

一种新的应用于多载波码分多址系统的干扰对消算法

王明曙, 陆建华, 周祖成
(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 本文提出了一种适用于多载波直扩码分多址系统(MG-DS-CDMA)上行信道的低复杂度部分并行干扰对消(LG-PPIC)算法. 该算法充分利用MG-DS-CDMA系统的信道估计与子载波分集, 在各个子载波上将用户分为可靠, 普通和无效三类. 对可靠用户进行干扰对消处理并消去后, 再对普通用户进行相同操作, 并放弃无效用户, 最后将各个子载波上的结果通过最大比合并(MRC)输出. 这样, 在降低运算复杂度的同时, 更好地抑制了多址干扰(MAI). 通过仿真比较, 可以看出LG-PPIC算法的误码率(BER)性能明显优于置于载波合并前后的两种部分并行干扰对消(PPIC)算法, 特别是在系统负载较重和信噪比较高的情况下, 这种优势十分显著.

关键词: 多载波直扩码分多址系统; 低复杂度部分并行干扰对消算法

中图分类号: TM15 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)03-0507-04

A Novel Interference Cancellation Method in MG-DS-CDMA Systems

WANG Ming-shu, LU Jiann-hua, ZHOU Zu-cheng
(Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper proposes a low complexity partial parallel interference cancellation (LG-PPIC) scheme for an uplink multi-carrier direct sequence code division multiple access (MG-DS-CDMA) system. Specifically the proposed algorithm utilizes the results of channel estimation to classify users as reliable, invalid or ordinary in every subscriber. Reliable users are first subtracted after performing partial parallel interference cancellation (PPIC), while, thereafter, the same process is executed among ordinary users, and invalid users are ignored. Finally, maximal ratio combining (MRC) is carried out for reliable and ordinary users to come up with the final detection results. It is worth noting that the algorithm takes advantage of channel estimation and frequency diversity, achieving improved performance with only a little increase in implementation complexity. Simulation results show that the proposed LG-PPIC detector outperforms both the after-MRC-PPIC detector and the before-MRC detector, especially in a high system load and high signal to noise ratio (SNR) case.

Key words: multi-carrier direct sequence code division multiple access (MG-DS-CDMA); low complexity partial parallel interference cancellation (LG-PPIC)

1 引言

多载波码分多址 MG-CDMA 系统^[1,2]将正交频分复用 (OFDM) 和码分多址 (CDMA) 技术有机结合起来, 既有效抑制了无线信道的频率选择性衰落, 又可以实现高频谱利用率的多用户接入. 因此, 在下一代宽带无线通信的研究中, MG-CDMA 系统受到了越来越大的重视. 本文所针对的是一种时域扩频的 MG-CDMA 系统, MG-DS-CDMA 系统. 在该系统中, 将各个子载波分成不同的子载波组, 每个组内的各个子载波互不邻, 可以认为具有不同的衰落特性. 同一组内的各个载波传输相同的经过扩频的信息比特, 不同的子载波组传输不同的信息比特. 这样, MG-DS-CDMA 系统可以充分利用各个子载波的能量, 通过合理的合并方式获得较好的检测性能. 本文采用的

子载波合并方式为最大比合并(MRC).

在 MG-DS-CDMA 系统的反向信道中, 即使用户之间存在较好的同步, 扩频码的各个码片经历的衰落也不能保证完全一致; 同时不同用户在相同子载波上经历的衰落也不尽相同, 这就破坏了扩频码的正交性, 使得用户之间存在多接入干扰 (MAI). 为了有效抑制 MAI 就需要引入多用户检测 (MUD) 技术. 一些研究^[3,4]将已有的应用于 DS-SS-CDMA 的多用户检测算法直接引入了 MG-DS-CDMA 系统, 在子载波合并以后再进行多用户检测处理. 这样做, 没有充分利用 MG-DS-CDMA 系统各个用户对各子载波均有信道估计的优势, 使得检测效果受到了局限. 在本文中, 提出了一种在子载波合并之前进行处理的低复杂度部分并行干扰对消 (Low complexity partial parallel interference cancellation, 简称 LG-PPIC) 算法, 该算法充分利用信

