

# 一种基于自适应算法的超宽带系统盲均衡技术

师小琳

(西安邮电学院 电子与信息工程系, 西安 710121)

(linda20016@163.com)

**摘要:**提出了一种适用于直接序列超宽带(DS-UWB)和跳时超宽带(TH-UWB)系统中的自适应盲均衡技术。该方法利用可变遗忘因子的自适应算法,快速有效地跟踪超宽带(UWB)时变信道的变化,从而有效地补偿由于信道特性引起的干扰。在接收过程中,不需要训练序列就可以修正均衡器系数,从而获得发送信号的估计量。此外,该算法收敛快,稳定性好。仿真结果表明,该方法可以有效地跟踪 UWB 衰落信道的变化,并获得较小的误码率。

**关键词:**超宽带系统;盲均衡;自适应算法

**中图分类号:**TP393 **文献标志码:**A

## Adaptive blind equalization for ultra wideband system

SHI Xiao-lin

(Department of Electronics and Information Engineering, Xi'an Institute of Posts and Telecommunications, Xi'an Shaanxi 710121, China)

**Abstract:** A new adaptive blind equalization technology was proposed for Direct Sequence-Ultra WideBand (DS-UWB) and Time-Hopping-Ultra WideBand (TH-UWB) wireless communication systems. This method can effectively track the variation of Ultra WideBand (UWB) channels by using the variable forgetting factor to the adaptive algorithm and thus can compensate the interference due to the properties of channels. When receiving the signals, it can adjust the coefficients of equalizers without using the training sequence and then obtain the estimation of the sent signals. Furthermore, this method has relatively rapid convergence rate and good stability. Simulation results show that the proposed method has better performance in tracking UWB fading channels and it also help obtain lower Bit Error Rate (BER).

**Key words:** Ultra WideBand (UWB) system; blind equalization; adaptive algorithm

## 0 引言

近年来,超宽带(Ultra WideBand, UWB)技术成为无线通信领域关注的热点之一。UWB 采用纳秒或亚纳秒级窄脉冲进行信号传输,因而 UWB 信号拥有极宽带宽。UWB 的主要特点是传输速率高,空间容量大即更大的网络用户数,以及成本低、功耗低等。但是,UWB 技术要真正广泛使用,仍面临一些理论和技术难题。其中之一就是如何在接收端有效地解调出用户的有用信息。利用 UWB 的多径传输特点,通常采用 RAKE 接收技术<sup>[1-6]</sup>。

然而,RAKE 技术仍有一些不足之处:1) 这些方法大多建立在信道估计的基础上<sup>[2-6]</sup>,因而接收机结构相对复杂一些;2) RAKE 接收机通常不考虑符号间串扰(InterSymbol Interference, ISI)而试图接收尽可能多的信号能量,使信噪比最大化,但这种无符号间串扰的假设往往不符合实际情况;3) RAKE 接收机的叉指数相对固定(一般为 3~10 个叉指),而 UWB 信道携带主能量的多径数远超过 RAKE 接收机的叉指数,若随着多径分量增多而增加叉指数,不但不易实现而且将会大幅提高接收机的复杂度。此外,这些方法往往需要训练序列<sup>[3,5-6]</sup>,这样一方面降低了信道利用率;另一方面,在数据传输过程中,难以实时有效地跟踪时变信道的变化。

自适应均衡器是补偿 ISI 的有效方法。它是在某种准则下应用自适应算法,根据信号和信道参数调整均衡器系数,从而获得发送信号的估计量。本文针对 UWB 系统的特点,提出一种无训练序列的自适应均衡算法,即自适应盲均衡算法。

该方法不仅满足 UWB 信道的时变特性,又具有收敛速度快、稳定等优点。

## 1 UWB 系统模型

跳时脉冲位置调制(Time-Hopping Pulse Position Modulation, TH-PPM)是最典型的超宽带无线通信调制方式,其信号波形如下:

$$S_{TH}^{(k)}(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} p(t - jT_f - c_j^{(k)}T_c - \varepsilon d_{j/N_s}^{(k)}) \quad (1)$$

