

文章编号:1000-582X(2002)02-0083-05

## 一种多载波 CDMA 的子信道分配策略\*

聂永萍<sup>1</sup>,何先刚<sup>1</sup>,张中培<sup>2</sup>

(1. 重庆邮电学院,重庆 400065; 2. 电子科技大学,成都 610054)

**摘要:**为了获得高速、高质量的无线数据通信,增强多载波 CDMA 抗多址干扰和信道衰落能力,提出了一种子载波分配与功率分配相结合的信道分配策略。根据不同子载波上衰落幅度的不同,选择性地传输信息,对于衰落幅度较大的子载波不分配信号能量,将其信号能量分配到传输信号子载波上,能有效地减小多址干扰,同时又能获得较大的分集增益。这种基于子载波衰落幅度的分配策略与其它文献报道方案比较,具有较低的计算量与较好的收敛性,是一种工程可实现性方案。

**关键词:**多载波 CDMA; 自适应子信道分配; 功率分配

**中图分类号:** TN 929.5

**文献标识码:** A

为了适应未来高速数据和各种多媒体无线通信的需要,多载波(MC)传输方案与 CDMA 技术结合能在频谱效率、频率分集、低速并行数据处理和抗干扰等方面获得较大好处,特别是正交频分能通过快速傅立叶变换实现,使多载波 CDMA 技术受到广泛关注,并作为新一代移动通信系统的扩频候选方案<sup>[1,2]</sup>。目前提出的多载波技术分为正交频分(OFDM)CDMA 和窄带 DS-CDMA(MC-DS-CDMA)两种。窄带多载波是在频域上进行并行传输,在移动通信系统中,由于上行信道具有异步延迟和多谱勒频域扩展,使得基站接收端的频率正交性受到破坏,因此,MC-DS-CDMA 方案特别适用于上行信道。笔者基于这种方案,分析了其子载波分配策略。对于多载波接收结构,各子载波常采用等增益合并(EGC)、最大比合并(MRC)、最小均方误差(MMSE)等技术利用各子载波信息。当子载波衰落幅度或干扰较大时,会影响整个系统性能,因此,选择性地对子载波信号传输与合并,能有效提高系统增益。在文献[3]中首先提出实现子载波分配的基本方法,它根据信息论原理,将多址干扰、高斯干扰和衰落幅度三者联合进行优化,使得整个系统的误码率最低,但需要较大的计算量;对于多址干扰,采取了简化算法,优化的前提是每一子信道传输不同的信息与信息速率。而

普通的多载波与每一子载波传输的数据是相同的。在文献[4]中,提出了一种基于子载波衰落幅度的简化子载波分配算法,针对下行同步信道,每一用户只选用衰落幅度最小的一个子载波,这种方法虽然降低了用户间的多址干扰,但每户只用一个子载波传输数据,失去了多载波频率分集增益,子载波利用率太低,当用户数较多,或某一子信道对许多用户的衰落都较小时,会出现较大的干扰。在文献[5]中,提出基于拉格朗日算法的子载波优化及载波功率分配方法,得出了当用户数小于子载波数,每一用户选一个子载波传输数据是优化方法,当用户数大于子载波数时,选取两个或多个子载波传输数据。但这种算法只给出高斯信道下优化结果,对于衰落信道下优化解没有得到,同时,这种算法使用了矩阵求逆运算,当信道衰落幅度较大时,存在算法不收敛的问题。因此,关于多载波子信道分配的优化算法求解是一个非常困难的问题。笔者根据这些已有结果,提出了一种计算量小,收敛性好的一种次优算法,它取得了在性能与计算复杂度之间的一种较好折衷,是一种工程可实现方案,利用笔者提出的迭代算法,通过对子载波的选取和功率分配,能达到给定的通信质量要求。

