

# 基于最小二乘的 UWB 信道盲估计算法

张先玉,刘郁林,朱行涛

ZHANG Xian-yu, LIU Yu-lin, ZHU Xing-tao

重庆通信学院 DSP 实验室,重庆 400035

DSP Lab, Chongqing Communication College, Chongqing 400035, China

E-mail: zhangxianyu\_1986@163.com

ZHANG Xian-yu, LIU Yu-lin, ZHU Xing-tao. Blind channel estimation for UWB system based on LS algorithm. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(2): 132-134.

**Abstract:** A novel Least Square (LS)-based blind channel estimation algorithm is proposed for the Ultra Wide-Band (UWB) communications by exploiting the first-order statistics of the received signals. Firstly, the cyclic convolution property of the received signals' statistics is exploited to formulate the question of channel estimation, as the model is established in one symbol's interval, the complexity of the algorithm is relative low. Then the Least Square (LS) algorithm is used to estimate the parameters of the taps. Simulation results demonstrate that the Minimum Squared Error (MSE) and Bit-Error Ratio (BER) performances of the proposed algorithm are almost the same as that of the Data-Aided ML (DA-ML) and Data-Aided LS (DA-LS) algorithms, but its complexity is decreased and the transmission efficiency is improved at the same time.

**Key words:** Ultra Wide-Band (UWB); Least Square algorithm; blind channel estimation; first-order statistics

**摘要:** 针对超宽带系统的离散信道模型,利用接收信号的一阶统计量,提出一种基于最小二乘 (LS) 的盲信道估计算法。利用接收信号的循环卷积特性,在一个符号间隔内建立模型,最后利用 LS 算法求解。仿真表明,该算法与基于导频序列的 ML 估计方法和 LS 估计方法相比,均方误差 (MSE) 性能相差不大,但计算复杂度明显降低,同时提高了系统传输效率。

**关键词:** 超宽带; 最小二乘算法; 信道盲估计; 一阶统计量

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.02.040 文章编号: 1002-8331(2010)02-0132-03 文献标识码: A 中图分类号: TN911.7

## 1 引言

作为一种室内短距高速无线通信,超宽带 (UWB) 由于具有高空间频谱效率、低截获概率、高抗多径衰落能力、低功耗、低成本并能与现有窄带通信系统共存等诸多优点,受到越来越广泛的关注<sup>[1]</sup>。UWB 信道有很强的频率选择性,所以接收信号的多径分量十分丰富。文献[2]中利用 RAKE 接收机是一种好的解决多径干扰的方式,却带来了另一个关键问题——信道参数估计。

针对 UWB 信道参数估计,研究人员提出了很多算法,很多是将传统的信道估计方法用到某种具体的超宽带系统中进行研究,如文献[3]中给出的基于 ML 准则的信道估计算法,但 ML 信道估计算法的计算量很大;文献[4]提出了一种基于导频序列辅助的信道估计思想,其估计达到了较好的性能,但导频序列的加入减少了系统的容量;文献[5]提出一种基于一阶统计量的 UWB 信道盲估计算法,但算法根据信号循环卷积特性利用 FFT 进行计算,导致了噪声在频域零点处得到增强。

基于以上分析,针对 TH-PPM-UWB 系统提出一种基于最

小二乘 (LS) 的盲信道估计算法 (B-LS)。算法以码片周期进行采样,利用发送和接收信号的一阶统计量建立模型,采用最小二乘准则 (LS) 进行求解。B-LS 算法是在一个符号宽度内计算,比基于训练序列的 LS 算法<sup>[6]</sup> (DA-LS) 计算量明显降低,并且 B-LS 算法是基于接收信号的一阶统计量进行计算,因此是一种盲估计算法。仿真表明, B-LS 算法与基于导频序列的 DA-ML 算法和 DA-LS 算法的均方误差 (MSE) 性能相差不大,而且在 MSE 相差较大时估计性能已达到很好的程度,从三种算法的误比特率 (BER) 性能可以看出其影响很小。最后,计算表明基于导频序列的 DA-ML 和 DA-LS 算法计算复杂度远远大于文章的 B-LS 算法。

