标用户产生的干扰,从检测器的接收信号中减去这些再生的干扰,可以有效改善弱信号用户的检测性能,抑制远近效应对系统性能的影响<sup>[9]</sup>。

但以上传统的 MUD 算法需要知道所有节点的地址码,需要用户发送训练序列,造成带宽的浪费,还要提高其发射功率以保证判决的可靠性。并且 WOCDMA 通信在大气传输过程中会受到大气湍流的影响,产生大气闪烁的问题,因此接收端的光信号功率起伏不定,还会有一些不可预知的强干扰(如新的多径出现、新的干扰用户出现),造成系统性能突然恶化。在这种情况下,传统 MUD 算法无法迅速适应环境的变化,而盲自适应 MUD 技术不需要知道系统参数,也不需要用户重新发送训练序列,仅仅需要期望用户的地址码,检测时仅使用观测数据就可以使系统恢复正常,因此,盲自适应 MUD 技术适用于 WOCDMA 系统。

## 3 RLS 盲多用户检测算法

盲自适应 MUD 算法多采用最小均方(LMS)算法和递归最小二乘(RLS)算法。LMS 算法的优点是结构简单,稳健性强;缺点是收敛速度较慢。RLS 算法具有良好的收敛性和数值特性,对非平稳信号适应性较好,便于模块化实现<sup>[10]</sup>,由于其收敛速度快而更适用于环境复杂多变的无线信道中。本文主要分析 RLS 自适应算法在 OCDMA 中的性能。

RLS 自适应算法是一种指数加权的最小二乘算法,它使用加权的误差平方和作为代价函数。设用户 1 为期望用户,则  $c_1$  可以表示为<sup>[11]</sup>

$$c_1 = s_1 + x_1, \quad (4)$$

且满足  $s_1^T x_1 = 0$ , 并有  $\langle c_1, s_1 \rangle = \langle s_1, s_1 \rangle + \langle x_1, s_1 \rangle = \|s_1\|^2 = 1$ 。

由于  $s_1$  是用户 1 的扩频序列,因此线性 MUD 器  $c_1$  也可直接由正交分量  $x_1$  来描述。第 1 个分量  $s_1$  为用户 1 的特征波形,它在自适应算法中是不变的,而第 2 个分量  $x_1$  才是需要更新的。因此,检测器的更新设计就是滤波器系数  $c_1$  的更新,等价于  $x_1$  的更新。

最小输出能量检测器可以看成是在传统检测器的基础上增加了一个正交接收分量,而此向量通过输出值自适应调节。调节的准则为约束最小输出能量准则(CMOE),要求使<sup>[11]</sup>

$$f_{\text{CMOE}}(x_1) = E\{\langle s_1 + x_1, r \rangle^2\} = E\{[(s_1 + x_1)^T r]^2\} \quad (5)$$

取最小值,即检测器输出的能量可表示为期望信号的能量与干扰信号(背景噪声和多址干扰)能量之和,而期望信号的能量大小与  $x_1$  的选取无关,故最小化输出能量可以实现干扰部分的能量最小化,从而达到减小干扰的目的。

按照 CMOE 准则的 RLS 盲 MUD 器  $c_1$  应满足如下有约束的最优化问题<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} [c_1^T(n)r(i)]^2, \\ \text{s. t. } s_1^T c_1(n) = 1 \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $r$  为接收信号。满足  $0 < \lambda < 1$ ,  $\lambda$  的作用是对离  $n$  时刻较近的误差加比较大的权重,而对离  $n$  时刻较远的误差加比较小的权重,也就是说,  $\lambda$  对各时刻的误差具有一定的遗忘作用,因此称加权因子  $\lambda$  为遗忘因子<sup>[12]</sup>。

该优化问题的闭式解为<sup>[13]</sup>

$$c_1(n) = \frac{\mathbf{R}^{-1}(n)s_1}{s_1^T \mathbf{R}^{-1}(n)s_1}, \quad (7)$$

