

一种新的 MC-CDMA 系统同步算法

孙雪俊, 焦 影, 曾虹虹, 周祖成

(清华大学电子工程系微波与数字通信国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 多载波 CDMA(MG CDMA) 技术结合了正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 和 CDMA 技术的特点, 在无线衰落信道中传输高速数据时具有突出的优势. 整个 MG CDMA 系统中同步性能起着非常重要的作用. 本文在分析现有各种同步算法性能的基础上提出了一种新的 MG CDMA 同步算法, 理论分析和仿真表明这种新算法具有更好的同步性能且具有更低的系统复杂度.

关键词: MG CDMA; 多载波; 同步

中图分类号: TN929. 533 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001) 12A-1904-04

A New Synchronization Algorithm on MG-CDMA Systems

SUN Xue jun, JIAO Ying, CHANG Hong hong, ZHOU Zu cheng

(State Key Lab. of Microwave & Digital Communications, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Multi carrier code division multiple access (MG CDMA) technology, which combines both advantages of OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) and CDMA, has superior performance when transmitting high rate data in wireless fading channels. However, synchronization performance plays a key role on MG CDMA systems. Based on the analysis of existing synchronization algorithms, a new synchronization algorithm is proposed in this paper. Theoretical analysis and computer simulation show that this algorithm has superior synchronization performance and less system complexity.

Key words: MG-CDMA; Multicarrier transmission; synchronization

1 引言

多载波传输的正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术将待传送的高速数据, 分解并调制到多个相互交叠又互相正交的子信道上, 使每个子通道的码元宽度大于扩展延时. 若在码元之间增加一定长度的保护间隔, 则多径传输引起的码间串扰基本上被消除. 这个特点有利于在多径衰落和有多普勒频移的移动无线传输信道中传输高速数据. 码分多址(Code Division Multiplexing Access, CDMA) 的多址技术已经非常成熟并成为了第三代移动通信技术的核心, 把 OFDM 与 CDMA 结合在一起的多载波 CDMA(MG CDMA), 已成为下一代移动通信的研究热点^[1]. MG CDMA 在扩展频谱的同时避免了码间串扰和多径干扰的负面效应, 无疑具有很广阔的前景.

由于 MG CDMA 系统利用多个载波传输数据, 相邻载波的间隔非常之小, 它对系统的同步错误就非常敏感. 系统同步通常包括时间同步和载波同步, 系统的同步错误也涉及这两方面: 时间同步错误包括常数时间偏移、时钟频率偏移和时间抖动三种, 而载波同步错误则包括了常数相位偏移、载波频率偏移和载波相位抖动三种, 在 MG CDMA 系统中纠正同步错误就非常重要.

本文对现有各种同步算法的性能进行了分析并提出了一种新的同步算法. 理论分析和计算机仿真表明这种新算法可以大大缩短捕获时间并减小误码率.

文章的第 2 部分介绍了 MG CDMA 系统的模型, 包括发射机、接收机和信道的模型, 第 3 部分对已有的各种同步算法的性能作了分析, 并详细介绍了作者提出的新同步算法, 仿真结果和结论在第 4 和第 5 相继部分给出.

2 系统模型

2.1 发射机模型

考虑用户数为 M 的 OFDM-CDMA 系统的下行信道, 发射机模型如图 1 所示. M 个用户的数据在扩频后经过串并变换, 连续 μ 个数据比特(对应于 μL 个码片)分配到 N 个子载波上, 然后进行块交织和频率交织, 用 IFFT 进行 OFDM 调制, 加入保护间隔和导频就生成了发射信号. 其中保护间隔 Δ 将插入到相邻 OFDM 子载波之间, 以克服码间串扰 ISI 和信道间串扰 ICI. 为使抗多径性能好, 应该选择保护间隔 Δ 大于时延扩展 T_m (即 $\Delta > T_m$).