\* 收稿日期:2001-09-24

基金项目:国家自然科学基金(69831030)和重庆邮电学院科研基金项目(A2001-33)。

作者简介:聂永萍(1972-),女,重庆市人,重庆邮电学院讲师,在职硕士生。主要从事计算机通信研究。

## 1 系统模型

本文的系统按文献[2]给定的 MC-DS-CDMA 方案,接收结构按传统的最大比合并(MRC)方式,整个系统带宽  $W_T$  划分为  $M$  个等带宽的子信道,  $W_s = W_T/M$ , 相同的窄带 DS 波形通过  $M$  个子载波并行传输。在基站接收端,用户通过标识序列进行识别,这种传输方案子载波间没有正交关系,在基站接收端通过带通滤波器区分出各子载波,为了避免载波间干扰,载波划分上要保证子载波带宽不重叠。码片波形  $p(t)$  的频率响应被限制在  $W_s$  的带宽内,且信道的频响  $H(f)$  满足 Nyquist 准则,  $H(f) = |P(f)|^2$ , 满足条件:

$$\int_{-W_s/2}^{W_s/2} H(f) df = 1 \quad (1)$$

对于传输信道,假设为频率选择性瑞利衰落信道,通过选择  $M$ ,使多载波子带衰落是无选择性的,且相邻子载波的衰落是相互独立的,设信道的最大延迟为  $T_m$ ,扩频码片周期为  $T_c$ ,码片成形波的滚降因子为  $\alpha$ ,则  $M$  满足:

$$\frac{T_m}{T_c} \leq M \leq (1 + \alpha) \frac{T}{T_c} \quad (2)$$

那么从  $k$ th 移动用户的  $m$ th 子载波到基站信道的复低通冲激响应可表示为:

$$h_{k,m}(t) = \alpha_{k,m} e^{j\phi_{k,m}} \delta(t) \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

$\alpha_{k,m}$  为衰落幅度,它遵从独立均匀分布的瑞利衰落随机变量,  $\phi_{k,m}$  为子载波的随机相位,为  $(0, 2\pi)$  的均匀分布。为了计算方便,对接收器去掉载波,经采样后的信号用矩阵形式表示,第  $m$  个载波上接收信号为:

$$r_m = \sum_{k=1}^K A_{k,m} \alpha_{k,m} c_k b_k + z_m, m = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

其中:扩频码  $C = [c_1, \dots, c_K]$ , 数据  $b = [b_1, \dots, b_K]^T$ , 信号幅度:  $A_m = \text{diag}(A_{1,m}, \dots, A_{K,m})$ , 信道衰落幅度:  $\alpha_m = \text{diag}(\alpha_{1,m}, \dots, \alpha_{K,m})$ , 则式(4)可表示为:

$$r_m = CA_m \alpha_m b + z_m, m = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

用户  $k$  的  $M$  个载波的解扩数据:  $y_k = [y_{k,1}, \dots, y_{k,M}]^T$ ,  $d_{k,m} = A_{k,m} \alpha_{k,m}$ ,  $d_k = [d_{k,1}, \dots, d_{k,M}]^T$ , 最大比合并系数设为:  $w_k = [d_{k,1}, \dots, d_{k,M}]^T$ , 那么最大比合并后的信号为  $x_k = w_k^H y_k$ , 扩频码的自相关系数为  $\gamma = C^T C = [\gamma_{k,i}] = [\gamma_1, \dots, \gamma_K]$ , 那么解扩后第  $m$  载波上的信号:

$$y_{k,m} = c_k^T r_m = c_k^T CA_m \alpha_m b + c_k^T z_m =$$

$$\sum_{l=1}^K A_{l,m} \alpha_{l,m} \gamma_{k,l} b_l + z_{k,m} = \sum_{l=1}^K d_{l,m} \gamma_{k,l} b_l + z_{k,m} \quad (6)$$

$$y_k = \sum_{l=1}^K d_l \gamma_{k,l} b_l + z \quad (7)$$

经最大比合并后的信号为  $x$ , 其表示式为:

$$x_k = \sum_{m=1}^M d_{k,m}^* d_{k,m} \gamma_{k,k} b_k + \sum_{l=1}^K w_k^H d_l \gamma_{k,l} b_l + w_k^H z \quad (8)$$

$$E[x_k] = \sum_{m=1}^M d_{k,m}^* d_{k,m} \gamma_{k,k} = d_k^H = d_k^H d_k \gamma_{k,k} \quad (9)$$

$$\text{var}[x_k] = \sigma^2 d_k^H d_k + \sum_{l=1}^K \gamma_{k,l}^2 d_k^H d_l d_l^H d_k \quad (10)$$

$$R_{S,1} = \frac{d_k^H d_k d_k^H d_k \gamma_{k,k}^2}{\sigma^2 d_k^H d_k + \sum_{l=1}^K \gamma_{k,l}^2 d_k^H d_l d_l^H d_k} \quad (11)$$