式中观测信号的自相关矩阵  $\mathbf{R}(n) = \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} [r(i)r^T \times (i)]^2$ 。整理得到,基于有约束的 RLS 方法的最小输出能量检测算法<sup>[10]</sup>:

$$k(n) = \frac{\mathbf{R}^{-1}(n-1)r(n)}{\lambda + r(n)^T \mathbf{R}^{-1}(n-1)r(n)}, \quad (8)$$

$$\mathbf{h}(n) = \mathbf{R}^{-1}(n)s_1 = \frac{1}{\lambda} [\mathbf{h}(n-1) - k(n)r(n)^T \mathbf{h}(n-1)], \quad (9)$$

$$c_1(n) = \frac{1}{s_1^T \mathbf{h}(n)} \mathbf{h}(n), \quad (10)$$

更新相关矩阵的逆矩阵<sup>[13]</sup>为

$$\mathbf{R}^{-1}(n) = \frac{1}{\lambda} [\mathbf{R}^{-1}(n-1) - k(n)r(n)^T \mathbf{R}^{-1}(n-1)], \quad (11)$$

盲 RLS 检测器输出为

$$\bar{b}(n) = \langle c_1, r \rangle = c_1^T(n)r(n), \quad (12)$$

MUD 算法的性能可以通过输出信号干扰比(信干比, SIR)来衡量。在时刻  $n$ , 定义检测器输出的信干比为<sup>[13]</sup>

$$f_{\text{SIR}_n} = \frac{E(c_n^T r_n)^2}{\text{var}[c_n^T r_n]}. \quad (13)$$

设定加性高斯白噪声下的同步 OCDMA 系统,期望用户 1 具有单位能量,即  $A_1^2 = 1$ ,其信噪比为 20 dB,处理增益或扩频增益为 31。有 3 个干扰用户,其中 2 个干扰用户分别具有 30 dB 的信噪比,1 个干扰用户具有 40 dB 的信噪比。选取了一组(30,

3,1)的光正交码作为输入信号的地址码。用户 1 到用户 4 的地址码分别为(0,1,3),(0,8,18),(0,4,9)和(0,6,13),对采用 RLS 算法的盲自适应 MUD 器进行了仿真,得到误码率(BER)性能曲线如图 1~3 所示。

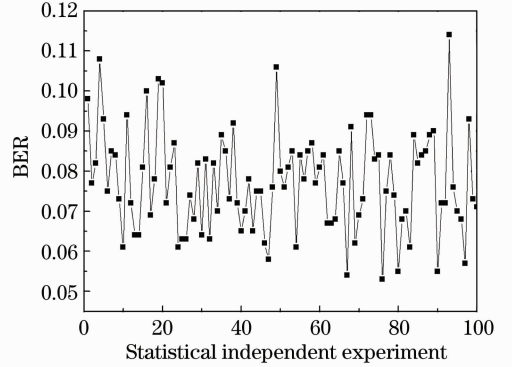


图 1 遗忘因子  $\lambda=0.99$  时 RLS 算法误码率曲线  
Fig. 1 BER curve of RLS detector when  $\lambda=0.99$

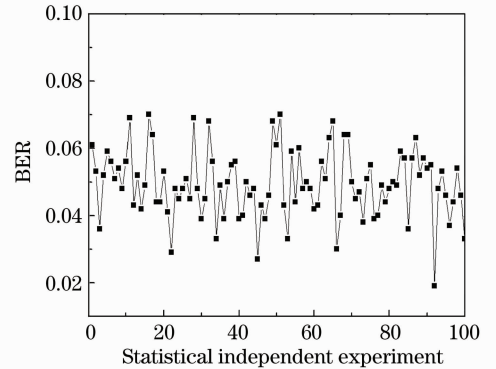


图 2 遗忘因子  $\lambda=0.997$  时 RLS 算法误码率曲线  
Fig. 2 BER curve of RLS detector when  $\lambda=0.997$