## 2 系统模型

在 TH-PPM-UWB 系统中,考虑单用户的情况,设为单周期脉冲,则用来表示二进制 PPM 调制的跳时周期脉冲为:

$$p(t) = \sum_{j=0}^{N_p-1} w(t-jT_j - c_j T_c) \quad (1)$$

**基金项目:** 国家自然科学基金 (the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60672157, No.60672158)。

**作者简介:** 张先玉 (1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为超宽带信道估计与均衡; 刘郁林 (1971-), 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 英国帝国理工学院访问学者, IEEE 会员, 中国电子学会高级会员, 主要研究领域为盲信号处理、超宽带通信、认知无线电、无线传感器网络及 DSP 技术等; 朱行涛 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为盲均衡和自适应信号处理。

**收稿日期:** 2008-07-29 **修回日期:** 2008-12-10

式(1)中,  $T_f$  表示帧周期,  $T_c$  表示码片周期,  $N_f$  是一个信息符号中所包含的帧数,  $(c_0, c_1, \dots, c_{N_f-1})$  表示跳时码序列, 设跳时码是以  $N_f$  为周期变化的。则 UWB 发射的信号可表示为:

$$x(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} p(t-iT_c - b_i \Delta) \quad (2)$$

其中,  $T_s$  表示符号周期, 且  $T_s = N_f T_f$ ,  $b_i$  为二进制信息符号 0 或 1, 且 0 和 1 先验等概分布,  $\Delta$  为信息符号调制引起的时间偏移, 其取值通常略大于周期脉冲  $g(t)$  的宽度  $D_g$ , 远小于帧周期  $T_f$ 。

超宽带系统的信道冲激响应可写为<sup>[3]</sup>:

$$h(t) = \sum_{i=0}^{L-1} \alpha_i \delta(t - \tau_i) \quad (3)$$

其中,  $\alpha_i, \tau_i$  分别表示第  $i$  条多径的增益系数和时延,  $L$  表示多径的数目。假设收发信号同步, 则在接收端的输出信号波形可表示为:

$$r(t) = x(t) * h(t) + v(t) = \sum_{i=0}^{L-1} \alpha_i x(t - \tau_i) + v(t) \quad (4)$$

式(4)中,  $v(t)$  是加性高斯白噪声,  $*$  表示卷积。

### 3 UWB 信道估计

假设系统以码片周期  $T_c$  采样, 则式(4)经抽样离散化后为:

$$r(n) = \sum_{k=0}^{M-1} h(k) \cdot x(n-k) + v(n) \quad (5)$$

其中  $M$  为信道长度,  $h(k)$ , ( $k=0, 1, 2, \dots, M-1$ ) 为离散信道各抽头的值,  $x$  为离散后的发送信号。此时信道估计转化为估计序列  $[h(0), h(1), h(2), \dots, h(M-1)]$  的值。

#### 3.1 基于导频序列的 DA-ML 估计

基于导频序列的信道估计常用方法是将数据分组, 每一组由  $K$  个引导符号和  $L$  个信息符号组成, 在引导符号处进行信道估计, 估计结果用于后续的信息数据<sup>[4]</sup>。发送的导频序列为:

$$s(t) = \sum_{i=0}^{K-1} p(t-iT_c - b_i \Delta) \quad (6)$$

假设信道长度  $M$  小于符号间隔, 发送信号经信道  $h$  传输后, 接收信号为:

$$y(n) = h(i) \cdot s(n-i) + v(n), \quad n=0, 1, 2, \dots, KN-1, i=0, 1, \dots, M-1 \quad (7)$$

其中  $N=T_s/T_c$  为单位符号内抽样脉冲数,  $v$  为噪声序列。

所以经简化的 ML 估计<sup>[5]</sup>为:

$$h(i) = \frac{\sum_{m=i}^{KN-1} y(m) \cdot s(m-i)}{\sum_{m=0}^{KN-1} s^2(m)} \quad (8)$$

由统计学知识可知, 随着  $K$  的增长, 式(9)中的估计值将不断趋近于原始信道值。为保证估计有足够的精度要求导频长度  $K$  足够长, 但同时系统的传输效率  $L/(K+L)$  却随之降低, 只能牺牲估计精度或传输效率来换取另一方面的性能, 这是 ML 估计的缺陷。