其中:上标  $k$  为用户序号; $p(t)$  为窄冲激脉冲; $T_f$  是无调制情况下脉冲重复周期; $c_j$  为伪随机码序列,取值整数,且满足  $0 \leq c_j \leq N_h - 1$ ;  $T_c$  为码片时间,即伪随机码序列  $c_j$  的最小跳时间间隔; $\varepsilon$  是要传送的二进制符号  $d_j^{(k)}$  控制的发射脉冲时延,  $d_j^{(k)} \in \{-1, +1\}$ ; “[ ]”表示取整运算,每  $N_s$  个脉冲波形传送一个二进制符号;比特间隔即传输一个比特的时间为  $T_b = N_s T_c$ 。值得注意一点:PPM 调制引起的位移  $\varepsilon d_j$  通常比 TH 码引起的位移  $c_j T_c$  小得多,即  $\varepsilon d_j < c_j T_c$ 。

直接序列超宽带(Direct Sequence-Ultra WideBand, DS-UWB)是超宽带无线通信的另一种常见的调制方式,其信号波形为:

$$S_{DS}^{(k)}(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=0}^{N_s-1} d_j^{(k)} g_n^{(k)} p(t - jT_f - nT_c) \quad (2)$$

其中:  $d_j^{(k)} \in \{-1, +1\}$  是第  $k$  个用户要传送的二进制符号;  $g_n^{(k)} \in \{-1, +1\}$  是伪随机序列,用以实现多址;  $T_f$  表示脉冲重复周期;  $T_c$  表示信息周期。

收稿日期:2008-11-04;修回日期:2009-01-16。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70471057;60873196);陕西省教育厅自然科学基金资助项目(03Jk065)。

作者简介:师小琳(1980-),女,陕西西安人,助教,硕士,主要研究方向:现代通信、随机信号处理、自适应信号处理。

本文采用 IEEE 标准化组织 P802.15 工作组建议的超宽带室内信道模型进行仿真<sup>[7]</sup>。该信道模型是 Intel 公司根据 UWB 信号的传播实验数据在经典宽带室内信道 Saleh-Valenzuela (S-V) 模型的基础上修改得到的。该模型反映了多径成簇到达的特点,并且很好地拟合了实验数据。具体信道模型如下:

$$h(t) = \sum_{l=0}^L \sum_{k=0}^K \alpha_{k,l} \delta(t - T_l - \tau_{k,l}) \quad (3)$$

其中,  $\alpha_{k,l}$  为多径衰减系数;  $T_l$  为第  $l$  簇的时延;  $\tau_{k,l}$  表示以  $T_l$  为基准,第  $l$  簇的第  $k$  个多径分量的时延。多径衰减系数  $\alpha_{k,l}$  可以是实数或复数,但为了方便分析通常定义为  $\alpha_{k,l} = \rho_{k,l} \beta_{k,l} \circ p_{k,l}$  取值为  $\pm 1$ ,用于描述因信号反射引起随机的脉冲倒相。 $\beta_{k,l}$  为对数阴影衰落效应。 $|\beta_{k,l}|$  采用均值为  $\mu_{k,l}$ ,方差为  $\sigma^2$  的对数正态分布。多径能量  $E[\beta_{k,l}^2]$  成双指数分布。而簇到达时间和簇内多径的到达时间均服从泊松分布。

对于 TH/DS-UWB 系统而言,第  $k$  个用户的信道输出为  $y_{\text{TH/DS}}^{(k)}(t) = S_{\text{TH/DS}}^{(k)}(t) \otimes h(t)$ 。当系统中的用户数为  $N_k$  时,接收端信号可表示为:

$$r_{\text{TH/DS}}(t) = \sum_{k=1}^{N_k} y_{\text{TH/DS}}^{(k)}(t) + n(t) \quad (4)$$

其中  $n(t)$  为接收端的加性高斯白噪声,其功率谱密度为  $N_0/2$ 。在多用户检测时(当用户数较多时),根据中心极限定理,其他用户对要检测用户形成的干扰可视作高斯白噪声过程<sup>[1]</sup>。因此,式(4)可以化简为:

$$r_{\text{TH/DS}}(t) = y_{\text{TH/DS}}^{(k)}(t) + \sum_{k=1}^{N_k} y_{\text{TH/DS}}^{(k)}(t) + n(t) \approx y_{\text{TH/DS}}^{(k)}(t) + n_{\text{tot}}(t) \quad (5)$$

