

OFDMA 系统中保证 QoS 的资源分配研究

王军平, 景志宏, 李 阳, 李 睿

(空军工程大学 电信工程学院, 西安 710077)

摘要: 针对 OFDMA 系统的下行链路, 提出了一种面向不同业务的低复杂度资源分配算法。方案基于上行链路分配的思想, 先进行用户功率和子载波数的确定; 然后引入基于用户信道状态、速率要求和延时约束的优先级函数。在子载波的分配中, 根据优先级函数分配子载波以满足各类业务的具体要求。仿真结果表明, 该算法能够充分利用多用户分集增益, 在相同的通信服务质量条件下, 算法提高了系统性能, 降低了计算复杂度, 具有现实意义。

关键词: 无线资源分配; 正交频分多址; 优先级函数; 子载波及功率分配; 服务质量

中图分类号: TN914.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)01-0333-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.01.099

Research on providing QoS resource allocation algorithms of OFDMA systems

WANG Jun-ping, JING Zhi-hong, LI Yang, LI Rui

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: This paper proposed a low complexity resource management scheme for the downlink OFDMA systems. Based on the methodology of uplink design, first allocated the power constraints and sub-carriers. A priority function which was based on user's channel state and introduced data transmission rate constraint and delay constraint to satisfy different service for different users. Numerical results and analysis demonstrate that the proposed scheme can exploit multi-user diversity, the new algorithm has markedly improving of the system capacity and great complexity reduction under the same QoS condition. It has bright prospect in applications algorithm.

Key words: radio resource allocation; orthogonal frequency-division multiple access (OFDMA); priority function; sub-carrier and power constraints allocation; QoS

0 引言

随着数据业务特别是多媒体业务逐渐成为无线网络的主要承载对象, 如何满足用户不同类型业务的 QoS 需求相应成为下一代无线网络面临的重要问题。利用 OFDM 等高速传输技术, 结合适应于无线信道时变特性的、面向 QoS 的资源管理, 是解决上述问题的有效措施。OFDM 具有较高的频谱效率和对信道频率选择性衰落导致的 ISI 的对抗能力^[1], 而其多载波特性更为资源管理提供了较高的自由度。整个资源管理方案将以 MAC-PHY 跨层设计来实现, 跨层设计将有利于无线网络的性能优化^[2,3]。

以往对 OFDM 系统物理资源分配的研究已有很多^[4~11]。由于资源分配的各个部分(子载波、功率分配与 AM 等)紧密关联, 在用户 QoS 和总发送功率(或用户速率)等限制下, 最优分配将成为一个非常复杂的带约束优化问题。对此如采用全局优化方法^[4], 即使能够得到最优解, 也将面临难以实时实现的计算复杂度, 从而失去自适应的意义。因此, 研究者提出了多种次优的低复杂度算法, 并往往结合固定调制方式或平均功率分配等简化措施, 如文献[5~9]。然而这些方案在满足用户公平方面各有欠缺。文献[10]引入了用户速率的比例公平

约束, 能够达成较好的公平性, 有一定理论意义, 但由于没有考虑用户的实际业务需求, 无法支持视频、语音等有固定速率的、不同延时的 QoS 保证类业务。文献[11]解决了上述存在的问题, 但设计的算法复杂度较高, 不能很好地应用于实际系统。

本文针对目前的多用户情况, 提出了一种低复杂度资源分配方案。首先根据用户的速率要求确定用户的功率和子载波数; 然后构造基于用户信道状态、延时要求和功率约束的优先级函数, 通过已经确定的功率和子载波数进行具体的资源分配; 最后进行了仿真和性能评估, 对算法作出了验证, 具有实际的应用价值。

1 系统模型

设 OFDMA 系统有 K 个用户, N 个子载波, 系统总带宽为 B , 那么一个子载波的带宽为 B/N , 记为 B_n 。每个 OFDM 符号期间各用户待传输的比特速率为 $R_k (1, 2, \dots, K)$ 。发送端已知准确的信道估计值, 设某一资源分配周期(即算法执行周期, 等于整数个 OFDM 符号周期且小于无线信道的相干时间)内共有 M 个有业务需求的用户, 只有这些用户能够获得资源分配。对于任一用户 m , 在形成 OFDM 符号的 IFFT 步骤中, 在未分配给该用户的子载波所对应的点上补零。BS(基站)接收到