道估计的结果,通过减少进行干扰对消处理的用户数,有效降低了运算复杂度,在获得更优的检测结果的同时降低了复杂度,以较小的代价获得了较好的检测效果.通过仿真比较可以看出在衰落信道下,LG-PPIC 算法获得了比其他干扰对消(IC)算法^[4,5]更优越的系统性能.

本文结构如下:第二章介绍 MG DS-CDMA 系统模型;第三章中给出 LG-PPIC 接收机的结构,并对其进行分析;第四章是仿真比较结果;结论在最后一章给出.

2 系统模型

本文研究的是 MG DS-CDMA 的上行传输.假设系统中各个用户的子载波总数为 NC , 每个用户同时发送的比特数,即子载波组的数目为 M , 每个子载波组中的载波数为 $Q = NC/M$. 扩频码长为 N , 用户数为 K . 并假设信道估计和频偏校正都是理想的.

在发送端,用户数据先进行串/并转换,形成 M 个并行数据流,分别分配给 M 个子载波组;在各个组内,将每个数据在 Q 个子载波上进行复制与扩频处理.经过上述处理后,形成了 N 个并行数据流.将其送入 IFFT 变换器,再经过调制后最后由射频输出.该系统的发送机的具体实现框图如图 1 所示.

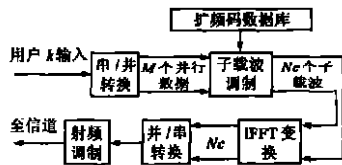


图 1 MC-DS-CDMA 发送端实现原理

对于第 k 个用户而言,其发送的等效基带信号为:

$$S_k(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{q=1}^Q A_{kd,m,q}(t) g_k(t) \exp(j2\pi f_q^m t) \quad (1)$$

k 表示用户编号, A_k 为用户 k 的发送信号幅度, $d_{k,m}(t)$ 为子载波组 m 发送的信息比特, $g_k(t)$ 为其扩频码, f_q^m 表示子载波组 m 的第 q 个子载波的频率.

各个用户的发送信号送入无线信道,各自经历不同的衰落.接收机的等效基带信号为:

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{q=1}^Q A_{kd,m,q}(t) d_{k,m}(t) g_k(t) \exp(j2\pi f_q^m t) + n(t) \quad (2)$$

$a_{k,m,q}(t)$ 为复数,表示第 k 个用户的第 m 组的第 q 个子载波的衰落系数, $n(t)$ 为加性高斯白噪声(AWGN),其单边功率谱密度为 N_0 .

3 LC-PPIC 接收机模型

为了有效抑制 MAI,本文提出了在各个子载波上进行 LG-PPIC 处理后再进行最大比合并的接收机模型.含有 LG-PPIC 处理

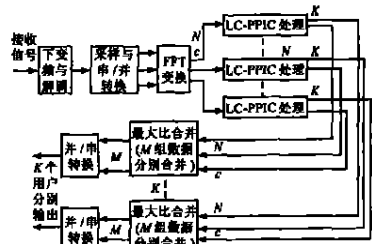


图 2 应用 LC-PPIC 算法的 MC-DS-CDMA 接收机实现原理

单元的接收机如图 2 所示.一般情况下,接收机消除 MAI 的处理是在最大比合并器之后.然而,这样不能充分利用每个用户的信道估计结果.与之相反,LG-PPIC 接收机是在各个子载波上,而不是载波合并之后对接收信号进行处理.这样,不仅可以充分利用信道估计的结果,还可以降低 PPIC 处理复杂度,同时获得了较大的性能增益.LG-PPIC 处理单元的框图如图 3 所示.