通过取式(8)进行硬判决,即可得到发送端经 BPSK 调制后数据,经解调得到信息数据。

## 2 子载波分配策略

在多载波 CDMA 系统中,主要影响系统性能的是信道衰落、多址干扰和信道高斯噪声三部分,在传统的传输结构中,每一子载波传输信息是均等的,每一子载波上的多址干扰用户数是相等的。在文献[4]中,已分析了在载波数  $M$  与码片长度  $N$  之积相等的情况下,随子载波数的增加,系统性能提高,误码率随之降低。但随用户数增加,多址干扰增强,系统的整体性能下降较快。单载波分配方案[4]利用衰落最小的子载波传数据,同时保持载波数与扩频码长度之积为常数,对每一用户选择一个子载波传输时,采用的扩频增益较大,占用的频带与标准传输方式[2]相同,在传输时需要从  $M$  个子载波中选出一个载波,这种方案实际占用了  $M$  倍标准传输方式带宽,系统增益的取得是以频带增加为代价。在实际系统中,子载波优化应该是在相同的带宽下考虑,基于拉格朗日优化算法,用户数小于载波数时,优化方案就是选取一个衰落小的子载波,变为频分多址(FDMA)方式,当用户数较多时,选取多个载波。最优化方案应该是不同用户选取的子载波数不同,每一用户各子载波的发送功率不同,而多载波方案的子载波数较多,因此,从工程实现的角度,这种优化方案的实现是困难的。本文采用各用户子载波数相同的方法,且每个用户的各子载波为等功率发送,减小实现控制上的难度。带子信道选择的发送与接收机结构如图 1、图 2 所示,本文所采用的多载波 CDMA 按文献[2]提出

的系统结构。首选发送机将导频信号复制在所有子载波上进行传输,接收机通过导频信号对所有用户的所有信道的参数特征进行估计,在接收机内按一定通信服务质量要求,完成子载波选取和功率分配,将分配的子载波与功率信息通过子载波选择信号发送回发送机端,发送机按接收信息进行子载波分配与功率分配进行数据传输。当然,此处假设信道参数的变化较为缓慢,在一帧数据的传输时间内,信道参数不变。

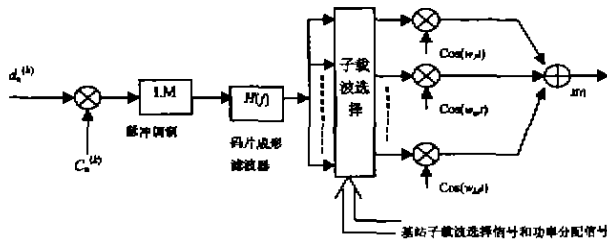


图 1 带子信道选择的发送机结构

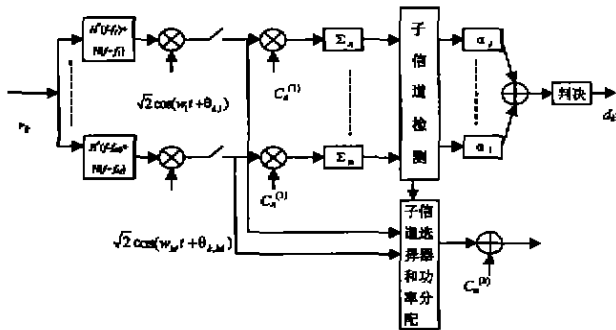


图 2 带子信道选择的接收机结构

载波选取与功率分配相结合的子信道分配策略如下<sup>[6]</sup>：

首先选取衰落幅度较小的子载波,选用子载波数为总数的一半,通过一定次数功率增减迭代运算,使系统达到给定通信服务质量要求;若达到迭代次数后,还未达到设定信噪比,将选择的子载波中衰落幅度较大的子载波再删除一半,再进行功率增减迭代;若还不能达到设定信噪比要求,增加迭代次数与功率增减梯度,最后选用子载波数不低于 2。