#### 3.2 基于 LS 的盲估计算法

盲信道估计算法的目标为: 给定接收序列  $y(n)$ , 仅知道发送端信号调制模式和调制参数的情况下, 估计出信道  $[h(0), h(1), h(2), \dots, h(M-2)]$ 。

基于训练序列的 DA-LS 估计<sup>[6]</sup>是针对接收到的  $K$  个符号建立模型, 通过 LS 算法求出最优解。随着  $K$  的增长, 算法的估

计性能逐渐提高, 但同时计算次数却以指数增长, 以至于系统无法承担, 因此如何降低算法复杂度成为问题解决的关键。

利用接收序列的一阶统计特性可以实现信道的盲估计, 并且可以降低算法的复杂度。根据文献[5], 接收信号的一阶统计量为:

$$\bar{r}(t) = E[r(t)] = E[x(t) * h(t) + v(t)] = E[x(t)] * h(t) \quad (9)$$

由式(9)不难发现,  $\bar{r}(t)$  是以  $T_s$  为周期的, 并且由于采用 TH-PPM 调制方式, 取值不会为零。由二进制符号先验等概率分布的假设, 可将式(9)表述为:

$$\bar{r}(t) = \frac{1}{2} [\bar{x}_0(t) + \bar{x}_1(t)] * h(t) = \frac{1}{2} [\bar{x}_0(t) + \bar{x}_0(t-\Delta)] * h(t) \quad (10)$$

其中  $x_0(t)$  和  $x_1(t)$  分别表示发送信号为 0 和 1 时调制信号, 因此可以定义一个平均发送信号:

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{2} [x_0(t) + x_0(t-\Delta)] * \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(t-iT_s) \quad (11)$$

假设调制延迟  $\Delta = t_c$ , 则式(10)可离散化为:

$$\bar{r}(n) = \bar{x}(n) \otimes \bar{h}(n) \quad (12)$$

其中  $\bar{r}(n)$  表示抽样后的平均接收序列,  $\bar{x}(n)$  为  $\bar{x}(t)$  抽样后的序列,  $\bar{h}(n)$  为  $h(n)$  以  $N$  为周期延拓的序列,  $\otimes$  表示循环卷积。

将式(12)写成矩阵形式, 即为:

$$\mathbf{R} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{H} \quad (13)$$

其中:  $\mathbf{R} = [\bar{r}(0), \bar{r}(1), \bar{r}(2), \dots, \bar{r}(N-1)]^T$

$$\mathbf{H} = [h(0), h(1), h(2), \dots, h(M-1)]^T$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \bar{x}(0) & \bar{x}(N-1) & \dots & \bar{x}(N-M+1) \\ \bar{x}(1) & \bar{x}(0) & \dots & \bar{x}(N-M+2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}(N-1) & \bar{x}(N-2) & \dots & \bar{x}(N-M) \end{bmatrix}$$

在式(13)中, 向量  $\mathbf{R}$  可由统计  $K$  个接收符号获得, 矩阵  $\mathbf{X}$  可由发送信号的先验知识得到。  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{X}$  也可以由训练序列得到<sup>[6]</sup>, 即为 DA-LS 算法, 利用训练序列估计出的信道要准确一些, 但需要较长的训练序列, 而基于接收信号一阶统计量的算法是一种全盲估计, 因此应用更为广泛。

在式(13)的基础上, 构造如下的代价函数<sup>[7]</sup>:

$$J(\hat{\mathbf{H}}) = \|\mathbf{R} - \mathbf{X} \cdot \hat{\mathbf{H}}\|_2^2 = [\mathbf{R} - \mathbf{X} \cdot \hat{\mathbf{H}}]^T [\mathbf{R} - \mathbf{X} \cdot \hat{\mathbf{H}}] \quad (14)$$