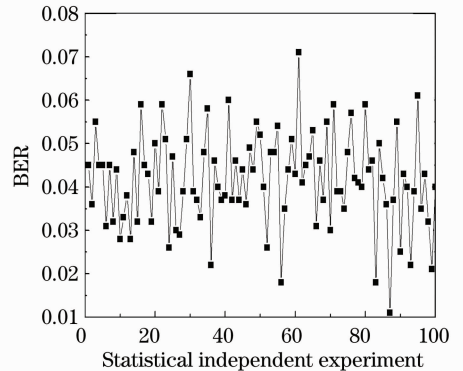


图 3 遗忘因子  $\lambda=0.9997$  时 RLS 算法误码率曲线  
Fig. 3 BER curve of RLS detector when  $\lambda=0.9997$

图 1 为  $\lambda=0.99$  时仿真在 100 次独立实验下所得出误码率结果。从图中可以看出利用 RLS 算法实现 OCDMA 的盲 MUD 的应用中,跟踪期望用户信号的性能比较良好,对期望用户发射的信息字符

的估计误码率较低,基本上能够较好地实现对 OCDMA 的盲 MUD。RLS 算法可以在无需训练序列的情况下很好地收敛,有效地抑制了多址干扰,系统误码率达到  $10^{-2}$ 。

图 2,3 分别为  $\lambda=0.997$  和  $\lambda=0.9997$  时的误码率曲线,可以看到, $\lambda$  越接近 1,算法性能越好,误码率越低。当算法迭代到 200 次的时候,加入一个具有单位能量的强多址干扰,进行 1000 次独立实验,在遗忘因子  $\lambda=0.99$  的情况下,得到算法收敛性能如图 4 所示。

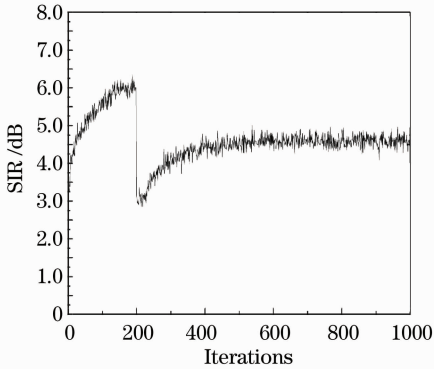


图 4 遗忘因子  $\lambda=0.99$  时 RLS 算法信干比曲线

Fig. 4 SIR curve of RLS detector when  $\lambda=0.99$

从图 4 可以看出,当系统中突然出现一个强干扰时,算法能迅速收敛于最优值,而且这时的收敛信干比和强干扰出现之前的收敛信干比相差不大。它不仅可以迅速地收敛并随时跟踪变化的动态环境,而且还可以保证比较高的输出信干比。

盲自适应 RLS 算法的收敛速度很快,性能较好,在 OCDMA 中具有很好的多址干扰的抑制能力及消除远近效应的能力,不需要发送训练序列,节省了宝贵的带宽资源,减小了能量的消耗。

#### 4 改进的变遗忘因子 RLS-MUD 算法

加权遗忘因子  $\lambda$  对算法的收敛速度和跟踪性能有很大的影响, $\lambda$  值越小,则算法对前面的误差遗忘得越快,对时变参数的跟踪能力越强,但同时误差信号对期望信号的依赖会很强,对噪声更敏感; $\lambda$  值越大,则算法对前面的误差遗忘得较慢,跟踪能力减弱,但对噪声不敏感,收敛时的估计误差也越小。而  $\lambda=1$ ,相当于各时刻的误差被同等对待,无任何遗忘功能; $\lambda=0$  相当于只有现时刻的误差起作用,而过去时刻的误差则完全被遗忘。

因此,为了克服固定遗忘因子所带来的矛盾,可以考虑采用变遗忘因子的思想,对  $\lambda$  进行修正,使它

既能获得较快的收敛速度和跟踪速度,又能使系统收敛时的估计误差小, $\lambda$  值的大小可以由误差值  $e(n)$  来决定。 $e(n)$  表示 MUD 器的输出相对于期望响应信号的误差。当  $e(n)$  值接近于 0 时, $\lambda$  由一条曲线趋于 1,反之当误差变大时, $\lambda$  由此曲线趋近于最小值。