此处进行有限次迭代是为了减小功率分配中的计算时延,因为信道质量较差时,为了达到设定信噪比,可能需要较大的迭代次数。选取一半数量衰落幅度较小的子载波,是由于用户间子载波的衰落是随机的,不同用户子载波的选取是随机的,在基站或移动台接收端,某一子载波上的用户数分布是随机的,能有效降低

多用户干扰。这种选取方案能在分集增益与多址干扰降低上取一较好折衷。在图 3,针对用户数为 10,扩频码为 GOLD,子载波的扩频增益相同,均为 31,载波数的选取是保证发送端总的发送功率相同的情况下,从  $M = 8$  的子载波中选取 1 至 8 个,从图中可以看出,由于用户数大于载波数,因此,  $M = 1$  和  $M = 8$  时,性能都不是最好的。 $M = 2$  在高信噪比下性能较好,但同时考虑发送功率与信号噪声比( $E_b/N_0$ )较大或较小,  $M = 4$  的误码率曲线最好。同时,对  $M = 16$  和 32 的情况也作了仿真,得出了同样结论。

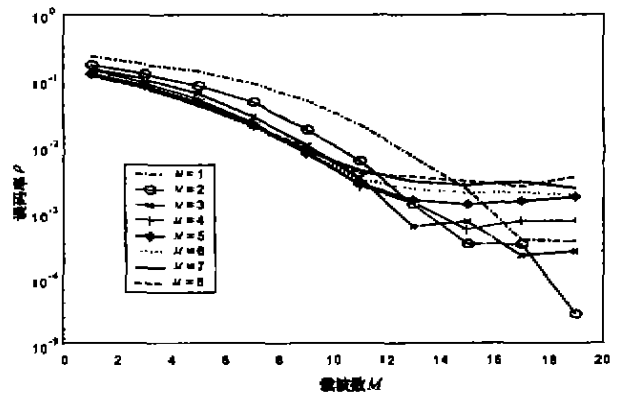


图 3 各种子载波数选取的误码率曲线

在按上述方案选取子载波后,子载波的能量按平均能量分配,由于对衰落幅度较大的子信道已经删除,剩余子载波的幅度相差不会太大,平均方案能有效降低功率分配复杂度。在选取一半子载波后,由于将另一半的传输功率加到这一半中来,能有效提高系统信噪比。对于删除子载波,幅度设为零,与未删除时一样进行最大比合并,这样可以利用标准多载波的最大比合并接收机结构。由于信道噪声与多址干扰的影响,当系统性能达不到通信质量要求时,可以增加发送功率,其算法如下。

设发送导频信号时的每一子载波上功率为  $P_0$ ,选用子载波总数为  $M_c$ ,每次增加功率为  $\Delta P$ ,迭代梯度为  $u$ ,设定用户信噪比为  $r_k$ ,信道的信噪比按式(11)计算,每次迭代增加功率为:

$$\Delta P_{(k)} = (r_k - R_{S,1}) * u * \Delta P / M_c \quad (12)$$

迭代计算过程:

- 1) 由导频信号估计信道参数,得到各用户的各子载波衰落幅度,选择经衰落后幅度较大一半子载波。
- 2) 将信号功率变为  $M/M_c * P_0$ ,幅度  $A$  为其功率

的平方根,得到向量  $d$ ,由式(11) 计算其信噪比。由式(12) 得其迭代功率。

3) 将信号功率变为  $M/M_c * P_0 + \Delta P$ ,幅度  $A$  为功率的平方根,得到向量  $d$ ,由式(11) 计算其信噪比。

4) 迭代次数是否达到设定值  $N_c$ ,若否,重复步骤 3;若是,信噪比是否达到  $r_k$ ,若是,迭代停止,得到功率分配与子载波分配;若否,重新设定  $M_c$ ,按倍率增加迭代次数,适量增加梯度值,重复步骤 3、4。