收稿日期: 2009-05-15; 修回日期: 2009-06-20

作者简介: 王军平(1981-), 男, 山西昔阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线资源管理(wjpwj1981@qq.com); 景志宏(1965-), 男, 河北邢台人, 副教授, 博士后, 主要研究方向为移动通信、宽带无线接入、目标识别; 李阳(1984-), 男, 山西阳泉人, 硕士研究生, 主要研究方向为通信与信息系统; 李睿(1981-), 男, 宁夏中宁人, 硕士研究生, 主要研究方向为通信与信息系统。

各个用户信号的叠加,然后进行 FFT 解调和各用户信号分离。设用户 m 要求的误码率上限(未编码情况下)为 $BER_m, |h_{m,n}|^2$ 为子载波 n 对用户 m 表现的实时信道增益。假设函数 $g_k(c)$ 表示用户 k 在一个子载波 n 上可靠接收 c 比特数据所需要的接收功率,并假设系统中使用的是 M-QAM 调制,则有

$$g_{k,n}(c) = (N_0/3) [Q^{-1}(BER/4)]^2 (2^c - 1) \quad (1)$$

其中 $Q(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ 。

系统模型中, M 个用户的业务需求分为三类: a) 用户为时延敏感类业务(如语音业务),并要求实现一个固定的速率 R_k ; b) 用户为速率敏感业务(如多媒体流业务),也要求实现一个固定的速率 R_m ,但对时延要求不大; c) 用户为尽力而为业务(如交互式业务),对时延和速率都没有要求,只需实现可変而尽量大的平均速率 \bar{R}_k 且保证用户之间的公平性。假设三类业务速率满足: $\bar{R}_k \leq R_k \leq R_m$ 。根据三种业务不同的业务特征^[12]和 3GPP 业务的延时要求^[13],可设置时延权值 Q 如下: 语音业务为 $Q=0.65$; 多媒体流业务为 $Q=0.25$; 交互式业务为 $Q=0.1$ 。其中

$$Q_k = \psi(D_k) = Q_{kT} / \sum_{k=1}^K Q_{kT}, Q_{kT} = D_{k,n} / \min D_{k,n} \quad (2)$$

根据用户各类约束的情况,引入优先级函数 $f(R_k, D_k, \bar{G}_k)$ 作为算法中子载波选择优先级的确定依据。其中: D_k 是用户 k 的时延约束条件; \bar{G}_k 是用户 k 全部带宽内的平均信道增益,该参数体现了大尺度衰落导致的各用户之间信道状态的差异,它可建模为复高斯随机过程。则优先级函数可构造为

$$f(R_k, D_k, \bar{G}_k) = \psi(D_k) R_k \bar{G}_k = Q_k R_k \bar{G}_k \quad (3)$$

关于这一函数的意义将在仿真分析中具体讨论。

2 资源分配方案

分配方案设计如下: 找到满足每个用户需求的最小资源数,然后分配剩余的资源给优先级最大的用户; 根据确定的资源数和优先级函数确定具体子载波分配; 最后进行单用户功率分配。

2.1 确定用户所需的子载波数和功率数

在 OFDMA 系统中,如果没有优先级函数 $f(R_k, D_k, \bar{G}_k)$ 限制,最优的分配办法就是将资源分配给信道增益最高的用户,但实际上则需要考虑多个因素。设 N_T, P_T 分别为实际分配给所有用户的子载波数和功率, N_S, P_S 分别表示系统总的子载波数和功率数,则有 $N_T = \sum_{k=1}^K N_k, P_T = \sum_{k=1}^K P_k$, 由于这两个量是相关的,为了确定它们的数量,假设它们是成比例的^[14],则需要满足 $N_T P_S / N_S \geq P_T$ 。当把一个子载波分配给了某个用户,为了满足速率需求,相应的功率也就分配给了这个用户。由前面分析可知每个用户的功率需求为

