

文章编号:1000-582X(2009)07-0782-05

基于抽头探测的 MB-OFDM 超宽带信道估计

刘郁林,张先玉,罗颖光

(重庆通信学院 DSP 实验室,重庆 400035)

摘要:在 MB-OFDM 超宽带系统中,针对超宽带信道的稀疏特性,提出一种新的基于抽头探测的信道估计算法(MP-DFT)。利用 DFT(Discrete Fourier Transform)算法得到信道的原始估计值,采用匹配追踪(MP)算法探测出非零抽头的位置,最后将剩余抽头置零得到稀疏信道参数。仿真结果表明,对于 4 种标准的超宽带信道模型,MP-DFT 算法相比 DFT 算法性能都有所改善,尤其对于稀疏性较好的 CM1 和 CM2 信道,算法性能有明显提高。

关键词:多频带正交频分复用;超宽带;抽头探测;匹配追踪

中图分类号:TN911.7

文献标志码:A

Channel estimation for MB-OFDM UWB system based on tap detecting

LIU Yu-lin, ZHANG Xian-yu, LUO Ying-guang

(DSP Laboratory, Chongqing Communication College, Chongqing 400035, P. R. China)

Abstract: A novel channel estimation algorithm is proposed for MB-OFDM Ultra Wide-Band systems based on tap detecting by exploiting the sparse property of channel impulse response. The channel parameters are estimated using the DFT algorithm based on cyclic convolution property of the receive signals. The nonzero taps are detected by exploiting the matching pursuit (MP) algorithm. The new estimated channel parameters are obtained by forcing the zero taps to zeros. Simulation results demonstrate that it has better MSE (mean square error) performance for the four channels proposed by IEEE. Especially for CM1 and CM2 channels, the performance of the algorithm has been greatly improved.

Key words: MB-OFDM; ultra wide-band; tap detecting; matching pursuit

超宽带(UWB)通信是一种短距高速无线通信技术。UWB 以其低截获概率、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,成为未来无线个域网(WPAN)的热门技术^[1-2]。目前主要存在 2 种超宽带实现方式^[3]:一种是传统的基于窄脉冲的冲激无线电技术;另一种是多频带 OFDM 技术。由于 MB-OFDM UWB 常采用相关解调,而相关解调需要准确的信道信息,所以信道估计对整个 UWB 系统的性能影响很大。

MB-OFDM UWB 系统常采用导频序列辅助的信道估计^[4]。目前有 2 种比较典型的导频序列插入方式:一种是块状导频(一定时间内所有的载波同时发送导频符号),适用于慢衰落的信道;另一种是梳状导频(某些载频专门用来发送导频符号)^[5-6],适用于快衰落的信道。而 UWB 信道模型是一种密集多径、慢衰落、准静态的信道^[7],因此笔者采用块状导频进行信道估计。基于块状导频的频域最小二乘(LS)算法的计算复杂度虽然很低^[8],但算法性能较

收稿日期:2009-03-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60672157,60672158);重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2005BB4219)

作者简介:刘郁林(1971-),男,重庆通信学院教授,博士,主要从事信号处理、认知无线电、无线传感器网络等研究,

(E-mail)spliuyl@uestc.edu.cn.

欢迎访问重庆大学期刊社 <http://qks.cqu.edu.cn>

差,尤其是在低信噪比(SNR)时估计性能易受噪声的影响。为降低噪声影响提高算法性能,研究人员提出了 DFT(Discrete Fourier Transform)算法^[9],利用信道长度不长于循环前缀(CP)的条件,提高了估计精度。但 DFT 算法没有利用 UWB 信道的稀疏特性,增加了一些无谓的抽头值,算法性能还有待改善。

针对 UWB 信道的稀疏性^[10-11],笔者提出一种基于抽头探测的 MP-DFT 算法。利用 DFT 算法得到原始信道估计值;然后基于接收信号的循环卷积特性建立一种时域卷积模型,采用匹配追踪(MP)算法探测出非零抽头位置;最后通过将信道中剩余抽

头置零得到信道估计值。

1 系统模型

MB-OFDM UWB 系统接收和发送机的结构如图 1 所示,为了进行高速的数据传送,系统采用数据包传送。数据经过交织编码后,进行 QPSK 调制和 IFFT 变换转化为时域数据,通过加入循环前缀(CP)形成 OFDM 数据块,其中的一些数据块就用来进行信道估计和同步。在接收端,利用估计的信道进行频域均衡,之后进行 QPSK 解调和 Viterbi 译码就可得到信息数据。