设 $a_m[i]$ 代表用户 m 发送的第 i 个数据且 $a_m[i]$ 的持续时间为 T_b , $c_m[l]$ 为用户 m 扩频码的第 l 位($l = 0, 1, 2, \dots, L - 1$). 所有用户使用的扩频码为正交 Walsh-Hadamard(W-H)

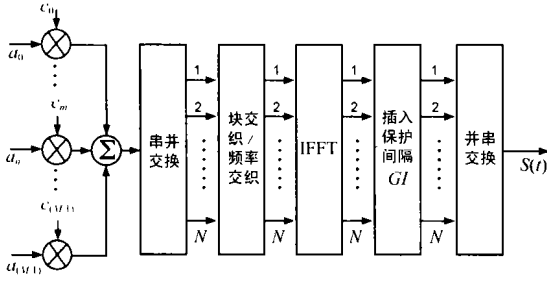


图 1 MG-CDMA 系统下行链路发射机模型

码, 码长为 L , 则扩频后每个用户数据比特生成 L 个码片, 每个码片的持续时间为 $T_c = T_f/L$. 通常 WH 码的码长 L 选 64 或 256, 而 OFDM 子载波的数目 N 可为 2048、4096 甚至 8192. 因此每个 OFDM 帧可以传输 $\mu = N/L$ 个数据比特, 即连续的 μ 个数据符号构成一个 OFDM 帧. 这样可以设 OFDM 帧的 μ 个用户数据符号中的第 k' 个用户数据符号, 扩频后对应扩频码第 l 位的数据码片调制到 OFDM 帧的第 k 个子载波上(其中 $k = k'L + l, k' = 0, 1, \dots, \mu$), 其对应关系由 i 来决定并得到:

$$X_i(k) = \sum_{m=0}^{M-1} C_m[l] a_m[i] \quad (1)$$

这样在做 IFFT 之后得到的 OFDM 帧数据宽度为 $T_s = \mu T_b$, 如果加上保护间隔 Δ , 最后得到的 OFDM 帧宽度为 $T = T_s + \Delta$, 得到发送的时域信号为:

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=0}^{N-1} X_i(k) \exp[j2\pi k(t - iT)/T_s] \cdot p_T(t - iT) \cdot \exp[j2\pi f_0 t] \quad (2)$$

式中 p_T 为宽度 T 的单位脉冲.

2.2 信道模型

假设时延扩展远小于 OFDM 码元周期, 且考虑到 OFDM 中加入了保护间隔, 可以认为不存在码间串扰; 既然每个子载波所占带宽非常窄, 可以认为其远小于相关带宽, 即在每个子载波所用的频带内衰落是一致的(平坦衰落), 因此每个子信道上的信号没有幅相失真. 假设每个子载波上的衰落为独立同分布的瑞利衰落, 这样子载波 i 上对应用户 m 的传输函数为:

$$H_m(f_0 + i/T_b) = \rho_{m,i} \exp(j\theta_{m,i}) \quad (3)$$

其中 $\rho_{m,i}$ 是信号幅度衰落系数, $\theta_{m,i}$ 是相位失真, 可认为在该 OFDM 符号周期内这两者保持不变. 既然不同用户 m 的数据通过相同载波 i 传送, 其衰落只跟载波 i 相关而与用户 m 无关, 就可以认为 $\rho_{m,i} = \rho_i, \theta_{m,i} = \theta_i$.

信道衰落特性 ρ_i 和 θ_i 可以通过插入导频的方法估计出来, 即不考虑盲处理分析. ρ_i 是瑞利分布, 它的均值和方差为:

$$E(\rho_i) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_i \quad (4)$$

$$E(\rho_i^2) = 2\sigma_i^2$$

θ_i 为在 $[0, 2\pi]$ 归一化分布的随机变量.

2.3 接收系统模型

不失一般性, 考虑用户 0 的接收机模型如图 2 所示.

接收的用户数据先须进行同步, 找到数据帧的起始点, 之后再作变换, 去除保护间隔, 作 FFT 后根据信道估计的结果作均衡, 去交织后再去解码. 可以看到, 在这整个过程中同步是至关重要的.