$$P_k = N_k / |h_k|^2 g(R_k / N_k) \quad (4)$$

结合式(1)可以看出,当分配给用户 k 的子载波数目增加时,它的功率需求则必然减小。根据优先级函数 $f(R_k, D_k, \bar{G}_k)$ 和速率限制 R_k ,结合文献[15]通过如下的计算步骤,可得到每个用户初始的子载波数和功率分配。设 OFDMA 系统中,所有子载波集合为 Ω ,则有

a) 初始化。令 $N_k = \lfloor R_k / c_{\max} \rfloor; k=1, 2, \dots, K$, 计算初始分

配的子载波总和为 $N_T = \sum_{k=1}^K N_k, \Omega = \Omega - N_T$ 。其中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 为取整函数,设 c_{\max} 为每个子载波平均所能携带的最大比特数。

b) 计算每个用户的功率需求及整个系统的功率需求:

$$P_k = N_k / |h_k|^2 g(R_k / N_k), P_T = \sum_{k=1}^K P_k。$$

c) 当 $P_T \geq N_T P_S / N_S$ 时

(a) 计算每个用户每次分配一个子载波 $l \in \Omega$ 所减小的功率 $\Delta P_{k,l} = N_k / |h_k|^2 g(R_k / N_k) - ((N_k + 1) / |h_k|^2) g(R_k / (N_k + 1)); k=1, 2, \dots, K$ 。

(b) 将 $\Delta P_{k,l}$ 由大到小排序,选择 $\Delta P_{k,l}$ 最大的用户 k 及子载波 l 。

(c) 给第 k 个用户分配一个子载波 $l, N_k = N_k + 1$ 。

(d) 重新计算用户 k 的功率及系统总功率和所分配的总子载波数: $P_k = P_k - \Delta P_{k,l}, P_T = P_T - \Delta P_{k,l}, N_T = N_T + 1$ 。

d) 当满足 $N_T P_S / N_S \geq P_T$ 时

(a) 若 $\Omega \neq \emptyset$, 将 $f(R_k, D_k, \bar{G}_k)$ 由大到小排序,将剩余子载波顺序分配给各个用户; (b) 若 $\Omega = \emptyset$, 计算各用户的功率和所分配的子载波数,算法结束。

本文假设这个算法始终是有解的,但也不排除没有合适的子载波和功率分配能够满足所有用户的速率需求的情况,将不得不去掉一些用户,这时依据优先级函数 $f(R_k, D_k, \bar{G}_k)$ 去掉排序最后的用户,然后再重新进行分配,直到满足要求。算法得到了每个用户的子载波和功率的划分 $N_1 \dots N_K$ 和 $P_1 \dots P_K$, 这两个结果可以应用到下一步具体子载波的分配中。

2.2 基于优先级函数的用户的子载波分配

在 OFDMA 通信系统中,设分配给用户 k 的子载波集合为 $\Omega_k, N_k = \|\Omega_k\|$ 为集合 Ω_k 的势(即是分配给用户 k 的子载波数量)。依据优先级函数 $f(R_k, D_k, \bar{G}_k)$ 确定算法中用户选择子载波的优先级,用户的优先级函数值较大,其优先权级较高。则用户的子载波分配算法描述如下:

a) 初始化。对 $k=1, 2, \dots, K$ 有 $\Omega_k = \emptyset, \Omega = \{1, 2, \dots, N\}, N_i = 0$ 。

b) 所有用户 k 按 $f(R_k, D_k, \bar{G}_k)$ 值由大到小排序,将其序号依次重新编为 $1 \sim K$ 。

c) 对 $k=1$

(a) 若 n 满足 $|h_{k,n}|^2 \geq |h_{k,j}|^2, \forall j \in \Omega$, 令 $\Omega_k = \Omega_k \cup \{n\}, N_i = N_i + 1, \Omega = \Omega - \{n\}$ 。