最小二乘(LS)估计算法就是寻找一个矢量  $\hat{\mathbf{H}}_{LS} \in \mathbf{R}^M$  使代价函数  $J(\hat{\mathbf{H}})$  达到最小, 即:

$$\mathbf{H}_{LS} = \arg \min_{\hat{\mathbf{H}}} \|\mathbf{R} - \mathbf{X} \cdot \hat{\mathbf{H}}\|_2^2 \quad (15)$$

依据不同的信道长度, 解的情况归结为以下三类<sup>[8]</sup>:

(1)  $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^{N \times N}$ , 矩阵  $\mathbf{X}$  正定, 即  $N=M$ , 有惟一解:

$$\mathbf{H}_{LS} = \mathbf{X}^{-1} \mathbf{R} \quad (16)$$

且此时代价函数  $J(\mathbf{H}_{LS})=0$ 。

(2)  $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^{N \times M}$ , 矩阵  $\mathbf{X}$  超定, 即  $N>M$ , 精确解通常不存在, 但是其最小二乘误差解可惟一表示为:

$$\mathbf{H}_{LS} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{R} \quad (17)$$

且  $J(\mathbf{H}_{LS}) = \frac{1}{2} \mathbf{R}^T (\mathbf{I} - \mathbf{X} \mathbf{X}^+) \mathbf{R} \geq 0$ , 其中  $\mathbf{X}^+$  为 Moore-Penrose 广义伪逆。

(3)  $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^{N \times M}$ , 矩阵  $\mathbf{X}$  欠定, 即  $N<M$ , 解通常不是惟一的, 但其最小 2-范数  $\|\mathbf{H}\|_2^2$  的惟一解可表示为:

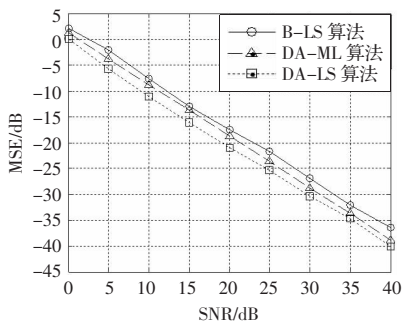


图1 均方误差与信噪比的关系

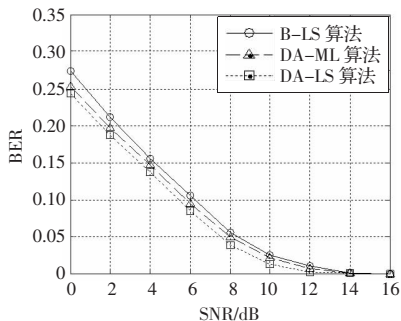


图2 误比特率与信噪比的关系

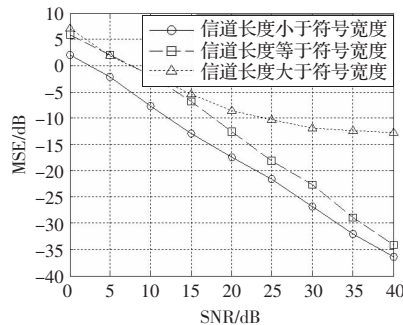


图3 不同信道长度下估计信道的 MSE

$$H_{LS} = X^T (XX^T)^{-1} R \quad (18)$$

且  $J(H_{LS})=0$ 。

(1)和(2)在一定的规则下可以得到惟一的最优解,而(3)则没有固定的解,这对估计结果可能会造成较大的误差。所以在实际应用中,B-LS 算法一般只应用于前两种情况,即信道长度不大于符号宽度的情况。

B-LS 算法利用接收序列的一阶统计特性进行估计,不需要任何训练序列,所以系统传输效率会大大提高。并且算法是建立在一个符号宽度内,计算的复杂度很低,便于实时跟踪信道的变化。

### 4 实验仿真

为检验算法的性能,进行了仿真。系统的参数设置如下:  $T_f=11$  ns,  $N_f=12$ ,  $T_c=1$  ns,  $T_s=N_f T_f=132$  ns,  $\Delta=1$  ns,  $f_c=1 \times 10^9$  Hz。并假设  $T_g < T_c$ 。仿真中采用 IEEE802.15.3a 工作组推荐的 UWB 信道模型(CM1)。