3 一种新的 MG-CDMA 同步算法

MG-CDMA 传输的数据具有 CDMA 信号的形式, 与纯粹的 OFDM 传输二进制数据不同, 这决定了在频率同步之前更为重要的是实现帧同步. 由于 MG-CDMA 使用的传输技术仍然是 OFDM, 所以传统的各种 MG-CDMA 同步算法主要还是借鉴了 OFDM 的同步方法. 通常可以分为初始捕获和精确跟踪两个过程, 在初始捕获阶段采用较多的冗余数据和较复杂的算法来实现, 而在精确跟踪阶段则主要是纠正较小的抖动和偏移.

最典型的同步方法基于导频符号, 用了最大似然准则来进行判决^[2, 3]. 这一类的方法通常用的是频域导频, 但利用时域导频符号来辅助同步和信道估计也正受到重视. 由于频率同步错误和时间同步错误在导频符号的相位上有明显反映^[4, 5], 所以还可以通过分析发送和接收导频符号的相位变化来实现同步.

但是考虑到使用导频符号会降低数据传输率的因素, 在很多传统的同步算法中还利用了 OFDM 帧的循环前缀(cyclic prefix)作保护间隔(GI), 从而利用 GI 与 OFDM 数据帧内一部分数据的相关性来实现同步, 最大似然方法成为了这类同步方法的基础^[7, 8].

目前基于导频的同步算法和基于循环的同步算法都已经很成熟, 二者各有优劣, 采用导频在实现同步时精确度较高, 尤其是在信道条件恶劣时保护间隔(GI)的数据损伤严重, 用循环前缀(CP)作依据会使同步性能下降. 但采用导频同步必然会导致数据率下降. 但是, 现有的各种算法有一个共同的特点: 主要面向的还是 OFDM 的信号结构. 如图 3 所示, 现在广泛采用的同步算法在 FFT 之前作同步, 没有充分利用 MG-CDMA 系统里传输的 CDMA 信号结构, 在同步时把 CDMA 信号当作一般的二进制信号来处理, 这是一个很大的损失.

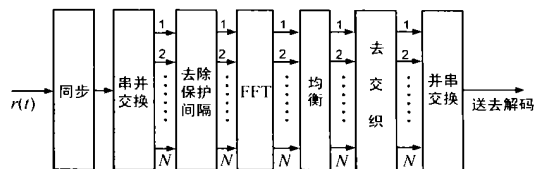


图 2 MG-CDMA 接收机模型

在 MG-CDMA 系统中发射机中用了 M 序列来作扩频, 对某个用户来说其相应的 PN 序列是已知的. 由此我们可以考虑采用用户扩频码作 IDFT 后在接收机的 FFT 之前作同步, 这是一种全新思路的同步算法, 可以充分利用 MG-CDMA 信号中的 CDMA 结构, 如图 4 所示.

考虑 CDMA 信号的相关特性, 设接收信号序列为 $a[n]$, 在作 OFDM 分帧/FFT 之后具有 CDMA 信号结构, 对应的码流为 $A[k]$, 相应用户的扩频码序列为 $B[k]$. 假定 $b[n]$ 为扩频

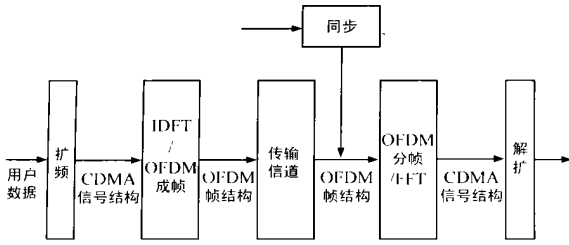


图3 MG-CDMA 系统信号传输流程图

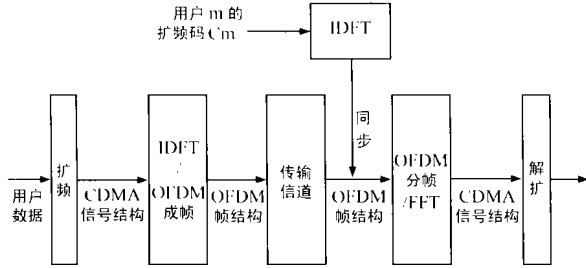


图4 MG-CDMA 新同步算法流程图

码序列 $B[k]$ 作 IDFT 变换对应的时域序列, 则按照通常 CDMA 系统的同步原理, 应该根据 $A[k]$ 和 $B[k]$ 的相关特性来进行判决. 由于,