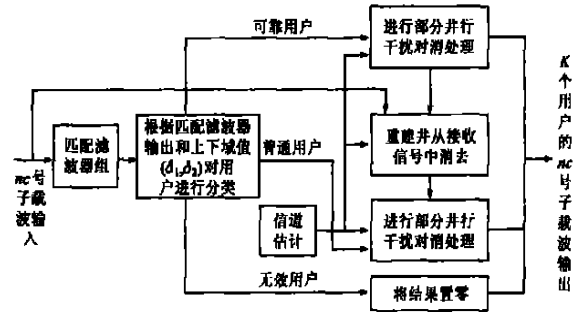


图 3 LC-PPIC 算法原理

对于第 nc 个子载波(注意,该子载波还是属于第 m 个子载波组的第 q 个子载波,这是对子载波的不同描述方式)而言,接收信号首先经过一个扩频码匹配滤波器组,其输出作为并行干扰对消(PPIC)处理的初始信号,同时也作为用户分组时的判别依据,即在本算法中,不以信道估计而是以匹配滤波器组输出作为分组依据.

$$y_k^{nc} = \frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} r^{nc}(t) g_k(t) dt \quad (3)$$

其中, $r^{nc}(t)$ 是子载波 nc 上的接收信号, $g_k(t)$ 为用户 k 的扩频码, T_b 是用户信号比特的码元周期,在单速率系统中各个用户是完全相同的.

然后根据各个用户在该子载波上的信道估计结果,和判决域值 δ_1 和 δ_2 将用户分为 3 类.当用户满足式(4)时,用户划分为可靠用户;满足式(5)的用户划分为无效用户;剩余用户为普通用户:

$$P_k^{nc} \geq \delta_1 P_{s,nc} \quad (4)$$

$$P_k^{nc} \leq \delta_2 P_{s,nc} \quad (5)$$

其中 P_k^{nc} 表示第 k 个用户的在该载波上的接收信号功率,用该用户的匹配滤波器的输出的平方表示,即 $P_k^{nc} = |y_k^{nc}|^2$; $P_{s,nc}$ 表示单一载波的发送功率,各个用户完全相同.

用户分类结束后,对可靠用户组的用户进行部分并行干扰处理,得到可靠用户组的发送比特矢量 b_r^{nc} ;并根据判决结果,信道幅度估计结果及其扩频码来重建该组用户接收信号,并从接收信号中消去该重建信号,得到新的接收信号:

$$r_o^{nc}(t) = r^{nc}(t) - S A_r^T b_r^{nc} \quad (6)$$

其中 $r_o^{nc}(t)$ 是子载波 nc 上新的接收信号, S_r 是可靠用户扩频码组成的矩阵, A_r^T 是子载波 nc 上可靠用户幅度估计值组成的对角阵,由已知的信道估计方法获得.

根据新的接收信号 $r_o^{nc}(t)$ 对普通用户组用户进行部分并行干扰对消处理,得到子载波 nc 上普通用户组判决结果 b_o^{nc} .

最后将无效用户组各用户在子载波 nc 上的判决结果 b_u^{nc}

设为 0. 并将该子载波上的输出 $\{b_r^{nc}, b_o^{nc}, b_a^{nc}\}$ 按照所对应的用户发送出去; 各个用户再根据 nc 所属组别, 将其分到相应的最大比合并器的输入端, 对所有的子载波输出结果进行合并, 得到最终判决结果.