(b) 若 $N_i < N_k$, 回到(a); 否则令 $k=k+1$, 回到(a)。

d) 当 $k=K$ 且 $N_i = N_k$, 算法结束, $\{\Omega_k\}$ 即是得到的子载波分配结果。

该算法中的性能增益除了用户分集增益,还有优先级函数额外的性能增益,因为已经知道各用户需要的子载波数和功率,所以该分配过程算法复杂度很低,运算时间较小。

2.3 子载波功率分配和比特加载

在子载波分配算法中假定用户在得到的子载波上平均分配功率,而根据常识,子载波分配算法完成后,单用户的注水(water-filling)资源分配将得到最优的性能。根据文献[16, 17],可以得到用户 k 的注水水平(water filling level)为

$$\Delta_k = (1/N_k) (P_k + \sum_{n \in \Omega_k} (1/S_{k,n})) \quad (5)$$

其中: $S_{k,n} = |h_{k,n}|^2 / N_0 B_n, N_0$ 为 AWGN 的功率谱密度,用户 k

子载波的功率分配

$$p_{k,n} = (1/N_k)(\Delta_k - 1/S_{k,n})^+ \quad (6)$$

其中: $[x]^+$ 表示 0 与 x 中较大的一个数。

最后,各用户在各个子载波上实施比特加载(自适应调制):设 $c_{m,n}$ 为用户 m 在子载波 n 上所加载的比特数,由文献[18],有

$$c_{m,n} = \lfloor \log_2(1 - 1.5P_{m,n}S_{m,n}/\ln(5BER_m)) \rfloor \quad (7)$$

3 仿真与讨论

结合业务的 QoS,资源分配策略可用延迟和吞吐量等可度量的参数来描述。延迟,也称为时延(latency),指两个参照点之间发送和接收数据包的时间间隔。吞吐量为网络中发送数据的速率,可用平均速率或峰值速率表示。本文设计仿真并对经典的比例公平算法(PF 算法)、改进的 PF 算法(MTPF 算法)^[11]和本文的算法(BP 算法)的性能进行比较。本文假设三类业务的业务量比例为 2:1:1。仿真中采用瑞利衰落信道模型,时延为 1 μ s,系统的总功率 $P_S = 2$ dBw,系统带宽 $B = 4$ MHz,子载波数 $N_S = 512$,每个子载波最多只能传 4 bit 每符号,高斯白噪声的单边功率谱密度 N_0 设为 1,取所有 BER_m 值均为 10^{-3} 。

图 1 比较了总用户数为 40 时 A 类业务平均时延的 CDF 曲线。从各业务的曲线趋势可以看出,A 类业务的平均时延在 PF 算法延迟最大;而在 MTPF 算法和本文的 BP 算法中延迟较小,原因是在 PF 算法中,所有的业务统一调度而不考虑业务种类,使得 A 类业务和其他业务具有几乎相同的优先级。然而,在 MTPF 算法和 BP 调度算法中,A 类业务因优先级最高而被优先调度,所以 A 类业务得到了更多的满足,这显然是符合实际情况的。

图 2 比较了 MTPF 和 BP 算法中在不同用户数下的三类业务的平均吞吐量。可以看出,随着用户数的增加,AB 类业务在两种算法中拥有几乎相同的吞吐量,而 C 业务的吞吐量则随着用户数的增加而降低。原因如上所述,在 MTPF 和 BP 算法中,AB 类业务在调度开始时被优先调度,因此通过牺牲一些 C 类业务而保证 AB 类业务的吞吐量。此外,笔者发现 BP 算法复杂度更低,更具有实际意义。