5) 迭代停止,得到子载波分配与功率分配。

由于每次迭代功率直接增加或减小,具有较快的收敛速度,经过一定数量的迭代后,能达到给定信噪比,若不能达到,经几次改变  $M_c$  后,就可达到,不能达到给定信噪比的概率较小。图 4 给出了在  $M = 8, K = 10, M_c = 4$ ,扩频增益为 31 时,信道信噪比达到 8 dB 时的收敛过程,图中 10 条曲线代表每一用户的收敛过程。可看出,本文的方案具有较快的收敛速度。

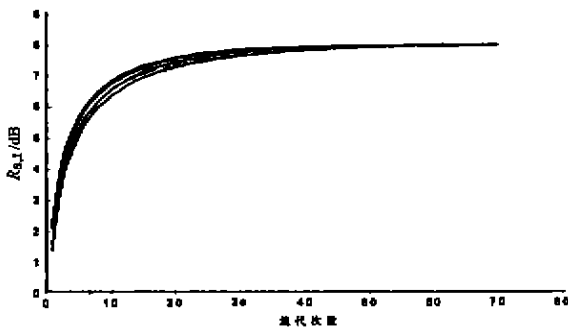


图 4  $K = 10$  用户的功率迭代过程

### 3 仿真与结论

为了验证本文的方案,对于不同载波数与不同用户数的发送端功率增加情况进行了仿真,并用相关系数较小的 GOLD 码作为扩频码表示同步接收情况,用相关系数较大的随机码表示异步接收,用发送总功率与信道高斯噪声比( $R_{S,N} = E_b/N_0$ ) 作为衡量标准,信道衰落按式(3) 描述的模型,高斯噪声方差  $\delta$  设为 1。在图 5,描述了要达到设定的信噪比 8 dB,采用第 3 部分的子信道分配与功率分配方法,不同的用户数在不同的扩频码下需要的  $R_{S,N}$  值,从图中可看出,由于 GOLD 互相关系数较低,随用户数的增加,功率增加较小,这种分配方案较好地减小了用户间多址干扰;利用随机码作扩频时,由于用户间干扰较大,需要增加较大的发送功率,随用户数的增加,功率增加较快。在设定

信道信噪比以后,系统的误码率到一定值。在图 6 中,表示了在规定误码率为  $10^{-3}$  时,子载波与功率分配需要增加一定功率;为了与分配前系统性能对比,将增加后的功率分配到普通 MC-DS-CDMA 所有子载波上,由图 6 可看出,采用全部子载波传送时,提高发送功率对系统性能改善较小,随用户数的增加,误码率进一步降低。同时,也可看出,为了提高多载波 CDMA 系统的性能,子载波与功率分配是提高系统性能的一条主要途径。

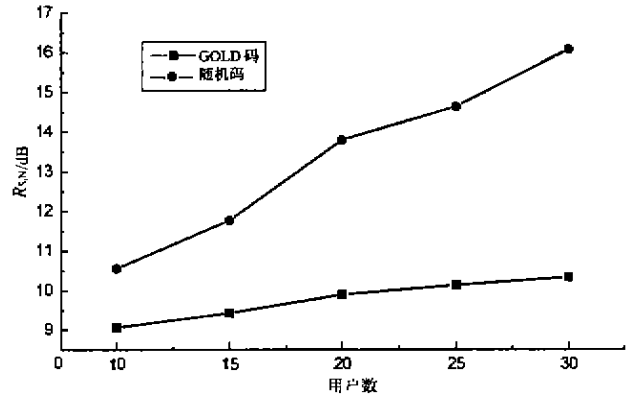


图 5 达到设定信噪比需要的发送功率

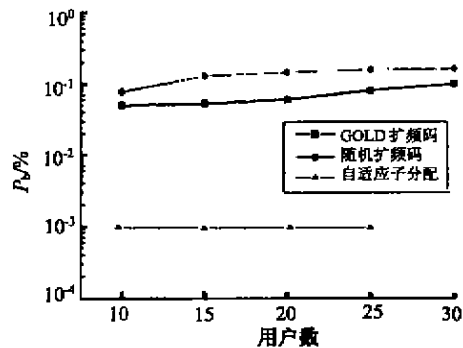


图 6 在相同发送功率下的误码率

本文提出了一种将子载波分配与功率分配相结合的子载波分配策略,它具有计算量小,收敛速度快,系统性能改善大、控制方式简单、便于工程实现等特点,通过仿真验证了本文的算法,对系统性能有较大改善,是一种可实用化方案。