图1是文章提出的 B-LS 盲估计算法、基于导频序列的 DA-ML 算法和 DA-LS 算法的均方误差(MSE)与信噪比的关系曲线,DA-ML 的导频序列长度为 200,DA-LS 的导频序列长度为 100,LS 盲估计的所需数据长度为 100,信道长度设置为 64。图2是将估计的信道用于解调所得误比特率(BER)与 SNR 的关系曲线。由图1可见,B-LS 算法与其他两种算法的 MSE 性能差距不大,并且这一差距在 SNR 较大时才比较明显,而此时估计信道性能已经较好,另外由图2可见,在 SNR 达到 14~16 dB 时 BER 已趋近于零,所以这种差距对整个系统的性能影响很小。

表1是在相同的信噪比(20 dB)下,估计信道的 MSE 达到相同的程度时,各算法参数的比较。由表中数据知,B-LS 算法以较少的数据量即可完成信道估计,并且计算量远远小于其他两种算法(表中的数据为矩阵相乘和元素相加所需计算次数,若加上求逆计算,差距将更大,并且 ML 算法是经过简化的,实际的计算复杂度远远大于此)。与 DA-ML 和 DA-LS 估计算法相比,B-LS 算法为盲估计,而其他两种算法则需要较长的导频序列,所以系统有更高的数据速率,传输效率更高。

表1 三种算法性能比较

	MSE/dB	所需符号数	计算次数
B-LS	-18.479 9	50	81 908
DA-ML	-18.720 0	200	$1.35 \times 10^7$
DA-LS	-18.995 0	100	$3.49 \times 10^6$

图3和图4是对2.2节中三种不同的信道长度下算法性能的仿真,仿真的信道长度依次为64、132和140。从图3中可见信道长度不超过符号长度时,估计能达到很好的性能,当信

道长度大于符号长度时,算法的估计性能明显变差。从理论上说,信道长度越长,码间干扰就越大,一旦信道长度超过符号宽度,码间干扰将扩展到两个以上的符号,而算法是在一个符号间隔内建模求解,所以此时估计性能必将急剧降低。对于这种情况,可以先利用信道缩短均衡等措施,将信道缩短到一个符号间隔内,此时就可以利用算法予以解决。

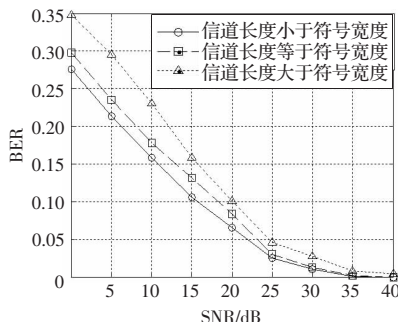


图4 不同信道长度下的误码率性能

### 5 结论

针对基于码片抽样的 UWB 离散信道,利用接收信号的一阶统计量,采用最小二乘(LS)算法估计信道,算法既不需要导频信号也不需要训练序列,是一种全盲的估计算法,因此算法的应用范围更广。仿真表明,算法与基于导频序列的 DA-ML 和 DA-LS 算法性能相差并不大,但 B-LS 算法是在一个符号间隔内运算,计算量非常少,具有实时处理的优势,可以跟踪信道的变化。另外,仿真表明文章算法在信道长度大于符号间隔时性能不是很好,这时可先采用信道缩短等措施,将信道缩短到一个符号间隔内再利用算法进行估计。

### 参考文献:

- [1] Porcino D, Hirt W. Ultra-wideband radio technology: Potential and challenges ahead[J]. IEEE Communications, 2003, 26(1).
- [2] Rajeswaran A, Somayazulu V S, Foerster J R. Rake performance for a pulse based UWB system in a realistic UWB indoor channel[C]// Proc IEEE Conf on ICC 2003, May 2003: 2879-2883.
- [3] Win M Z, Scholtz R A. Characterization of ultra-wide bandwidth wireless indoor channels: A communication-theoretic view[J]. IEEE J Select Areas Commun, 2002, 20(9): 1613-1627.
- [4] Lottici V, Andrea A D, Mengali U. Channel estimation for ultrawideband communications[J]. IEEE J Select Areal Commun, 2002, 20(9): 1638-1645.