可以看出, δ_1 和 δ_2 对 LG-PPIC 接收机的性能影响较大. 如果 δ_1 过高会使得普通用户之间的功率差异增大, 影响 PPIC 的处理效果; 而其过低, 一些功率居中的用户不能考虑低功率用户的 MAI 影响, 降低了系统性能. 同样, 如果 δ_2 过高, 会使得用户的有效分集数目过少, 不能充分利用接收结果; 而其过低, 又会造成 PPIC 处理的用户数增加, 提高了复杂度. 假设各个子载波上的衰落都是慢的非频率选择性衰落, 衰落参数选择瑞利模型且平均能量为 1, 即对于任意用户 k 的任意子载波组 m 内的任何一个子载波 q , 幅度衰落因子 $a_{q,k}^m$ 的概率分布均满足:

$$p(a_{q,k}^m) = 2a_{q,k}^m \exp(- (a_{q,k}^m)^2) \quad (7)$$

由于功率越接近 PPIC 的处理效果越好, 因此选择可靠和普通用户分组界限的时候, 应以使两组用户的功率都尽量接近为目的. 按照这一原则, 选取衰落函数的中值点作为可靠用户和普通用户的分界点, 即:

$$\int_0^{\sqrt{\delta_1}} 2a_{q,k}^m \exp(- (a_{q,k}^m)^2) da_{q,k}^m = \sum_{\sqrt{\delta_1}}^{\infty} 2a_{q,k}^m \exp(- (a_{q,k}^m)^2) da_{q,k}^m = 0.5 \quad (8)$$

由上式得到 $\delta_1 = 0.7$.

普通用户和无效用户的划分是在处理复杂度和噪声平台提高之间取一个折衷, 本文选择放弃接收功率最小的 5% 的用户. 此时, 所有用户的所有分集都被设为无效的概率为 20^{-Q} , 当 $Q \geq 4$ 时, 由于所有分集均被放弃而产生的判决误码率为 10^{-6} 量级, 不会对误码率的增加产生很大影响. 恰恰相反, 由于放弃了部分功率过低的用户, 会从整体上提高检测性能. 在此情况下, δ_2 的取值受到下式的约束:

$$\int_0^{\sqrt{\delta_2}} 2a_{q,k}^m \exp(- (a_{q,k}^m)^2) da_{q,k}^m = 0.05 \quad (9)$$

由上式得到 $\delta_2 = 0.05$.

4 仿真分析

本文将从误码率和复杂度两个角度分析 LG-PPIC 的性能. 首先与在 MRC 之前和之后的 PPIC^[1,5] 以及传统检测器的误码性能进行比较, 然后与 MRC 之前的 PPIC 进行复杂度比较.

4.1 误码率性能分析

仿真的基本条件是: 子载波数目 $N = 128$, 调制模式为 BP-SK, 扩频比为 32, 采用伪随机(PN)码, 并假设用户在各个子载波上的信道估计都是理想的. 用户发送并行数据时, 采用等间隔交织的方法. 假设每个子载波上的衰落选择瑞利模型且能量为 1.

本文中的平均信噪比均指比特平均信噪比. 图 4 所示为用户数为 25, 并发数据为 32 个的情况. 其中 PPIC(A) 和 PPIC(B) 分别表示在 MRC 前和后进行 PPIC 处理, 从图中可以看

出, 由于没有考虑 MAI 的因素, 传统检测器的效果很差; 而无论 PPIC(B) 还是 LG-PPIC 的误码率(BER)性能都明显优于 PPIC(A) (差距在一个数量级以上). 这是由于前两种方法都是在子载波上对用户进行处理的, 可以充分利用各个用户的信道估计结果, 所以可以实现较好的误码率性能; 而后者是在载波合并后进行处理的, 无法充分利用用户对不同子载波信道估计结果. 值得注意的是, 在此情况下, LG-PPIC 的性能也明显优于 PPIC(B), 有 12dB 以上的增益. 而且由于进行并行干扰对消处理的用户数更多, 后者的复杂度还要高于前者. LG-PPIC 算法将用户按照功率分类, 不仅可以减少进行并行干扰对消处理的用户数, 还可以改进处理效果; 由于各个子载波的衰落是相互独立的, 在一个子载波上被放弃的无效用户, 可以通过其他子载波来获得有效检测, 因此 LG-PPIC 算法以更低的复杂度获得了更优的检测效果.