### 参考文献:

[1] HARA S, PRASAD R. Overview of multicarrier CDMA [J]. IEEE Commun Mag, 1997, 126 - 133.

[2] KONDO S, MILSTEIN L B. Performance of multicarrier DS CDMA

- systems[J]. IEEE Trans On Commun, 1996,44(2):238-246.
- [3] QINGXIN C, ELVINO S S, SUBBARAYAN P. Multicarrier CDMA with adaptive frequency hopping for mobile radio systems[J]. IEEE J S A C, 1996,9(14): 1 852-1 858.
- [4] YUN HEE K, IICKHO S, SEOKHO Y, et al. A multicarrier CDMA system with adaptive subchannel allocation for forward links[J]. IEEE Trans On Vehicular Technology, 1999, 48(5): 1 428-1 436.
- [5] TAT M L, WONG F. Transmitter and receiver optimization in multicarrier CDMA systems [J]. IEEE Trans On Commun, 2000,48(7):1 197-1 207.
- [6] 薛强, 蒋笑冰, 吴伟陵. 衰落信道中基于 CMA 的自适应多用户检测算法[J]. 重庆邮电学院学报(自然科学版), 2001, 13(1):17-19.

## A Subchannel Allocation Policy of Multicarrier CDMA

NIE Yong-ping<sup>1</sup>, HE Xian-gang<sup>1</sup>, ZHANG Zhong-pe<sup>2</sup>

(1. Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. UEST of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** To attain high rate data and high quality of service in wireless communication, a subchannel allocation policy combined with subcarriers and power allocation is proposed. In the proposed system, instead of identical power over the subcarriers in parallel, each user's DS waveform is transmitted over the subchannels that have large fading amplitude among all the subchannels. The powers of the subcarriers with small fading amplitude are allocated to the subcarriers with large ones. It can effectively suppress multiple-access interference while obtaining diversity gains. The allocation policy based on fading amplitudes has the advantages of low computation and good convergence compared with the policy proposed in other papers. Thus, it is suitable for engineering.

**Key words:** MC-CDMA; adaptive channel allocation; power control

(责任编辑 张 苹)

### ·下期论文摘要预告·

## 含氮稀土耐热钢 H<sub>1</sub> 研制

蒋汉祥, 孙善长, 杨德鑫

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 用作高温还原反应罐的 H<sub>0</sub> 耐热钢(1Cr25Ni20)性能优良, 但生产成本高。笔者研制开发的含氮稀土 H<sub>1</sub> 耐热钢(3Cr25Ni8REN)具有镍低、性能优良的特点。H<sub>1</sub> 钢的高温抗氧化性能、高温持久强度和抗热疲劳性能均优于 H<sub>0</sub> 钢。可以长期在 1 200 ℃ 左右。高温下工作, 使用寿命为 H<sub>0</sub> 钢还原罐的 1.5 倍左右。H<sub>1</sub> 钢的生产成本仅为 H<sub>0</sub> 钢的 2/3 左右, 其经济效益十分显著。文中叙述了选择 H<sub>1</sub> 耐热钢化学成分的理论依据; H<sub>1</sub> 和 H<sub>0</sub> 耐热钢的冶炼工艺, 材料性能测试方法和测试数据, 并作了两种钢的性能比较, 结果表明 H<sub>1</sub> 钢完全可以替代 H<sub>0</sub> 钢用于制作还原生产 Mg、Ca 和 Ti 的还原罐。

**关键词:** 含氮稀土耐热钢; 熔炼工艺; 材料性能