$$R_{AC}(m) = \sum_{k=0}^{N-1} A[k] B[k-m] \quad (5)$$

所以此相关函数的 IDFT 为:

$$\begin{aligned} r_{ab}(n) &= IDFT\{R_{AB}(m)\} = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} R_{AB}(m) e^{j2\pi nm/N} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} \left(\sum_{n=0}^{N-1} a[n] e^{-j2\pi kn/N} \right) \cdot B[k-m] \right\} e^{j2\pi nm/N} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} a[n] \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} \left(\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} B[k-m] e^{-j2\pi kn/N} \right) e^{j2\pi nm/N} \right\} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} a[n] \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} (b^*[n] e^{-j2\pi kn/N}) \cdot e^{j2\pi nm/N} \right\} \\ &= N \sum_{n=0}^{N-1} a[n] \cdot b^*[n] \end{aligned} \quad (6)$$

在 CDMA 系统中由于用于扩频的 PN 序列或 Walsh-Hadamard 码具有很好的相关特性, 接收码流和扩频码在相位对齐的情况下二者的相关值出现峰值, 由此可以实现初始捕获. 在 MG-CDMA 系统中则可以根据这个原理, 在 FFT 之前用 $N \sum_{n=0}^{N-1} a[n] b^*[n]$ 来计算相关值的峰值, 可以在最短时间内实现捕获.

如图 5 所示, 需要进行判决的函数为 $\sum_{n=0}^{N-1} a[n] b^*[n]$, 部分求和器得到的值小于门限, 则直接判决为失步状态, 通过相位控制器改变扩频码序列相位进行下一次判决; 而如果得到的值大于门限, 则再次进行部分求和, 如连续四次的结果都大于门限值, 则输出已捕获的控制信号.

从捕获性能上来比较, CDMA 系统中用的扩频码相关特性好于 OFDM 同步算法中使用的导频和保护间隔, 用这种方法来作 MG-CDMA 系统的同步, 不仅捕获时间短, 而且在系统复杂度方面也大为降低.

4 仿真结果分析

对 MG-CDMA 系统的仿真是在 SUN 工作站上使用 Cadence 公司的系统级仿真软件 SPW 进行的, 在仿真中, 使用的子载波数 $N = 128$, 选用 M 序列作为扩频 PN 码, PN 码生成多项式为:

$$I \text{ 路: } 1 + X^2 + X^3 + X^4 + X^5 + X^6 + X^7$$

$$Q \text{ 路: } 1 + X + X^2 + X^4 + X^5 + X^6 + X^7$$

移位寄存器的初始值都是“01”. IFFT 和 FFT 的长度都是 128. 在仿真中, 使用 AWGN 和瑞利信道进行研究.

使用 AWGN 信道进行捕获时, 选取 SNR = 15dB, 各个信号波形如图 6 所示.