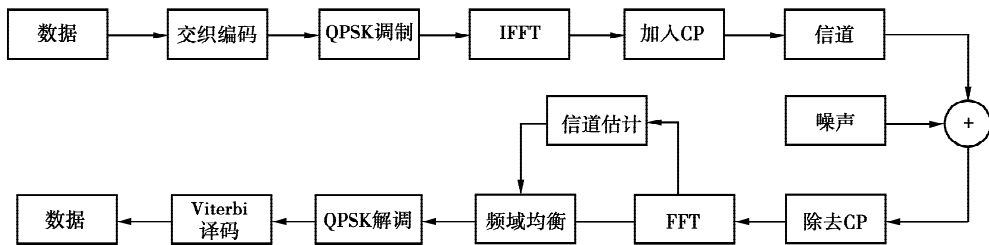


图 1 MB-OFDM UWB 系统发送与接收机框图

设 $S(k)(k=0,1,\dots,N-1)$ 为发送的经过交织编码和 QPSK 调制的信息序列, N 为 OFDM 系统的载频个数。经过 IFFT 变换后得到时域信号

$$s(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S(k) \exp\left(\frac{j2\pi nk}{N}\right), n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (1)$$

假设 CP 的长度为 M , 此时即可得到 OFDM 数据块

$$s_f(n) = \begin{cases} s(n+N), & n = -M, -M+1, \dots, -1, \\ s(n), & n = 0, 1, \dots, N-1. \end{cases} \quad (2)$$

加入循环前缀是为了消除码间干扰(ISI)和载波间干扰(ICI),为使系统有较好的性能,一般应满足以下条件^[12]:1)信道最大延迟小于 CP 长度;2)信道在一定时间内(比如一个 OFDM 数据包内)保持恒定;3)系统保持同步。通过合理的系统设计和算法设计,这些条件都能满足,这里假定条件均成立。

超宽带离散信道冲激响应可写成^[7]

$$h(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l \delta(n-l), \quad (3)$$

式中: h_l 表示第 l 条多径抽头的增益; L 表示多径的数目($L \leq M$)。则 OFDM 符号经过信道 h 后的接收信号可表示为

$$r(n) = s_f(n) * h(n) + v(n) =$$

$$\sum_{l=0}^{L-1} h_l s_f(n-l) + v(n),$$

$$n = -M, -M+1, \dots, N-1, \quad (4)$$

式中: $v(n)$ 为加性高斯白噪声序列; $*$ 表示卷积。

2 DFT 信道估计

由假设条件知: $L \leq M$, 所以可将式(4)中的线性卷积转化为圆周卷积,即为

$$r(n) = s_f(n) \otimes h(n) + v(n), \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (5)$$

式中 \otimes 表示圆周卷积。将式(5)两边进行 FFT 变换得

$$\mathbf{R} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{H} + \mathbf{V}, \quad (6)$$

式中: $\mathbf{S} = \text{diag}(S(0), S(1), \dots, S(N-1))$; \mathbf{R} 、 \mathbf{H} 、 \mathbf{V} 分别为除去 CP 长度后的接收信号、信道和噪声的 N 点 FFT 变换。

经 LS 算法估计的频域信道为^[6]

$$\hat{\mathbf{H}}_{LS} = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{R}. \quad (7)$$

经 IFFT 变换后得时域信道为

$$\mathbf{h}_{LS} = \text{IFFT}(\hat{\mathbf{H}}_{LS}). \quad (8)$$

显然, LS 估计是在整个符号宽度(N)内进行的,没有利用 $L \leq M$ 的条件,基于这一事实, DFT 算法在 LS 算法的基础上得到新的信道估计:

$$\hat{h}_{\text{DFT}}(n) = \begin{cases} \hat{h}_{\text{LS}}(n), & n = 0, 1, \dots, M-1, \\ 0, & n = M, M+1, \dots, N-1. \end{cases} \quad (9)$$

3 MP-DFT 算法

3.1 基于 MP 的信道抽头探测

由于 LS 算法和 DFT 算法没有利用 UWB 信道的稀疏特性,所以估计造成了很多无谓的零抽头,一方面降低了算法的准确度,另一方面在相干解调时增加了抽头的数目,合理利用信道的稀疏性既能提高估计性能又能简化系统的设计。匹配追踪(MP)^[13]是较常用的一种稀疏空间分解算法,此算法可用来探测信道非零抽头的位置。

