

一种改进的基于训练序列的 OFDM 符号同步算法

李绪诚, 杨鲁平, 张正平

(贵州大学 电子科学与信息技术学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:同步问题是正交频分复用(OFDM)应用中的关键技术。文章研究了基于训练序列的 Schmidl&Cox 算法(简称 SC 算法),并针对 SC 算法误差大的缺点,采用了增加计算点数和平滑最大值处理方法来进行算法的改进。通过 MATLAB 进行的仿真分析表明,改进后的算法虽然计算量有所增加,但有效减少了符号定时的波动,在低信噪比情况下定时同步性能有明显改善。

关键词:正交频分复用;符号同步;训练序列;最大似然

中图分类号:TN911 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-8788(2007)06-0054-03

An improved OFDM symbol synchronization algorithm based on training sequence

Li Xucheng, Yang Luping, Zhang Zhengping

(Electronics and Information Technology College, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Synchronization is a key technology in OFDM applications. The training sequence-based Schmidl&Cox (S&C) synchronization algorithm is studied, which is improved in view of its high estimation error by adding the calculation points and smoothing the maximum value. MATLAB simulation and analysis show that although the calculation amount is somewhat increased, fluctuations of the symbol synchronizations are effectively reduced and the synchronization performance remarkably improved in low SNR.

Key words: OFDM; symbol synchronization; training sequence; maximum likelihood

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术是 Beyond 3G 移动通信系统中的核心技术^[1]。在 OFDM 应用中一个最为关键的技术难点就是同步问题,相对单载波系统而言,OFDM 对同步误差非常敏感,同步问题如果解决得不好,会引起 OFDM 系统性能的急剧下降。同步算法可以分为数据辅助法和非数据辅助法两大类。由于现代通信系统对同步的要求越来越高,以及非数据辅助法有其固有缺陷,同步性能更好的数据辅助类算法就成为目前研究的热点。本文主要研究了数据辅助类中的经典算法——基于训练序列的 Schmidl&Cox 算法(简称 SC 算法),并针对 SC 算法误差大的缺点,采用了增加计算点数和平滑最大值处理方法来进行算法的改进。通过 MATLAB 进行的仿真分析表明,改进后的算法虽然计算量有所增加,但有效减少了符号定时的波动,在低信噪比(SNR)情况下定时同步性能有明显改善。

1 OFDM 系统模型

OFDM 是一种多载波调制,它在本质上是一种频分复用技术,其原理如图 1 所示。它是将高速的串行数据分解成很多低速率的子数据流,以并行方

式在多个子载波上传输,子载波间彼此保持相互正交的关系,以消除子载波间的数据干扰,每个子载波可看成是一个子信道。转换后的 N 路低速数据流分别去调制 N 路相互正交的子载波,然后将 N 路子载波合并成一路进行传输。

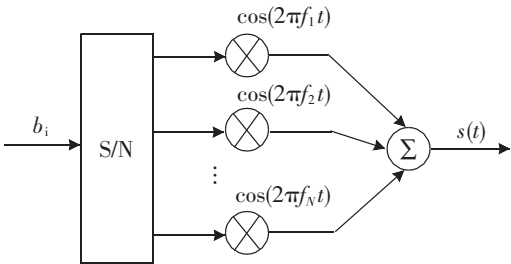


图 1 OFDM 基本原理

在发送端,首先对原始数据进行编码、交织,然后进行串/并变换,把一路信号分成并行的 N 路,通过 N 点 IFFT 变换(快速傅里叶逆变换)把数据调制到多个相互正交的子载波上并行发送,把 IFFT 变换后得到的 N 个样点称作一个 OFDM 符号,然后把符号的最后 L 个样点复制到最前面,作为循环前缀(Cycle Prefix, CP),用于抵抗符号间干扰(Inter Symbol Interference, ISI),再通过发射机发送出去。接收端执行与发送端相反的过程,对射频信号

收稿日期:2007-06-22

基金项目:贵州省高层次人才基金资助项目;贵州省省长基金资助项目;贵州省科技厅工业攻关项目(黔科合 GY 字(2006)3020)

