

## 基于均值循环卷积特性的 UWB 信道盲估计算法

朱行涛 刘郁林 赵翔  
(重庆通信学院 DSP 实验室 重庆 400035)

**摘要:** 该文针对采用码片率抽头间隔的 TH-PPM 超宽带系统离散信道, 利用接收信号的均值循环卷积特性, 对 UWB 信道估计问题进行建模, 结合 UWB 信道的稀疏簇结构, 提出一种基于抽头探测的 UWB 信道盲估计算法, 避免了无谓的零抽头估计, 改善了算法性能。仿真表明: 在低信噪比(0-15dB)的情况下, 基于抽头探测算法的 MSE 比没利用信道结构特征的最小二乘算法平均低约 5.5dB; 在中等信噪比(>15dB)的情况下, 基于抽头探测算法的 MSE 比最小二乘算法平均低约 3.5dB, 同时基于抽头探测算法还能获得较好的 SER(Signal-Error-Ratio)性能。

**关键词:** UWB; 盲信道估计; TH-PPM; 稀疏信道; 抽头探测

中图分类号: TN911.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)10-2381-03

## Blind Channel Estimation for UWB Systems Based on the Cyclic Convolution Property of the Receive Signal's Expectation

Zhu Xing-tao Liu Yu-lin Zhao Xiang  
(DSP Lab, Chongqing Communication College, Chongqing 400035, China)

**Abstract:** In this paper, a novel blind channel estimation algorithm based on tap detecting is proposed for the chip-rate discrete channel of the TH-PPM Ultra Wide-Band(UWB) communications. In this algorithm, the cyclic convolution property of the receive signal's expectation is used to model the question of channel estimation, and the sparse and cluster structure of UWB channel is used to avoid non-important zero taps' estimation which promoted the performance of the algorithm. Simulation results demonstrated that the mean square error of the UWB-TDLS is 5.5dB's lower than UWB-LS in the situation of low signal to noise ratio(0-15dB), while it is 3.5dB lower in the situation of high signal to noise ratio(>15dB), moreover the UWB-TDLS also has better signal-error-ratio performance than UWB-LS.

**Key words:** Ultra Wide-Band(UWB); Blind channel estimate; Time-Hopping Pulse-Position-Modulation (TH-PPM); Sparse channel; Tap detecting

### 1 引言

超宽带(UWB)具有高空间频谱效率、高测距精度、低截获概率、高抗多径衰落能力、低功耗、低成本、小体积并能与现有窄带通信系统共存等诸多优点和潜力, 具有广泛的应用前景和重要的理论研究价值, 引起了人们的广泛关注。由于码间干扰、多用户干扰和窄带干扰等因素的影响, 设计 UWB 收发信机系统可能采用的 RAKE 技术、多用户检测技术和自适应调制技术等共同存在一个需要解决的关键问题——信道参数估计, 近年来成为 UWB 系统中研究的一个热点。

针对 UWB 系统, 研究人员对其信道估计问题进行了大量研究, 提出了许多估计方法, 但有很多是将传统的信道估计算法借鉴到某种具体的超宽带系统中进行研究, 如文献[1, 2]中给出的基于 ML 准则的信道估计算法。由于 ML 信道估

计器的计算量非常大, 对于一个实际的 UWB 信道是难以担负的。文献[3]中给出一种联合定时同步和信道估计算法, 由于要进行过采样操作, 增加了数据处理量。信道估计发展的趋势是尽量避免使用训练序列和高的采样率, 以提高频带利用率, 降低算法复杂度。正是在这种形势下, 文献[4]提出一种基于一阶统计量的 UWB 信道盲估计算法, 但由于没有利用 UWB 信道的稀疏性, 导致了許多无谓的零值抽头估计, 造成算法性能的损失。本文针对 TH-PPM 超宽带系统, 利用接收信号的均值循环卷积特性, 对信道估计问题进行建模, 首先利用常见的最小二乘法对 UWB 信道进行估计简记为 UWB-LS 算法, 该算法的性能和文献[4]的相当。利用 UWB 信道的稀疏簇结构, 本文又提出一种基于抽头探测的信道盲估计算法简记为 UWB-TDLS 算法, 该算法以码片率进行采样, 且仅需要作一些简单的信号处理, 计算复杂度不是很高。此外, 通过利用信道的稀疏性, 避免了无谓的零值抽头估计, 改善了算法性能, 仿真结果验证了该结论。