其中  $n_{\text{tot}}(t)$  为多用户干扰和高斯噪声总和。

## 2 盲均衡技术

UWB 系统中多用户存在时,这些用户的信息将会混叠起来,要从中解调出各用户的有用信息非常困难。鉴于 RAKE 接收机技术的不足之处,倘若在 UWB 系统采用合理的均衡器技术,不仅可以提高接收机的性能,而且可以有效地补偿符号间串扰,对抗窄带干扰。在常规线性均衡器中,需要发送已知的训练序列给接收机,以便初始调整均衡器系数。但在 UWB 系统中,特别是多点通信时,希望接收机无训练序列时就能实现与接收信号同步,并能调整均衡器。基于不利用训练序列进行初始调整系数的均衡技术称为盲均衡技术。另外,由于 UWB 系统高速传输以及信道的时变特性,要求运算快而且收敛速度快。根据以上情况,本文提出了一种新的盲均衡算法,即不使用训练序列的情况下采用改进递归最小二乘(Recursive Least Squares, RLS)算法递推估计均衡器系数;并具有快速收敛性,从而达到实时检测的目的。盲均衡器结构如图1所示。

均衡器系数:

$$\mathbf{W}(n) = [w_1(n), w_2(n), \dots, w_N(n)]^T$$

输入信号:

$$\mathbf{r}(n) = [r(n), r(n-1), \dots, r(n-N+1)]^T$$

输出信号:

$$y(n) = \sum_{i=1}^N w_i(n) r(n-i+1) = \mathbf{W}^T(n) \mathbf{r}(n)$$

图1中,均衡器系数的更新对整个盲均衡器的性能至关重要。其表达式为:

$$w(n+1) = w(n) + \mathbf{k}(n)e(n) = w(n) + \mathbf{k}(n)y(n)(R_2 - |y(n)|^2)$$

$$\mathbf{k}(n) = \frac{\mathbf{P}(n-1)\mathbf{r}^T(n)}{\lambda + \mathbf{r}^T(n)\mathbf{P}(n-1)\mathbf{r}(n)}$$

式中  $\mathbf{P}(n) = \lambda^{-1}[\mathbf{P}(n-1) - \mathbf{k}(n)\mathbf{r}^T(n)\mathbf{P}(n-1)]$ ,即输入信号矢量相关阵的逆矩阵,体现了先后到达的接收信号之间的相关性; $\lambda$  为遗忘因子; $R_2 = E(|\tilde{d}_n|^4)/E(|\tilde{d}_n|^2)$ 。初始时,除中心抽头外,均衡器的各系数设置为0。中心抽头按下列条件设置<sup>[8]</sup>:

$$|w_{\text{center}}|^2 > \frac{E(|\tilde{d}_n|^4)}{2[E(|\tilde{d}_n|^2)]^2} \quad (6)$$

该条件对于算法的收敛是充分但不必要的。

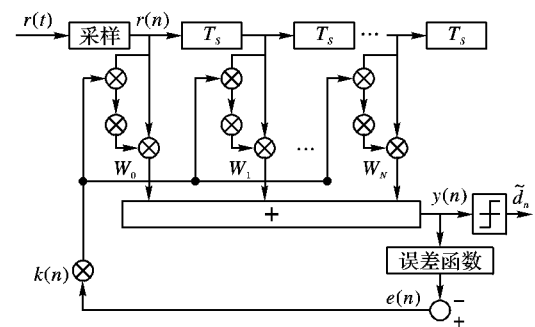


图1 盲均衡器结构

RLS 算法是常用的自适应均衡算法,具有收敛速度快、稳定性高的优点。然而,传统 RLS 算法中的遗忘因子是不随时间变化的,所以难以适应 UWB 系统信道的时变特性。因此,本文改进了传统 RLS 算法,使遗忘因子成为时变参数,从而使整个盲均衡器满足 UWB 信道时变特性。其表达式如下:

$$\lambda(n) = \left[ \lambda(n-1) - \mu \frac{\partial \sigma_e^2(n)}{\partial \lambda} \right]_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \quad (7)$$

其中:  $\sigma_e^2(n)$  为误差函数  $e(n)$  的均方误差 (Mean Square Error, MSE);  $\mu$  为步长;  $\lambda_{\max}$  和  $\lambda_{\min}$  分别表示遗忘因子的上下界。此时遗忘因子为误差函数 MSE 的梯度函数。通过 MSE 梯度函数的变化来控制遗忘因子,从而使整个 RLS 算法在时变信道中始终接近最小 MSE,进而更准确地调整均衡器系数和获得有用信号的估计量。相对于传统 RLS 算法而言,该改进 RLS 算法 (VFF-RLS) 仅对遗忘因子作了一点调整。因而,在基本不增加计算复杂度的前提下,仍保持了 RLS 算法收敛速度快、稳定性高等优点。