作者简介:李绪诚(1980-),男,贵州贞丰人,硕士,主要研究方向为信号传输与处理。

下变频后进行抽样,得到离散的样点。然后进行定时估计,找到 OFDM 符号的起始位置,除去 CP 部分,对 CP 后面的 N 个样点作 N 点 FFT 变换(快速傅里叶变换)。再进行判决解调,如果采用相干解调,那么还需要估计信道参数来辅助解调,解调后的数据进行解交织、解码,得到原先的数据。

2 OFDM 同步算法原理及分类

我们知道,根据信号的相关原理,两个信号的互相关函数可以用来了解两个未知信号之间的相似程度,或者两个已知信号之间的时间关系。如果两个已知信号是相似的,那么只需要调整它们之间的时差,就可以求得相关函数的最大值,从而确定它们之间的时间延迟。对于具有自相似结构的信号,可以通过求其自相关函数的峰值来确定相似部分的起始位置,OFDM 系统中正是利用这种相关性原理进行同步的。相关函数的峰值只有在 OFDM 符号的正确起始点处获得,即相关峰对应于符号的起始位置。这种直接利用相关函数进行参数估计方法的依据是最大自相关(MC)准则。实际上利用相关性原理进行参数估计的准则还包括最小均方误差(MMSE)准则和最大似然(ML)准则,Stefan 等人分别利用 ML、MMSE 和 MC 准则对符号起始位置进行估计,结果发现在多径信道中 ML 方法的稳健性最强^[2],因此很多算法中都是利用 ML 方法进行符号同步。

实际上,OFDM 系统中要传输的有效数据本身是不具备这种相关特性的,因此必须人为地引进一些数据,使得传输的 OFDM 信号具有部分自相似性。这些特殊的数据包括训练符号和循环前缀。无论是采用训练符号还是循环前缀方法,都是利用这些检测数据在 OFDM 信号中的已知结构相关性。

3 基于训练序列的同步算法

基于训练序列的同步算法是在发送端发送特定的已知的训练符号(训练符号加在分组数据包的包头中),接收端通过对训练符号的捕获和处理,来获得符号定时和频率偏移的估计。这种估计的准确度较高,在多径衰落信道场合的稳定性好。

3.1 SC 算法

Schmidl 和 Cox 提出了一种基于辅助数据的符号同步和载波同步联合估计方法^[3~4]。在这种算法中,采用两个已知数据,第一个用于符号同步,第二个用于载波同步。他们将一个已知数据从中间分

为对称的两部分,每部分具有 $L=N/2$ 个样点(如图 2 所示)。

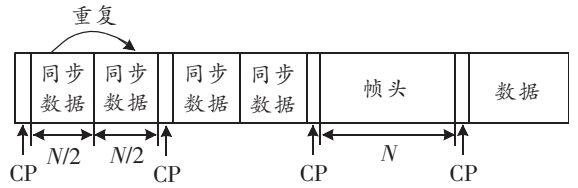


图 2 SC 算法的训练符号设置

在接收端,第一部分样点与另一部分样点因为频率偏移而存在一个相位差。训练数据通常是一个 PN(伪随机)序列,Schmidl 和 Cox 定时估计器从定时度量

$$M(d) = \frac{|p(d)|^2}{R^2(d)}$$

中取出值最大的点作为符号的开始,

$$p(d) = \sum_{m=0}^{L-1} y_{d+m}^* y_{d+m+L},$$

$$R(d) = \sum_{m=0}^{L-1} |y_{d+m+L}|^2,$$

式中, y 为接收端收到 OFDM 符号的一个样值点, d 为 OFDM 符号起始点, m 表示累加范围是从 0 到 $L-1$ 。

3.2 改进算法

SC 算法作为数据辅助类算法中的经典算法,其思想具有开创性意义,但性能并不十分令人满意。后人主要在训练符号的结构和码型两方面进行了优化调整。Yon Hee Kim 等在 SC 算法的基础上进行了改进^[5],只用了一个前后相同的 OFDM 符号,将 SC 算法中第二步在两个符号间进行差分改进成在同符号的前后两部分间进行差分。在 Minn H 提出的定时算法^[6]中,用于定时的训练符号由 4 个相同部分组成,可以表示为 $[B \ B \ -B \ -B]$ 。