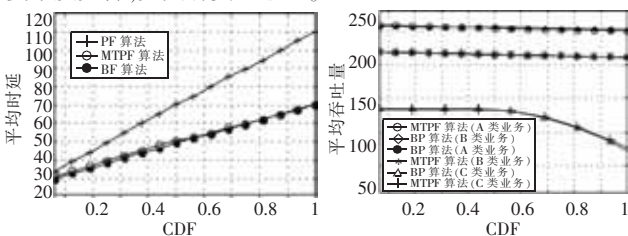


图 1 三种算法 A 类业务用户的平均时延

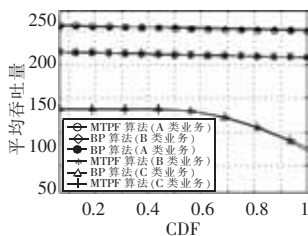


图 2 MTPF 和 BP 算法中三类业务的平均吞吐量

4 结束语

本文针对 OFDM 网络下行链路的特点,提出了一种支持不同业务、保证 QoS 的、有较低复杂度的实用资源分配方案,通过对用户进行资源数的确定,使得下行分配具备了和上行类似的条件;之后基于优先级函数的子载波分配,方便地对不同类型用户的需求提供了尽可能的满足。本方案提高了系统性

能,简化了算法复杂度,具有一定的研究参考价值。方案的设计思想和优先级函数的构造是本文的创新点,对今后的研究具有现实意义。

参考文献:

- [1] BINGHAM J A C. Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come[J]. IEEE Communications Magazine, 1990,28(4): 5-14.
- [2] SHAKKOTTAI S, RAPPAPORT T S, CARLSON P C. Cross-layer design for wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2003,41(10): 74-80.
- [3] BERRY R A, YEH E M. Cross-layer wireless resource allocation: fundamental performance limits for wireless fading channels[J]. IEEE Signal Processing Mag, 2004,21(5): 59-68.
- [4] WONG C Y, CHENG R S, LETAIEF K B, et al. Multi-user OFDM with adaptive sub carrier, bit, and power allocation[J]. IEEE J Select Areas Communications, 1999,17(8): 1747-1758.
- [5] WONG C Y, TSUI C Y, CHENG R S, et al. A real-time sub carrier allocation scheme for multiple access downlink OFDM transmission [C]//Proc of IEEE VTC '99. 1999: 1124-1128.
- [6] YIN H, HUI L. An efficient multi-user loading algorithm for OFDM-based broadband wireless systems [C]//Proc of IEEE GLOBECOM. 2000: 103-107.
- [7] RHEE W, CIOFFI J M. Increase in capacity of multi-user OFDM system using dynamic sub channel allocation [C]//Proc of IEEE VTC '00. [S. l.]: IEEE Press, 2000: 1085-1089.
- [8] JANG J, LEE K B. Transmit power adaptation for multi-user OFDM systems [J]. IEEE J Select Areas Communications, 2003, 21(11): 171-178.
- [9] KIVANC D, LI G, LIU H. Computationally efficient bandwidth allocation and power control for OFDMA [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2003, 2(6): 1150-1158.
- [10] SHEN Z, ANDREWS J G, EVANS B L. Adaptive resource allocation in multi-user OFDM systems with proportional rate constraints [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2005, 4(6): 2726 - 2737.
- [11] 李智伟,冯春燕. OFDMA 系统中联合资源分配算法研究[D]. 北京:北京邮电大学,2008.
- [12] IST-2000-25133ARROW-D03, Classification of advanced Packet switched services for third generation systems and services[S]. 2001: 24-25.
- [13] 3GPP2, S. ROO35, Quality of service stage 1 requirements[S]. 2002.
- [14] YIN H, LIN H. An efficient multi-user loading algorithm for OFDM-based broadband wireless systems [C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conf. 2000: 103-107.
- [15] 杨洁,寇卫东. OFDM 系统中动态资源分配算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2007.
- [16] KIM K, KIM H, HAN Y. Sub carrier and power allocation in OFDMA systems [C]//Proc of IEEE VTC 2004 Fall Los Angeles. Piscataway: IEEE Press, 2004: 1058-1062.
- [17] KIM K, KIM H, HN Y. Iterative and greedy resource allocation in an uplink OFDMA system [C]//Proc of IEEE PIMRC Barcelona, Spain Sep. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004: 2377-2381.
- [18] QIU X, CHAWLA K. On the performance of adaptive modulation in cellular systems [J]. IEEE Trans on Communications, 1999, 47(6): 884-895.