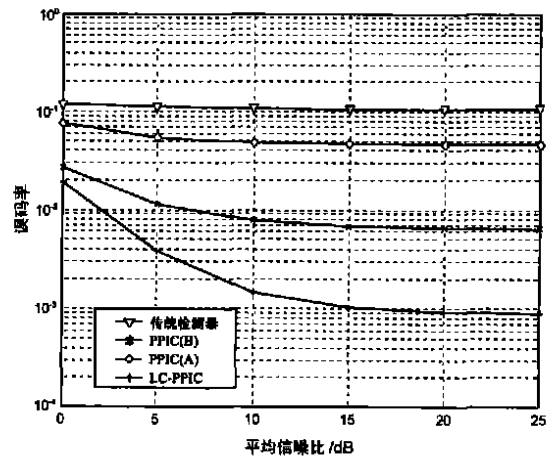


图 4 用户数 $K = 25$, 并行传输数据 $M = 32$ 时的误码性能比较

图 5 所示为用户数为 15, 并发数据为 16 个的情况, 此时的系统负担只有前述系统的 30%. 由于系统负担较轻, 因此各个检测器的误码性能较前述系统均有明显改善, 但是 LG-PPIC 和 PPIC(B) 的性能还是明显优于 PPIC(A). 但是, LG-PPIC 对 PPIC(B) 的优势不再明显, 特别是在信噪比较低的情况下. 这是由于在系统负担较轻, 特别是信噪比较低的情况下, 影响系统性能的主要因素是噪声而不是 MAI; 而 LG-PPIC 将接收功率过低的用户视为无效, 提高了系统的噪声平台, 因此在噪声占主导地位的情况下, 误码率性能与 PPIC(B) 接近. 然而, 从图 5 中可以看出随着系统信噪比的提高, LG-PPIC 的性能优势逐步增大.

4.2 复杂度分析

本文对 PPIC(B) 与 LG-PPIC 的复杂度进行比较, 因为二者都是在每个载波上进行处理的, 因此只需比较单个载波上的复杂度. 按照文[6]中复杂度的定义方法, 将复杂度定义为加法和乘法的次数的总和, 而一些复杂的运算则等效为多次加法和乘法. 根据文[5]中 PPIC 的实现结构, PPIC 的复杂度为:

$$C_{PPIC} = K[(8N + 4 + KN)S + 2N + 1] \quad (5)$$

其中 S 为 PPIC 处理的级数, 本文为 3.

对于 LG-PPIC 而言, 假设可靠用户数为 K_r , 普通用户数为

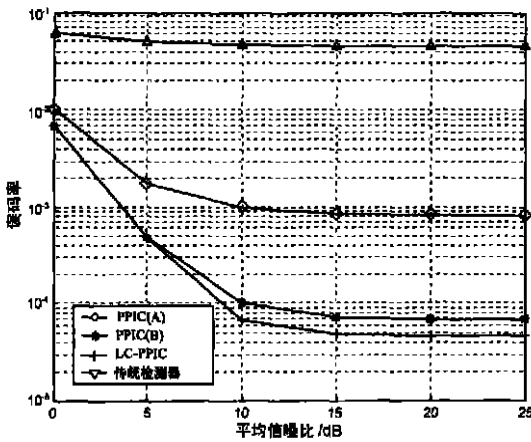


图5 用户数 $K=15$, 并行传输数据 $M=16$ 时的误码性能比较

K_o , 其复杂度可表示为:

$$C_{LC-PPIC} = K_r[(8N+4+K_rN)S+2N+1] + K_o[(8N+4+K_oN)S+2N+1] + K_rN+1 \quad (6)$$

由于 K_r 和 K_o 是随信道而变的, 因此 LG-PPIC 的复杂度是非确定的. 但值得注意的是 $K_r + K_o \leq K$, 因此其最大值满足:

$$\text{MAX}\{C_{LG-PPIC}\} < \text{MAX}\{(K_r + K_o)[(8N+4+(K_r + K_o)N) + 2N+1]\} \leq C_{PPIC} \quad (7)$$