考虑 Sigmoid 函数<sup>[14]</sup>,以  $e(n)$  作为 Sigmoid 函数的变量,当  $e(n)$  值接近于 0 时,Sigmoid 函数趋近于 1,反之当误差变大时,Sigmoid 函数趋近于 0。但在  $e(n)$  趋近于 0 处的自适应稳态阶段,Sigmoid 函数仍有较大变化。

对 Sigmoid 函数进行修正,以修正的 Sigmoid 函数作为遗忘因子参数,得到新的变遗忘因子 RLS-MUD 算法为

$$k(n) = \frac{\mathbf{R}^{-1}(n-1)r(n)}{\lambda(n) + r(n)^T \mathbf{R}^{-1}(n-1)r(n)}, \quad (14)$$

$$\mathbf{R}^{-1}(n) = \frac{1}{\lambda(n)} [\mathbf{R}^{-1}(n-1) - k(n)r(n)^T \mathbf{R}^{-1}(n-1)], \quad (15)$$

$$\lambda(n) = 0.1 \{1 - \exp[-\alpha(|e(n)|)^3]\} + \lambda_{\min}, \quad (16)$$

$\lambda_{\min}$  为遗忘因子的最小取值,这里取值 0.9。下面研究不同的  $\alpha$  取值对修正 Sigmoid 函数的影响。图 5 为本文算法在  $\alpha$  变化时的误差  $e(n)$  和遗忘因子曲线。

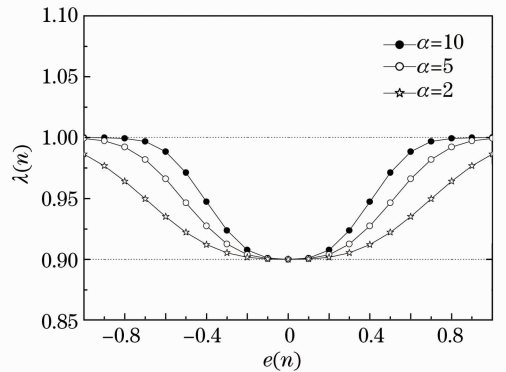


图 5 修正函数曲线

Fig. 5 Correct function curve

由图 5 可以看到,修正后的 Sigmoid 函数较简单,在误差  $e(n)$  接近于 0 处,具有缓慢变化的特性。

同样设定加性高斯白噪声下的同步 OCDMA 系统,期望用户 1 具有单位能量,即  $A_1^2=1$ ,其信噪比为 20 dB,处理增益或扩频增益为 31。有 3 个干扰用户,其中 2 个干扰用户分别具有 30 dB 的信噪比,1 个干扰用户具有 40 dB 的信噪比。选取一组 (30,3,1) 的光正交码作为输入信号的地址码。用户

1 到用户 4 的地址码分别为  $(0, 1, 3)$ ,  $(0, 8, 18)$ ,  $(0, 4, 9)$  和  $(0, 6, 13)$ , 对采用改进的变遗忘因子 RLS 算法的盲自适应 MUD 器进行仿真。在本实验中取  $\alpha=5$ , 进行 1000 次独立实验, 得到的性能曲线如图 6 和图 7 所示。