### 2 问题建模

在采用 TH-PPM 调制的 UWB 系统中, 考虑单用户的

2007-05-17 收到, 2008-04-21 改回

国家自然科学基金(60672157, 60672158)和重庆市自然科学基金(CSTC2005BB4219)资助课题

情况, 设  $g(t)$  表示单周期脉冲, 则用来进行二进制 TH-PPM 调制的周期脉冲表示为<sup>[5]</sup>

$$p(t) = \sum_{i=0}^{N_f-1} g(t - iT_f - c_i T_c) \quad (1)$$

其中  $T_f$  为帧周期,  $T_c$  为码片周期,  $N_f$  为一个信息符号所包含的帧数, 序列  $(c_0, c_1, \dots, c_{N_f-1})$  为用户的跳时码, 它的元素是范围为  $0 \leq c_i \leq N_h - 1$  的整数。假设跳时码的变化是以符号为周期的, 则超宽带系统中期望用户的传输信号可表示为

$$s(t) = \sum_j p(t - jT_s - b_j \Delta) \quad (2)$$

其中  $T_s$  表示符号周期, 且  $T_s = N_f T_f$ ,  $b_j$  为二进制信息符号, 且等概分布,  $\Delta$  为信息符号调制引起的的时间偏移, 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  $T_f$ 。

假设收发信号完全同步, 则在接收天线的输出端的合成信号波形可表示为<sup>[1]</sup>

$$r(t) = \sum_{i=1}^L \alpha_i s(t - \tau_i) + n(t) \quad (3)$$

式中  $\alpha_i$ ,  $\tau_i$  分别表示第  $i$  条多径的衰减系数和时延,  $L$  表示多径的数目,  $n(t)$  为加性噪声和多用户干扰的和, 并假设其为零均值的白噪声。把式(2)代入式(3), 接收信号  $r(t)$  可重新表示如下:

$$\begin{aligned} r(t) &= \sum_{i=1}^L \alpha_i s(t - \tau_i) + n(t) \\ &= (p(t) * h(t)) \cdot \sum_j \delta(t - jT_s - b_j \Delta) + n(t) \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $h(t)$  为信道冲激响应函数,  $\delta(\cdot)$  为狄拉克函数,  $*$  表示卷积运算。

假设信道在  $K$  个信息符号内为时不变的因果有限冲激响应, 信道的最大时延  $\tau_{\max} < T_s$ , 则  $r(t)$  的均值表达式为<sup>[6]</sup>

$$\begin{aligned} \bar{r}(t) &= E r(t) = (p(t) * h(t)) \\ &\cdot \sum_j (\delta(t - jT_s) + \delta(t - jT_s - \Delta)) / 2 \end{aligned} \quad (5)$$

从式(5)可知,  $\bar{r}(t)$  是以  $T_s$  为周期的。令  $p_a(t) = (p(t) + p(t - \Delta)) / 2$ , 则由式(5)得

$$\begin{aligned} \bar{r}(t) &= h(t) * \sum_j (p(t - jT_s) + p(t - jT_s - \Delta)) / 2 \\ &= p_a(t) * \sum_j h(t - jT_s) \end{aligned} \quad (6)$$

由于  $\bar{r}(t)$  和  $\sum_j h(t - jT_s)$  都是以  $T_s$  为周期的信号, 将  $p_a(t)$  周期延拓后得

$$\bar{p}_a(t) = \sum_j p_a(t - iT_s) \quad (7)$$

显然, 在  $0 \leq t \leq T_s$  内,  $\bar{p}_a(t) = p_a(t)$ 。令  $\bar{h}(t) = \sum_j h(t - jT_s)$ , 故  $\bar{r}(t)$  可以写成如下的循环卷积形式:

$$\bar{r}(t) = \bar{p}_a(t) * \bar{h}(t) \quad (8)$$

假设 UWB 信道采用的是码片率抽头延迟线结构, 抽头间隔为  $T_c$ , 信道长度为  $M$ , 故其可表示为  $\mathbf{H} = [\alpha_0, \alpha_1,$