首先利用发送和接收信号的循环卷积特性,建立如下时域模型:

$$\mathbf{r} = \mathbf{s} \otimes \mathbf{h} + \mathbf{v}, \quad (10)$$

将式(10)写为矩阵的形式,即为

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r(0) \\ r(1) \\ \vdots \\ r(N-1) \end{bmatrix} = \mathbf{s} \cdot \mathbf{h} = \begin{bmatrix} s(0) & s(N-1) & \cdots & s(N-M+1) \\ s(1) & s(0) & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s(N-1) & s(N-2) & \cdots & s(N-M) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h(0) \\ h(1) \\ \vdots \\ h(M-1) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中: $\mathbf{s}_{N \times M}$ 为发送信号矩阵; \mathbf{h} 为信道向量,长度为 M (若信道长度小于 M ,则在信道后补零)。为了利用 MP 算法,式(11)简化为

$$\mathbf{r} = \mathbf{s} \cdot \mathbf{h} = [\mathbf{s}_0 \quad \mathbf{s}_1 \quad \cdots \quad \mathbf{s}_{M-1}] \cdot [h(0) \quad h(1) \quad \cdots \quad h(M-1)]^T. \quad (12)$$

MP 算法就是从信号子空间 $\mathbf{s}_{\text{space}} = \text{span}\{\mathbf{s}_0 \quad \mathbf{s}_1 \quad \cdots \quad \mathbf{s}_{M-1}\}$ 中选出与目标向量 \mathbf{r} 最匹配的向量,并认为该向量对应的信道抽头系数最大,探测出最大向量后记下位置并从目标向量中除去该分量,再进行搜索,此过程不断迭代直到满足一定的终止条件,由此完成抽头探测。

匹配追踪是在子空间 $\mathbf{s}_{\text{space}}$ 中寻找与目标向量 $\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}$ 最匹配的列向量 \mathbf{s}_{k_0} ,算法是通过 2-范数进行搜索^[8]:

$$k_0 = \arg \max_n \frac{|\mathbf{s}_n^H \mathbf{r}_0|^2}{\|\mathbf{s}_n\|^2}, \quad n = 0, 1, \dots, M-1. \quad (13)$$

根据式(13)可探测出最大抽头的位置,目标向量变为

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 - \frac{(\mathbf{s}_{k_0}^H \mathbf{r}_0) \mathbf{s}_{k_0}}{\|\mathbf{s}_{k_0}\|^2}. \quad (14)$$

得到新的目标向量后,再探测出新的抽头位置 k_1 ,此过程循环往复,直到满足一定的迭代终止条件为止。

MP 抽头探测的流程为^[14]:

- 1) 根据系统接收的导频序列确定出目标向量 \mathbf{r}_0 ,探测子空间 $\mathbf{s}_{\text{space}}$;
- 2) 根据式(13)探测出最大抽头,并记下抽头的位置;
- 3) 抽头探测后,根据式(14)计算出新的目标向量 \mathbf{r} ,并将子空间中抽头位置上的向量置零;
- 4) 如果满足一定的迭代条件,则终止探测;否则继续执行 2)、3) 步骤。

其中,第 4) 步的迭代终止条件可以有很多种,常见的有以下几种:1) IEEE 定义的 4 种信道的多径时延不同,因此在已知信道类型的条件下可将信道长度转化为迭代次数,以此设定中止条件,例如文献[15]中分别选用 12、12、26、32 作为 CM1、CM2、CM3 和 CM4 4 种信道的长度;2) 在信道条件未知时可用文献[15]中提出的判决方法判断出信道的类型,再设置迭代次数作为终止条件;3) 设定目标向量剩余能量下限作为迭代中止条件(后面的仿真中提供了一组数据)。

3.2 估计信道

经过 DFT 算法后可以得到信道估计值为

$$\mathbf{h}_{\text{DFT}} = [h(0) \quad h(1) \quad \cdots \quad h(M-1)].$$

利用 3.1 节中的 MP 抽头探测后,探测出非零抽头的位置元素集合为

$$K_{\text{nonzero}} = \{k_0, k_1, \dots, k_{p-1}\}, \quad (15)$$

其中 p 为非零抽头的个数,集合 K_{nonzero} 中的元素满足: $0 \leq k \leq M-1$,此时,对于满足 $k \in [0, M-1]$,且 $k \notin K_{\text{nonzero}}$ 的整数即为零抽头的位置。所以利用集合 K_{nonzero} 修订信道估计为

$$h_{\text{MP-DFT}}(n) = \begin{cases} h_{\text{DFT}}(n), & n \in K_{\text{nonzero}}, \\ 0, & n \notin K_{\text{nonzero}}, \end{cases} \quad n = 0, 1, \dots, M-1. \quad (16)$$