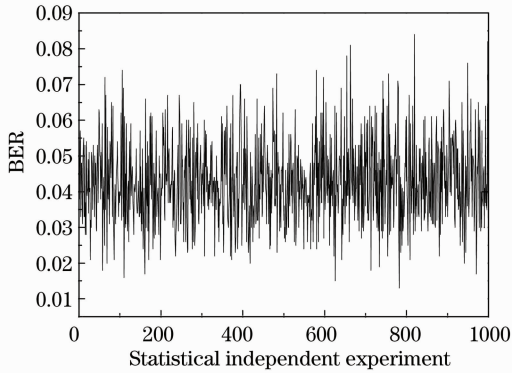


图 6 变遗忘因子 RLS 算法误码率曲线

Fig. 6 BER curve of variable forgetting factor RLS

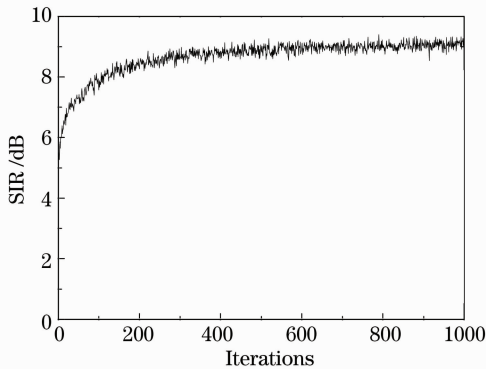


图 7 变遗忘因子 RLS 算法信干比曲线

Fig. 7 SIR curve of variable forgetting factor RLS

图 6 为采用改进的变遗忘因子 RLS 算法实现 OCDMA 的盲 MUD 时, 在 1000 次独立实验下仿真所得误码率结果。从图中可以看出, 在利用 RLS 算法实现的应用中, 对期望用户发射的信息字符的估计误码率较低, 误码性能近似于遗忘因子为 0.9997 的 RLS 算法, 基本上能够较好地实现对 OCDMA 的盲 MUD。RLS 算法可以在无需训练序列的情况下很好地收敛, 有效地抑制了多址干扰, 系统误码率达到  $10^{-2}$ 。图 7 为采用改进的变遗忘因子 RLS 算法实现 OCDMA 的盲 MUD 时, 在 1000 次独立实验下仿真所得信干比随迭代次数变化的曲线, 可以看到新算法跟踪期望用户信号的性能比较好, 信干比较高, 达到了 9 dB。

改进算法的特点是采用了改进的 Sigmoid 函数, 使变遗忘因子在计算过程中随着误差的变化而变化, 兼顾误码率和收敛性能。增大遗忘因子的取

值, 则算法对前面的误差遗忘得较慢, 跟踪能力减弱, 但对噪声不敏感, 收敛时的估计误差也越小。当算法稳定时在系统中加入一个强干扰, 算法也能迅速收敛于最优值, 具有较好的收敛速度。

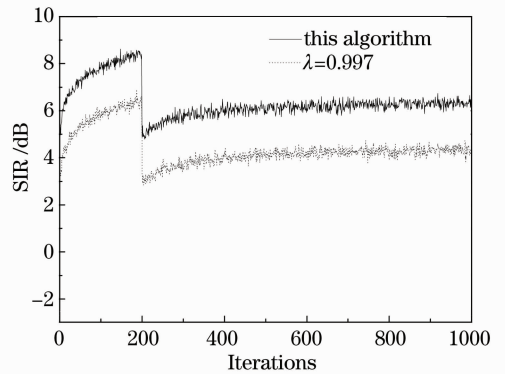


图 8 强干扰下本文算法与传统算法信干比曲线

Fig. 8 SIR curves of this algorithm and traditional algorithm under strong interferences

图 8 为在系统运行过程中突然加进新的用户时, 算法的收敛性能。在上文的仿真条件下, 当算法迭代到 200 次的时候, 加入一个具有单位能量的强多址干扰。将新算法与固定遗忘因子 0.997 的 RLS 算法进行对比, 由图 8 可见, 改进的变遗忘因子算法的收敛性要好于普通的固定遗忘因子 0.997 的 RLS 算法, 拥有较高的信干比。

## 5 结 论

为了寻找一种适合无线光 CDMA 通信系统的 MUD 算法, 首先讨论了无线光 CDMA 通信的多址干扰及无线信道对系统性能的影响, 研究了采用光正交码的 OCDMA 系统中 RLS 盲 MUD 算法的性能, 分析了不同遗忘因子取值对 RLS 算法性能的影响, 发现加权遗忘因子  $\lambda$  对算法的性能有很大的影响。为了解决这个问题, 通过建立遗忘因子  $\lambda$  与误差信号  $e(n)$  之间的函数关系 [(16) 式], 提出了一种新的变遗忘因子 RLS 盲 MUD 算法。计算机仿真结果表明, 该算法有较好的收敛性能。与传统固定遗忘因子的 RLS 盲 MUD 算法相比, 该算法有较高的信干比, 系统可以获得较优的误码率。这种变遗忘因子 RLS 盲 MUD 算法适用于无线光 CDMA 通信系统。