总的来看,以上改进算法都是将训练符号作为改进的出发点。算法都是将训练符号的设置作为改进点,现考虑从 SC 算法的计算上进行改进。针对 SC 算法在低信噪比情况下的估计值方差较大的缺点,提出一种改进的判决方法,改进方法用两个相关窗口中所有采样点的功率作为判决函数,并对最大值做平滑处理。具体做法是:首先找到最大值点,然后再取两个最大值的 90% 的点,一点位于最大值左边,另一点位于其右边,对这 3 个点进行均值运算,最后,通过对大于最大值的 0.8 倍的时标作均值来确定符号起始点。改进的 SC 算法如下:

$$\begin{cases} c_d = \sum_{k=0}^{L-1} (r_{d+k-L}^* r_{d+k}) \\ p'_d = \sum_{k=-L}^{L-1} r_{d+k}^* r_{d+k} = \sum_{k=-L}^{L-1} |r_{d+k}|^2 \\ M = \max \left(\frac{4 |c_d|^2}{(p_d)^2} \right) \\ \hat{d} = \text{mean} \{ \text{index}(m_d > 0.80M) \} \end{cases},$$

式中, M 为定时度量的最大值, $\hat{d}$ 为符号定时估计点, mean 表示取平均运算。

3.3 仿真

图 3 给出了传统 SC 算法和改进算法在多径信道下定时同步性能的比较。每条曲线都是通过蒙特卡洛(Monte Carlo)方法得到的;每次都使用 5 000 个 OFDM 符号进行仿真, SNR 范围是 0~18 dB, 子载波个数 $N = 1\,024$, 循环前缀的长度 $N_g = 128$, 频偏为 0.25 倍子载波带宽。多径衰落信道采用 6 径的 Jakes 模型, 最大信道时延扩展为 9 个抽样间隔, 每一径的幅度比例分别为 $[0.795\,8, 0.392, 0.245, 0.275, 0.042\,1, 0.02]$, 相位在 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布。定时估计的性能用定时估计的标准方差 σ_d 来衡量, 标准方差的单位是抽样时间间隔。当定时估计点 $\hat{d}$ 在 OFDM 符号的起始点时, 定时估计的误差为 0, 否则, 以定时估计点与符号起始点的距离来计算误差。将 5 000 个符号定时点的误差平方后累加, 然后取平均, 将结果开平方后就是定时估计的标准方差 σ_d 。

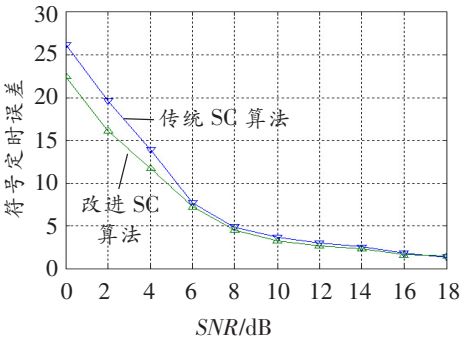


图 3 改进 SC 算法与传统 SC 算法定时误差比较

可以看到, 当 SNR 较低时 ($\text{SNR} \leq 6\text{ dB}$), 改进 SC 算法的定时同步性能与传统 SC 算法相比有明显的改善; 随着 SNR 逐渐增大, 两者的定时误差逐渐趋于相同。

4 结 论

本文在 SC 算法的基础上提出了一种改进的基于训练序列的同步算法, 与 SC 算法相比, 改进算法通过增加计算点数和平滑最大值处理方法改进了传统算法在低 SNR 下误差大的缺点, 提高了定时估计的精度。

参考文献:

[1] 尹长川, 罗涛, 乐光新. 多载波宽带无线通信技术 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.

[2] Muller-Weinfurter S H. ON the optimality of metrics for coarse frame synchronization in OFDM: a comparison [A]. The Ninth IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications [C]. New York: IEEE, 1998. 533-537.

[3] Schmidl T M, Cox C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM [J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(12): 1 613-1 621.

[4] Santella G. OFDM with guard interval and sub-channel equalization in a 2-resolution transmission scheme for digital television broadcasting [A]. Proc. 1994-IEEE Int. Conf. Communications, (ICC'94) [C]. New Orleans: IEEE, 1994. 1: 374-380.

[5] Kim Y H, Hahm Y K. An efficient frequency offset estimator for timing and frequency synchronization in OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2001, 50(5): 580-583.

[6] Minn H, Bhargava V K. On timing offset estimation for OFDM systems [J]. IEEE Communications Letters, 2000, 4(7): 242-244.