此时即完成信道估计。

4 实验仿真

仿真中采用 IEEE 推荐的 4 种信道模型^[7],为简化起见将信道能量归一化,OFDM 符号中 CP 长度 M 为 32,单个符号内数据长度 N 为 128。假定已

知信道类型,并设定 4 种信道的长度分别为 12、12、26 和 32^[15],此时可将信道抽头长度作为抽头探测的迭代终止条件。仿真时利用均方误差(MSE)进行性能评价。

进行 500 次独立试验,将实验结果取平均。图 2-4 显示了不同信道长度下 MP-DFT 算法和 DFT 算法的估计性能比较。从图 2 中明显可以看出信道长度为 12 的 CM1 和 CM2 信道的稀疏性很好,MP-DFT 算法比 DFT 算法性能有明显的提高,MSE 降低 5.2~6.3 dB;图 3 中对于有较好稀疏性的 CM3 信道,算法性能约有 1.08 dB 的提高;图 4 为信道稀疏性较差的 CM4 信道,只有在信道存在零抽头时 MP-DFT 算法性能才会有一定的提高,此时性能平均有 0.52 dB 的改善。

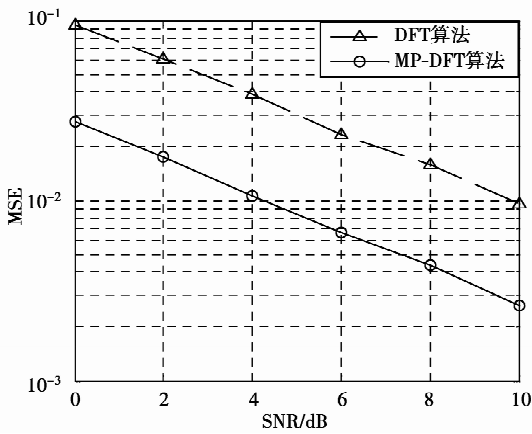


图 2 信道长度为 12 时算法性能比较

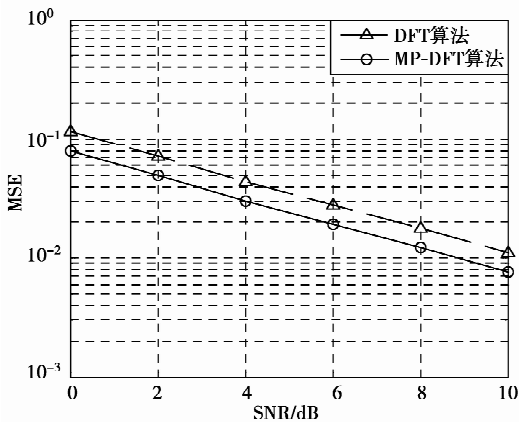


图 3 信道长度为 26 时算法性能比较

一方面为了检验抽头探测的性能,另一方面为了计算 3.1 节迭代条件为目标向量残留能量时具体的数值,仿真时计算了各种情况下目标向量的剩余能量。理论上分析,信道抽头数越小,信号子空间的维数就越小,剩余噪声子空间的维数相应就越大,残

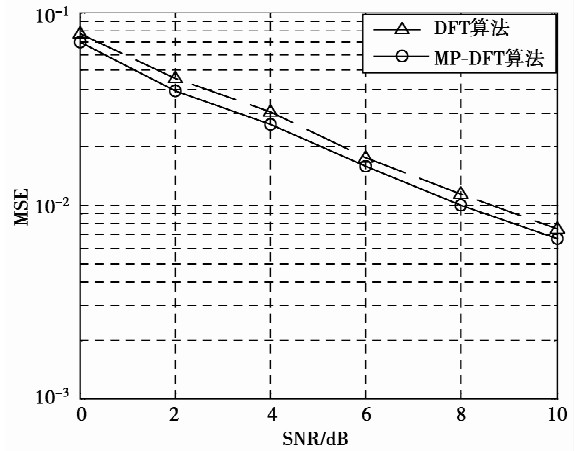


图 4 信道长度为 32 时算法性能比较

余能量就越大;另外信噪比越大噪声子空间的能量就越小,目标向量的剩余能量就越小。表 1 为经过抽头探测后目标向量的剩余能量分布,表中所列的数据是经 500 次独立实验后取平均得到的值。从表 1 中的数据分布明显可以看出数据的变化趋势与分析一致。