## 参 考 文 献

- 1 Fang Tao, Lu Lin, Li Yuquan *et al.*. Application of optical pulse source with frequency chirp in OCDMA system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 623~628
- 方涛, 卢麟, 李玉权等. 啁啾脉冲光源用于光码分多址系统的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 623~628

- 2 Pu Tao, Wang Rong, Li Yuquan. Non-Gaussian approximation method for phase encoding optical code division multi-access system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 10~14  
蒲涛, 王荣, 李玉权. 相位编码光码分多址系统中的非高斯分析方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 10~14
- 3 Yang Shuwen, Pu Tao, Xu Ming *et al.*. Research of algebraic congruent codes used in two-dimensional code division mutiaddress system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 225~229  
杨淑雯, 蒲涛, 徐铭等. 用于二维光码分多址系统的代数同余码研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 225~229
- 4 Tan Qinggui, Hu Yu, Zhou Xiuli *et al.*. Influence of atmospheric scintillation on performance of wireless optical CDMA system[J]. *J. Applied Optics*, 2006, **27**(1): 5~8  
谭庆贵, 胡渝, 周秀丽等. 大气闪烁对无线光 CDMA 通信系统性能的影响[J]. *应用光学*, 2006, **27**(1): 5~8
- 5 Fang Tao, Li Yuquan, Wang Rong. Study of pulse width effect on performance of optical code-division multiple-access en/decoder [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1939~1944  
方涛, 李玉权, 王荣. 脉宽对光码分多址编解码器性能的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 1939~1944
- 6 Zhang Haibin, Song Wentao, Huang Peizhong *et al.*. Multi-user detection for optical code division multiple access systems [J]. *J. Shanghai Jiaotong University*, 2002, **36**(5): 637~640  
张海滨, 宋文涛, 黄培中等. 多用户检测技术在光码分多址系统中的应用[J]. *上海交通大学学报*, 2002, **36**(5): 637~640
- 7 Lin Pei, Hu Yu, Zhou Xiuli. Multi-user detection for two-dimension W-OCDMA systems [J]. *Study on Optical Communications*, 2005, (2): 50~52  
林佩, 胡渝, 周秀丽. 二维 W-OCDMA 系统中的多用户检测技术[J]. *光通信研究*, 2005, (2): 50~52
- 8 L. B. Nelson, H. V. Poor. Performance of multiuser detection for optical CDMA. II [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1995, **43**(12): 3015~3024
- 9 Elfadel Nagi, A. A. Aziz, E. Idriss *et al.*. New receiver architecture based on optical parallel interference cancellation for the optical CDMA[J]. *J. Commun.*, 2008, **3**(1): 64~70
- 10 Lei Lihua, Shi Huli, Ma Guanyi. Study on performance of adaptive equalizer based on LMS and RLS algorithms [J]. *Microcomputer Information*, 2009, **25**(3-3): 25~27  
雷利华, 施浒立, 马冠一. 基于 LMS 与 RLS 算法的自适应均衡器性能研究[J]. *微计算机信息*, 2009, **25**(3-3): 25~27
- 11 M. Honig, U. Madhow, S. Verdu. Blind adaptive multiuser detection [J]. *IEEE Trans. Inf. Theor.*, 1995, **41**(4): 944~960
- 12 W. Junfeng. A variable forgetting factor RLS adaptive filtering algorithm [C]. 2009 3rd IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 2009, 1127~1130
- 13 H. V. Poor, X. Wang. Code-aided interference suppression for DS/CDMA communications—part II: parallel blind adaptive implementations [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1997, **45**(9): 1112~1122
- 14 Gao Ying, Xie Shengli. A variable step size LMS adaptive filtering algorithm and its analysis[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, **29**(8): 1094~1097  
高鹰, 谢胜利. 一种变步长 LMS 自适应滤波算法及分析[J]. *电子学报*, 2001, **29**(8): 1094~1097

栏目编辑: 谢 婧