$\dots, \alpha_{M-1}]^T$ 。接着对  $\bar{r}(t)$  和  $p_a(t)$  分别以码片率  $T_c$  进行采样, 则在  $0 \leq t \leq T_s$  内得到的采样点  $N = T_s / T_c$ 。因此, 根据时域循环卷积的定义, 由式(8)可得到如下的矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \bar{r}(1) \\ \bar{r}(2) \\ \vdots \\ \bar{r}(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_a(1) & P_a(N) & \dots & P_a(N - M + 2) \\ p_a(2) & p_a(1) & \dots & P_a(N - M + 3) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ p_a(N) & p_a(N - 1) & \dots & p_a(N - M + 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_{M-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

令  $\mathbf{R} = [\bar{r}(1), \bar{r}(2), \dots, \bar{r}(N)]^T$ ,  $\mathbf{a}_1 = [p_a(1), p_a(2), \dots, p_a(N)]^T$ ,  $\mathbf{a}_2 = [p_a(N), p_a(1), \dots, p_a(N - 1)]^T$ ,  $\dots$ ,  $\mathbf{a}_M = [p_a(N - M + 2), p_a(N - M + 3), \dots, p_a(N - M + 1)]^T$ ,  $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_M]$ , 故式(9)可简化为如下的形式:

$$\mathbf{R} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{H} \quad (10)$$

### 3 UWB 信道盲估计

#### 3.1 最小二乘法

在式(10)中, 向量  $\mathbf{R} = [\bar{r}(1), \bar{r}(2), \dots, \bar{r}(N)]^T$  和矩阵  $\mathbf{A}$  是可以分别由  $0 \leq t \leq KT_s$  的接收信号  $r(t)$  和已知频谱成形脉冲  $p(t)$  得到, 需要估计的是信道的抽头向量  $\mathbf{H} = [\alpha_0, \alpha_2, \dots, \alpha_{M-1}]^T$ , 可采用最小二乘法对信道抽头向量  $\mathbf{H}$  进行估计:

$$\hat{\mathbf{H}} = \arg \min_{\mathbf{H}} \|\mathbf{R} - \mathbf{A}\mathbf{H}\|^2 \quad (11)$$

该算法是一种非基于结构的信道估计, 但由于没有利用 UWB 信道的稀疏簇结构, 导致了許多无谓的零值抽头估计, 影响了算法性能。

#### 3.2 基于抽头探测的信道估计算法

表征 UWB 多径信道的一个简单模型就是使用抽头延迟线结构。在这个模型中, 时间轴被划分成小的时间区间  $\Delta_c$ , 每个时间区间  $\Delta_c$  称为一个时间仓(time bin), 每个时间仓或包含一个多径分量, 或不包含多径分量, 但不容许一个时间仓包含多个多径分量<sup>[7]</sup>。由于时间仓内  $\Delta_c$  可能不含有多径分量, 因此, UWB 信道含有部分的零值抽头即具有稀疏性, 为避免无谓的零值抽头估计, 可先对非零值抽头进行探测。

在式(10)中, 观测向量  $\mathbf{R}$  是由矩阵  $\mathbf{A}$  的列向量张成的子空间, 由于 UWB 信道具有稀疏性, 事实上观测向量  $\mathbf{R}$  是由矩阵  $\mathbf{A}$  中的  $L (L < M)$  个列向量张成的子空间, 这  $L$  个列向量分别对应着  $\mathbf{H} = [\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{M-1}]^T$  中的  $L$  个非零抽头。对矩阵  $\mathbf{A}$  中的  $M$  个列向量来说, 与最大信道抽头值对应的那个列向量在观测向量  $\mathbf{R}$  上的投影必然最大。因此, 利用这个性质, 可以逐个探测出非零值信道抽头, 具体步骤如下:

在迭代开始前, 令矩阵  $\mathbf{C}$  的初始值为  $\mathbf{a}_1$ , 然后在每次迭代过程中, 从参考矩阵  $\mathbf{A}$  中选择与剩余向量相关性最大的一列加入到  $\mathbf{C}$  中去, 其过程如下: 令  $\mathbf{P}_{a_l} = \mathbf{a}_l \mathbf{a}_l^H / \|\mathbf{a}_l\|^2$  表示投影向量, 第  $p$  次迭代时, 选取与  $\mathbf{R}_{p-1}$  最相匹配的参考向量列数  $k_p$  的过程如下:

$$\begin{aligned} k_p &= \arg \max_l \|\mathbf{P}_{a_l} \mathbf{R}_{p-1}\| = \arg \max_l \frac{|\mathbf{a}_l^H \mathbf{R}_{p-1}|^2}{\|\mathbf{a}_l\|^2}, \\ & l = 1, 2, \dots, N, \quad l \notin \mathbf{I}_{p-1} \end{aligned} \quad (12)$$

其中  $I_{p-1}$  为  $k_1, k_2, \dots, k_{p-1}$  组成的集合  $\{k_1, k_2, \dots, k_{p-1}\}$ 。探测出第  $k_p$  个抽头后, 把它在参考矩阵  $A$  中对应的列向量添加到  $C$  中去, 然后对剩余向量  $R_{p-1}$  进行更新:

$$R_p = P_{C_{k_p}}^\perp R_{p-1} = R_{p-1} - P_{C_{k_p}} R_{p-1} \quad (13)$$

其中  $P_{C_{k_p}} = C_{k_p} (C_{k_p}^H C_{k_p})^{-1} C_{k_p}^H$  表示  $C_{k_p}$  的投影矩阵。

探测出非零值信道抽头后, 再对非零值抽头系数进行估计。设探测出的非零值信道抽头为  $H_e = [\alpha_{k_1}, \alpha_{k_2}, \dots, \alpha_{k_p}]^T$ , 对应的列向量为  $A_e = [a_{k_1}, a_{k_2}, \dots, a_{k_p}]^T$ , 可用最小二乘法对非零值抽头系数进行估计:

$$\hat{H}_e = \arg \min_{H_e} \|R - A_e H_e\|^2 \quad (14)$$

### 4 仿真及结果

为检验算法的性能, 本文进行了仿真。系统的参数设置如下: 单周期脉冲  $w(t) = [1 - 16\pi((t - D_g/2)/D_g)^2] \cdot \exp[-8\pi((t - D_g/2)/D_g)^2]$ ,  $D_g = 0.4\text{ns}$ ,  $T_f = 1\text{ns}$ ,  $N_f = 12$ ,  $N_h = 12$ ,  $T_c = 1\text{ns}$ ,  $T_s = N_f T_f = 132\text{ns}$ ,  $\Delta = 1\text{ns}$ ,  $\beta = 0.1$ 。采用 IEEE.15.SG3a 信道模型产生码片率抽头间隔的 UWB 信道离散时间冲激响应, 具体参数设置采用 IEEE UWB 信道模型 Case B<sup>[7]</sup>。在这种情形下, 信道的延时一般为 40~50ns, 信道多径数目(10dB)约为 20 条即  $L = 20$ , 故在这里信道长度取  $M = 45$  符合一般情况, 得出离散时间冲激响应后将其能量归一化。

图 1 和图 2 分别仿真了在给定观测数据长度  $K=300$  和  $K=500$  情况下, 3 种算法的 SNR 与 MSE 的关系曲线。从图中可看出, 随着观测数据长度的增加, 3 种算法的 MSE 性能逐渐提高。当观测数据长度从 300 增加到 500 时, 算法的均方误差性能约有 2dB 的改善。从图中还可以发现: UWB-LS 算法的 MSE 性能接近文献[4]算法, 而在低信噪比(0~15dB)情况下, UWB-TDLS 算法的 MSE 比 UWB-LS 算法平均低约 5.5dB, 在中等信噪比(>15dB)情况下, UWB-TDLS 算法的 MSE 比 UWB-LS 算法平均低约 3.5dB。这主要是因为文献[4]算法和 UWB-LS 算法没有利用信道的稀疏性, 导致了許多无谓的零抽头估计, 而 UWB-TDLS 算法通过抽头探测技术, 避免了无谓的零抽头估计, 改善了算法性能。