表 1 不同信道长度和信噪比下目标向量的剩余能量值

SNR/dB	L		
	12	26	22
0	0.417 0	0.305 0	0.219 1
2	0.281 3	0.197 9	0.145 0
4	0.179 3	0.130 2	0.094 7
6	0.121 4	0.085 9	0.065 8
8	0.081 3	0.061 2	0.051 8
10	0.055 8	0.044 0	0.034 2

5 结 语

针对 UWB 信道的稀疏性,提出了一种基于抽头探测的信道估计方法。在利用 DFT 算法得到信道估计值后,基于一种时域模型,通过 MP 算法得到稀疏信道估计。仿真结果表明,在信道有较好稀疏性时 MP-DFT 算法估计性能有明显提高。但算法在估计信道和探测非零抽头位置两方面没有利用统一的模型,因此算法的复杂度较高,如何寻找一种统一的模型来进行信道估计是下一步研究的方向。

参考文献:

[1] RODRIGUEZ V, JONDRAL F. Technical-economic impact of UWB personal area Networks on a UMTS cell: market-driven dynamic spectrum allocation revisited[C]// The 2007 IEEE symposium on New Frontiers in Dynamic
 欢迎访问重庆大学期刊社 <http://qks.cqu.edu.cn>

- Spectrum Access Networks, April 17-20, 2007, Dublin, Ireland. [S. l.]: IEEE, 2007: 585-596.
- [2] SUN X B, MA Y G, XU J, et al. A high accuracy mono-station UWB positioning system[C]// The 2008 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Sept. 10-12, 2008, the Leibniz University of Hannover, Germany. [S. l.]: IEEE, 2008:201-204.
- [3] ROY S, FOERSTER J R, LEEPER D G, et al. Ultra-wideband radio design: the promise of high-speed, short range wireless connectivity[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(2):295-311.
- [4] SIMEONE O, SPAGNOLINI U. Pilot-based channel estimation for OFDM systems by tracking the delay-subspace[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(1):315-325.
- [5] SONG B, GUI L, ZHANG W J. Comb type pilot aided channel estimation in OFDM systems with transmit diversity[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2006, 52(1): 50-57.
- [6] SIMEONE O, BAR-NESS Y, SPAGNOLINI U. Pilot-based channel estimation for OFDM systems by tracking the delay-subspace[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(1): 315-325.
- [7] WIN M Z, SCHOLTZ R A. Characterization of ultra-wide bandwidth wireless indoor channels: a communication-theoretic view[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2002, 20(12): 1613-1627.
- [8] LIN J C. LS channel estimation for mobile OFDM communications on time-varying frequency-selective fading channels [C] // 07' IEEE International Conference on Communications, June 24-28, 2007, Glasgow, Scotland. [S.l.]: IEEE, 2007: 3016-3023.
- [9] YANG X D, ZHU X M, WANG Y D. et al. Analysis of DFT-based channel estimation algorithm for UWB-OFDM system[C]// IET International Conference on Wireless, Mobile and Sensor Networks, Dec. 12-14, 2007 Shanghai, China. [S. l.]: IEEE, 2007:798-800.
- [10] SADOUGH S M S, ICHIR M M, JAFFROT E, et al. Multiband OFDM UWB channel estimation via a wavelet based EM-MAP algorithm[C]// The Seventh IEEE International Workshop on Signal Processing Advances for Wireless Communications, July 2-5, 2006, Cannes, France. [S. l.]: IEEE, 2006:1-5.
- [11] PAREDES J L, ARCE G R, WANG Z M. Ultra-wideband compressed sensing: channel estimation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(3): 383-395.
- [12] LI X J, QIU H B. Study on channel estimation for UWB MB-OFDM [C] // International Conference on Communication Technology, Nov. 27-30, 2006, Guilin, China. [S. l.]: IEEE, 2006:1-4.
- [13] REMUS J J, COLLINS L M. Matching pursuits decomposition for discrimination of unexploded ordnance: isolated and overlapping signatures[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 6-11, 2008, Boston, Massachusetts, USA. [S. l.]: IEEE, 2008, 2: II-21-II-24.
- [14] SHOA A, SHIRANI S. Adaptive rate-distortion optimal in-loop quantization for matching pursuit [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(9): 1616-1623.
- [15] FAN X N, LENG B, BI G G. An improved channel estimation algorithm for OFDM UWB[C]// 2005 IEEE Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Sept 23-26, 2005, Wuhan, China. [S.l.]: IEEE, 2005: 173-176.

(编辑 张 苹)