## 3 仿真结果

图2所示为输入信噪比  $\text{SNR} = 10$  dB 时, LMS、RLS 和改进 RLS 算法的 MSE 学习曲线。从图2明显看到,改进 RLS 算法的收敛速度比 LMS、RLS 算法快,而且稳定误差也是最小的。说明改进算法性能得以提高。图3为不同 SNR 条件下,三种算法的稳定 MSE。由图3中可以看出,改进 RLS 算法在不同 SNR 条件下均可获得较小 MSE。图2、3 都是在 DS-UWB 系统中进行仿真,TH-UWB 系统条件下仿真结果与之相似,故此省略。

对于系统误码率计算,本文采用统计平均的方法,即在某个信噪比条件下,随机产生 35 个独立的信道实现。针对每一个信道条件,计算出误码率 (Bit Error Rate, BER)。取这 35 个误码率的平均值作为该信噪比条件下的最终误码率,即图4中所示的误码率。图4为不同 SNR 条件下,DS-UWB 和 TH-UWB 的误码率。可以看出 RLS 性能略好于 LMS 性能,而改进 RLS 算法性能明显好于前两者。另外,采用新方法的 TH-UWB 盲均衡器的性能明显优于和 DS-UWB 的性能。这是

由于 TH-UWB 采用伪随机跳时码具有较小码间干扰的缘故。

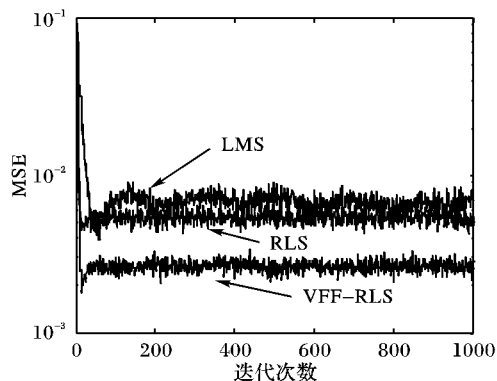


图 2 自适应算法的学习曲线

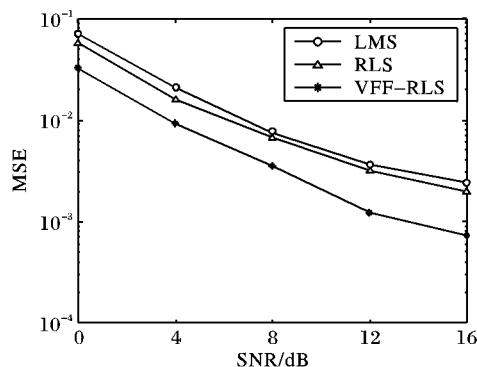


图 3 不同信噪比下盲均衡器的 MSE 性能

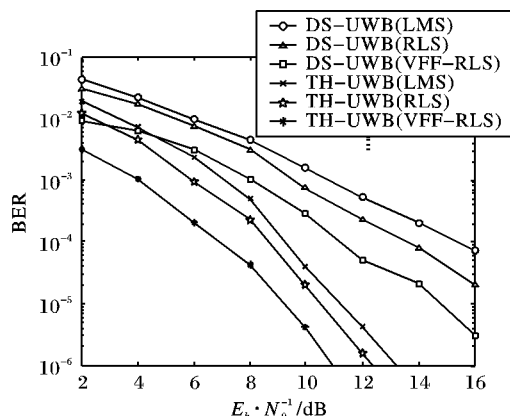


图 4 DS-UWB 和 TH-UWB 盲均衡器的 BER 性能

#### 4 结语

本文在常用 TH-UWB 和 DS-UWB 系统模型的基础上,采

用自适应盲均衡技术补偿信道特性引起信号畸变从而解调出有用的用户信息。该均衡算法在不需要训练序列的情况下,就可以快速修正均衡器系数。不仅降低了运算开销而且改善了接收误码率。此外,还修正了传统 RLS 算法中的遗忘因子,使之成为随时间变化的量从而满足了 UWB 信道的时变特性。在不过多增加计算复杂度的条件下,保持了 RLS 算法的收敛速度快,稳定性高等特点。