信道估计完成后, 可利用信道估值对接收信号进行检测<sup>[4]</sup>。图 3 仿真了在固定观测数据长度( $K=500$ )下, 3 种算法的 SNR 与 SER 的关系曲线。从图中可看出, UWB-LS 算法的 SER 性能和文献[4]的算法相当, 而 UWB-TDLS 算法的 SER 性能明显优于 UWB-LS 算法和文献[4]的算法, 验证利

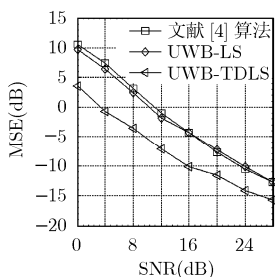


图 1 SNR 与 MSE 关系曲线图( $K=300$ )

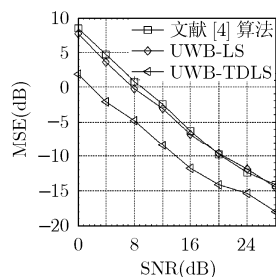


图 2 SNR 与 MSE 关系曲线图( $K=500$ )

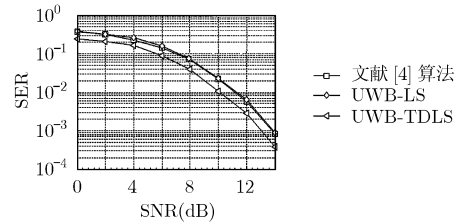


图 3 SNR 与 SER 关系曲线图( $K=500$ )

用信道的稀疏性能有效的提升算法的 SER 性能这一结论。

### 5 结论

利用接收信号的均值循环卷积特性, 文章对采用码片率间隔的 UWB 离散信道估计问题进行建模, 常见的最小二乘法由于没有利用 UWB 信道的稀疏簇结构, 导致了許多无谓的零抽头估计, 影响了算法性能。利用 UWB 信道的稀疏簇结构, 本文提出一种基于抽头探测的信道估计算法—UWB-TDLS 算法, 该算法不需要插入导频序列以辅助信道估计, 是一种全盲的估计算法。另外该算法以码片率进行采样, 且仅需要作一些简单的信号处理, 计算复杂度不是很高。仿真表明, 与没有利用信道稀疏性的 UWB-LS 算法相比, UWB-TDLS 算法具有更优的 MSE 性能和 SER 性能。

### 参考文献

- [1] Lottici V, Andrea A D, and Mengali U. Channel estimation for ultrawideband communications[J]. *IEEE J. Select. Areal Commun*, 2002, 20(9): 1638-1645.
- [2] Win M Z and 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.
- [3] Carbonelli C, Mengali U, and Mitra U. Synchronization and channel estimation for UWB signal[A]. *Global Telecommunications Conference, IEEE 2003, GLOBECOM'03[C]*. San Francisco: IEEE Communications Society, 2003: 764-768.
- [4] Wang Zhengdao and Yang Xiaofan. Blind channel estimation for UWB communications employing pulse position modulation[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, 12(7): 520-523.
- [5] Scholtz R. Multiple access with time-hopping impulse modulation[C]. *Proc. of MILCOM*, Boston, USA, 1993: 447-450.
- [6] Maravic I, Vetterli M, and Ramchandran K. High-resolution acquisition methods for wideband communication systems[C]. in *Proc. IEEE Int. Conf.*, Hong Kong, China, 2003, 4: 133-136.
- [7] Maria-Gabriella Di Benedetto and Guerino Giancola. 葛利嘉, 朱林, 袁晓芳等译. 超宽带无线电基础. 北京: 电子工业出版社, 2005: 190-204.

朱行涛: 男, 1982 年生, 讲师, 研究方向为盲均衡和自适应信号处理。

刘郁林: 男, 1971 年生, 教授, 研究方向为现代信号处理。

赵翔: 男, 1953 年生, 教授, 研究方向为信号与信息处理。