即 LG-PPIC 的复杂度总是比 PPIC 要低. 如前所述, 每个子载波上瑞利衰落的平均能量为 1, 则 LG-PPIC 复杂度的均值为:

$$E\{C_{LC-PPIC}\} = Ke^{-\delta_2}[(9N+4)S+2N+1] + K(K-1) \cdot (e^{-2\delta_2} + 2e^{-2\delta_1} - 2e^{-\delta_1}e^{-\delta_2})NS + Ke^{-\delta_1}N+1 \quad (8)$$

δ_1 和 δ_2 为重要的系统参数, 本文中取 1 和 0.1. 对于本文中分析的用户数为 25 和 15 的两个系统, LG-PPIC 的平均复杂度较 PPIC 分别降低 44.55% 和 37.06%, 表现出了明显的优势. 同误码率性能相同, 复杂度优势的变化趋势也是随用户数增多而增加的. 因此, LG-PPIC 是很适用于高负载系统的.

5 结论

本文提出了一种全新的适用于 MG-DS-CDMA 上行信道的 LG-PPIC 算法, 并对算法的结构与性能进行了深入地分析. 该算法的核心思想是在子载波上对用户进行分组部分并行干扰抵消处理. 在各个子载波上将用户分为可靠、普通和无效三类, 处理并消去可靠用户后, 再对普通用户进行处理, 并放弃

无效用户, 最后将各个子载波上的结果通过 MRC 输出. 本文在两种不同系统负荷的情况下, 对 LG-PPIC 算法与置于 MRC 前后的两种 PPIC 算法进行仿真比较, 结果显示 LG-PPIC 算法的误码率性能远远优于置于 MRC 后的 PPIC 算法. 与置于 MRC 之前的 PPIC 算法相比较, LG-PPIC 不仅复杂度降低了 40%, 而且误码率性能提高了 12dB. 因此, LG-PPIC 是很适合于 MG-DS-CDMA 的多用户检测算法.

参考文献:

- [1] S Hara, R Prasad. Overview of multicarrier CDMA [J]. IEEE Comm Magazine, 1997, 35(12): 126-133.
- [2] N Yee, J Limartz, G Fettweis. Multi carrier CDMA in indoor wireless networks [A]. Proc of PIMRC' 93 [C]. Yokohama, Japan: PIMRC, 1993. 109-113.
- [3] S Kondo, L Milstein. Performance of multicarrier DS-SS-SSMA systems [J]. IEEE Trans on Comm, 1996, 44(2): 238-246.
- [4] A L Johansson, A Svensson. Successive interference cancellation in multiple data rate DS-SS-SSMA systems [A]. Proc IEEE VTC [C]. Chicago, USA: IEEE, 1995. II, 704-708.
- [5] D Divsalar, M Simon, D Raphaeli. Improved parallel interference cancellation for CDMA [J]. IEEE Trans on Comm, 1998, 46(2): 258-268.
- [6] R M Buehrer, N S Correa Mendoza, B D Woerner. A simulation comparison of multiuser receivers for cellular CDMA [J]. IEEE Trans on Vehicle, 2000, 49(4): 1065-1085.

作者简介:

王明曙 女, 1975 年 6 月生于河北衡水, 于 2004 年 1 月清华大学电子工程系信息与通信工程专业博士毕业, 博士期间, 师从周祖成教授和陆建华教授, 现在都科摩(北京)通信技术研究中心有限公司工作, 主要从事面向未来的无线通信系统中的传输技术的研究. E-mail: wms@wmc. ee. tsinghua. edu. cn.



陆建华 男, 1963 年 7 月生于江苏南通, 清华大学电子工程系教授、博士生导师, 研究领域包括宽带无线通信、多媒体信号处理等, 发表学术论文 100 余篇, IEEE 通信学会及信号处理学会会员.