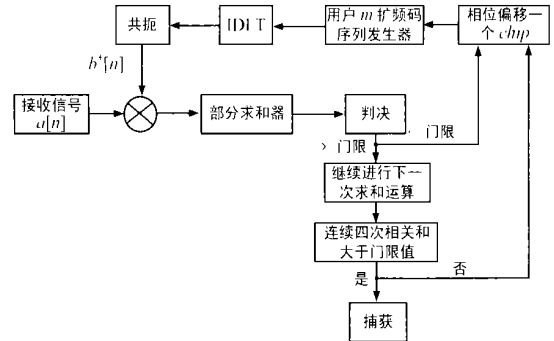


图5 初始捕获系统框图

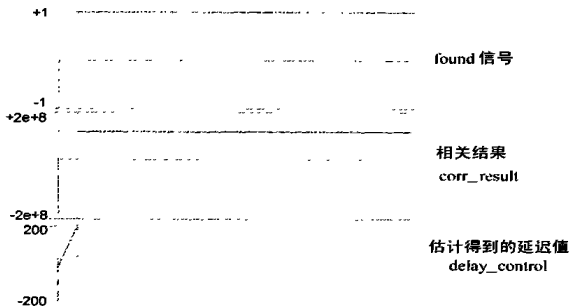


图6 AWGN 信道捕获性能

如图 6 中, $found$ 是捕获信号, $found = 0$ 时系统处于失步状态, $found = 1$ 时系统处于捕获状态; $delay_control$ 是对输入信号进行的延时调整, 在本系统进行仿真时, 设定信号与 PN 码之间的延时是 3, 由于 SPW 软件无法进行正延时, 所以捕获后 $delay_control$ 调整的结果是 125. $corr_result$ 是相关结果, 相关长度取的是 128 位, 即为一个 $symbol$ 的长度. 仿真得到捕获时间为 129 个 chip 的时间, 如果取码片率为 1.228M chip/s, 那么捕获时间就是 0.000105 秒.

使用瑞利信道进行捕获时, SNR = 15dB, 各个信号波形如图 7 所示.

由于瑞利信道的影响, 接收信号的相关性能变差, 在新提出的算法中捕获的时间是 370 个 chip 的时间, 如对应码片率 1.228Mchip/s, 得到捕获时间为 0.000301 秒. 需要说明的是, 图中相关值很大, 所以只要选择合适的域值, 就可以很容易地实现捕获.

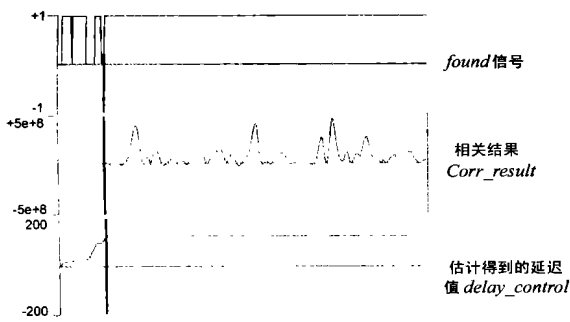


图 7 瑞利信道下的捕获性能

5 结论

本算法侧重于提取 OFDM 信号结构中传输的 CDMA 码流,充分利用其 PN 序列相关性等 CDMA 同步的算法来实现优化同步.其最终目的是在 MG-CDMA 系统的同步算法研究方面结合 OFDM 和 CDMA 的同步算法,找出最优化的算法.这是综合了现有算法基础上的一条新思路,可研究的内容以及应用前景都非常广阔.

参考文献:

- [1] N Yee. Multicarrier CDMA in indoor wireless radio networks [A]. Proc. IEEE International Symposium on Personal indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC' 93) [C], 1993: 109- 113.
- [2] Warner W D. OFDM/ FM frame synchronization for mobile radio data communication [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Aug. 1993, 42(3): 302- 313.
- [3] Daffara F. Maximum likelihood frequency detectors for orthogonal multicarrier systems [A]. IEEE International Conference on Communications, 1993, 2: 766- 771.

- [4] Dong Kyu Kim. A new joint algorithm of symbol timing recovery and sampling clock adjustment for OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, Aug. 1998, 44(3): 1142- 1149.
- [5] Dong Seog Han. On the synchronization of MG- CDMA system for indoor wireless communications [A]. Vehicular Technology Conference [C] 1999.
- [6] Matic D. OFDM synchronisation based on the phase rotation of sub carriers [A]. Vehicular Technology Conference Proceedings [C]. 2000.
- [7] van de Beek, J. J. ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, July 1997, 45 (7): 1800- 1805.
- [8] M Sandell. Timing and frequency synchronization in OFDM systems using the cyclic prefix [A]. Proc. IEEE int. Symp. Synchronization, Essen [C]. Germany, 1995.

作者简介:



孙雪俊 男. 1974 年 9 月生. 1997 年 7 月在清华大学电子工程系微电子专业获得学士学位, 现为清华大学电子工程系通信与信息系博士研究生. 主要从事 OFDM、MG-CDMA 同步算法方面的研究.



焦影 女. 1976 年 11 月生. 1999 年 7 月在清华大学电子工程系无线电技术与信息系统专业获得学士学位, 现在清华大学数字微波通信国家重点实验室 CAD 中心周祖成教授的指导下攻读硕士学位. 目前研究方向为 MG-CDMA 系统的同步算法