#### 参考文献:

- [1] WIN M Z, SCHOLTZ R A. Ultra - wide bandwidth time - hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications [ J ]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(4): 679 - 691.
- [2] MIELEZAREK B, WESSMAN M O, SVENSSON A. Performance of coherent UWB rake receivers with channel estimators [ C ]// VTC 2003-Fall: 2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference. Washington, DC: IEEE Press, 2003, 3: 1880 - 1884.
- [3] de RIVAZ S, DENIS B, KEIGNART J, *et al.* Performances analysis of a UWB receiver using complex processing [ C ]// 2003 IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies. Washington, DC: IEEE Press, 2003: 229 - 233.
- [4] ISHIYAMA Y, UHTSUKI T. Performance comparison of UWB-IR using rake receivers in UWB channel models ultra wideband systems [ C ]// Joint UWBST and IWUWBS: 2004 International Workshop on Ultra Wideband Systems, Joint with Conference on Ultrawideband Systems and Technologies. Washington, DC: IEEE Press, 2004: 226 - 230.
- [5] KIM B S, BAE J, SONG I, *et al.* A comparative analysis of optimum and suboptimum Rake receivers in impulsive UWB environment [ J ]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(6): 1797 - 1804.
- [6] WANG DE-QIANG, LIU DAN-PU, YUE GUANG-XIN. Performance comparison of two kinds of UWB rake receiver [ C ]// Proceedings of the IEEE 6th CAS Symposium on Emerging Technologies: Frontiers of Mobile and Wireless Communication. Washington, DC: IEEE Press, 2004, 1: 329 - 332.
- [7] FOERSTER J, LI Q. UWB channel modeling contribution from Intel, IEEE 802. 15 Wireless Personal Area Networks Std. IEEE P802. 15-02/279-SG3a [ R/OL ]. [ 2008 - 09 - 12 ]. [http://www.ieee802.org/15/pub/2002/Jul02/02279r0P802-15\\_SG3a-Channel-Model-Cont-Intel.doc](http://www.ieee802.org/15/pub/2002/Jul02/02279r0P802-15_SG3a-Channel-Model-Cont-Intel.doc).
- [8] GODARD D N. Self-recovering equation and carrier tracking in two-dimensional data communication systems [ J ]. IEEE Transactions on Communications, 1980, 28(11): 1867 - 2875.

(上接第 1237 页)

- [22] ALICHERY M, BHATIA R, LI L. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks [ C ]// Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking. New York: ACM, 2005: 58 - 72.
- [23] GONG M X, MIDKIFF S F, MAO SHIWEN. A cross-layer approach to channel assignment in wireless Ad Hoc networks [ J ]. Mobile Networks and Applications, 2007, 12 (1): 43 - 56.
- [24] KO B J, RUBENSTEIN D. Distributed self-stabilizing placement of replicated resources in emerging networks [ J ]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(3): 476 - 487.
- [25] PADHYE J, AGARWAL S, PADMANABHAN V N, *et al.* Estimation of link interference in static multi-hop wireless networks [ EB/OL ]. [ 2008 - 06 - 18 ]. <http://www.imconf.net/imc-2005/papers/imc05files/padhye/padhye.pdf>.
- [26] DAS S, KOUTSONIKOLAS D, HU Y, *et al.* Characterizing multi-way interference in wireless mesh networks [ EB/OL ]. [ 2008 - 06 - 18 ]. <http://web.ics.purdue.edu/~dkoutson/publications/wintech.pdf>.
- [27] NICULESCU D. Interference map for 802. 11 networks [ EB/OL ]. [ 2008 - 06 - 18 ]. <http://www.imconf.net/imc-2007/papers/imc30.pdf>.
- [28] GROSSGLAUSER M, TSE D. Mobility increases the capacity of Ad Hoc wireless networks [ J ]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10 (4): 477 - 486.
- [29] DIGGAVI S N, GROSSGLAUSER M, TSE D N C. Even one-dimensional mobility increases Ad Hoc wireless capacity [ EB/OL ]. [ 2008 - 06 - 18 ]. [http://icapeople.epfl.ch/grossglauer/Papers/isit02\\_gc.ps](http://icapeople.epfl.ch/grossglauer/Papers/isit02_gc.ps).