

OFDM系统多小区联合资源分配算法

曾志民, 郑洁莹, 张天魁

(北京邮电大学通信网络综合技术研究所 北京 海淀区 100876)

【摘要】提出了一种正交频分复用(OFDM)系统多小区间联合的自适应资源分配算法。为了降低系统复杂度,子信道分配和功率分配在不同的层次上分步执行,在小区内部采用改进的Max C/I算法进行动态子信道分配,并以此为基础利用禁忌搜索算法(TS)寻求多小区同频子信道发送功率的最优分配解。性能分析和仿真结果表明,与已有算法相比,该算法能够在满足用户的最小速率要求下充分利用无线频谱资源,提高系统吞吐量。

关键词 正交频分复用; 功率分配; 子信道分配; 禁忌搜索
中图分类号 TN929.5 **文献标识码** A

Multicell Joint Resource Allocation Algorithm in OFDM Systems

ZENG Zhi-min, ZHENG Jie-ying, and ZHANG Tian-kui

(Institute of Communication Networks Integrated Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications Haidian Beijing 100876)

Abstract A multicell joint adaptive resource allocation scheme is proposed for multicell orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems. In order to reduce the complexity of the system, subchannel allocation and power allocation are performed in different level separately. Subchannels are dynamically allocated in every cell using modified Max C/I algorithm, and then we use tabu search (TS) to find the optimal transmit power allocation on co-channel of multicell base on the results of subchannel allocation. Performance analysis and simulation results show that the proposed scheme can increase system throughput while guarantee the minimum rate request of all users.

Key words OFDM; power allocation; subchannel allocation; tabu search

正交频分复用技术利于实现自适应资源分配,充分提高频谱利用率^[1-2]。目前大部分OFDM系统自适应资源分配算法^[3-6]都只是考虑单小区内的无线资源分配问题,忽略小区间的同频干扰或是仅将其计算在信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)中。文献[7-8]通过非合作博弈方法进行多小区功率分配,但是没有考虑用户速率要求,无法提供最小速率保证。

本文提出了一种基于禁忌搜索(TS)的多小区OFDM自适应资源分配算法,在小区内部进行子信道分配,在小区间进行功率分配。在子信道分配的基础上,以满足用户最小速率要求为约束条件,以提高各小区同频子信道的总容量为目标,利用禁忌搜索算法求解多小区同频子信道发送功率的最优分配解。

1 系统模型

考虑一个由I个小区组成的多小区OFDM系统,

每个小区基站的最大发送总功率为 P_0 ,包含K个用户,其中小区i中的第k个用户所需要的最小数据速率为 $R_{\min}^{i,k}$ 。设系统带宽为 B_w ,分为N个连续的子信道,每个子信道的带宽为 $\bar{B} = B_w / N$ 。假设发射端可以准确获得所有用户的信道质量信息(channel quality information, CQI),即所有用户的所有子信道的瞬时信道增益在发射端都是已知的,用 $g_{ji,k,n}$ 表示在子信道n上从小区j的基站到小区i的第k个用户终端的信道增益, $p_{i,n}$ 表示小区i在子信道n上的发送功率, $\gamma_{i,k,n}$ 表示小区i中第k个用户在第n个子信道上的SINR,则:

$$\gamma_{i,k,n} = \frac{g_{ii,k,n} p_{i,n}}{\sum_{j \neq i} \sum_{k=1}^K g_{ji,k,n} p_{j,n} + \sigma^2} \quad (1)$$

式中 σ^2 表示加性高斯白噪声(additive white Gaussian noise, AWGN)功率。

对于一定的BER要求,根据 $\gamma_{i,k,n}$ 可以求出小区i

中第 k 个用户在第 n 个子信道上可以发送的最大比特速率为:

$$R_{i,k,n} = \bar{B} \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_{i,k,n}}{\Gamma} \right) \quad (2)$$

式中 Γ 表示M-QAM调制信号和仙农信道容量的SNR差值。

本文的最优化目标是根据信道质量信息和用户的速率要求分配子载波、比特和功率,在满足用户的最小速率要求下使系统总吞吐量最大。设 $\rho_{i,k,n}$ 表示子信道的分配情况,当小区 i 中第 n 个子信道分配给用户 k 时, $\rho_{i,k,n} = 1$; 否则 $\rho_{i,k,n} = 0$ 。在同一小区内,同一时刻一个子信道只能分配给一个用户使用,则本文的最优化问题可表示为:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{i,k,n} R_{i,k,n} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \sum_{n=1}^N \rho_{i,k,n} = 1 & i=1,2,\dots,I; k=1,2,\dots,K \\ \sum_{n=1}^N \rho_{i,k,n} R_{i,k,n} \geq R_{\min}^{i,k} & i=1,2,\dots,I; k=1,2,\dots,K \\ \sum_{n=1}^N p_{i,n} \leq P_0 & i=1,2,\dots,I \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)所描述的最优化问题是一个非线性优化问题,该问题需要联合考虑所有基站的所有用户的子信道和功率分配,很难求得最优解。为了降低问题的复杂度,本文将子信道分配和功率分配分步实现,给出该问题的次优解。

2 多小区联合资源分配算法

本文提出的多小区自适应资源分配算法分为两步:第一,在各个小区内独立为用户分配子信道;第二,根据各小区的子信道分配状况和用户速率要求,多个小区联合协调分配每个小区同频子信道上的发送功率。

2.1 单小区子信道分配

在单小区OFDM系统的子信道分配算法中,Max C/I算法可以获得最大的系统吞吐量^[9],但容易导致部分信道质量较差的用户长期得不到调度,无法实现速率保证。本文给出的单小区子信道分配算法对Max C/I算法进行改进,保证每个调度周期每个用户至少能分配到一个较好的子信道。具体分配方法分为两步:

(1) Max C/I分配

假设各小区子信道都采用等功率分配,根据测

得的CQI计算当前小区内所有用户在所有子信道上的SINR,以子信道为循环,将每个子信道分配给在该子信道上SINR最大的用户。

(2) 子信道调整

对每个未分配到子信道的用户,按照该用户在所有子信道上的SINR从大到小的顺序排列子信道。从其SINR最大的子信道起,依次判断子信道的当前归属用户是否拥有两个以上的子信道,当出现某个子信道的归属用户拥有两个以上的子信道时,将该子信道改分配给这个未分配到子信道的用户,并结束本次循环,直到每个未分配到子信道的用户都分得一个子信道。

2.2 多小区联合功率分配

多小区功率分配是在单小区子信道分配的基础上进行的,即在 $\rho_{i,k,n}$ 已知的情况下,求解各小区在各子信道上的功率分配,使得在满足各用户的最小速率要求的前提下最大化系统吞吐量。在 $\rho_{i,k,n}$ 已知的情况下,若不考虑用户的速率要求,使系统总吞吐量最大相当于使所有小区在每个同频子信道上的传输速率之和都最大,但这可能导致部分用户的速率要求得不到满足。为进一步简化问题,将每个用户的最小速率要求均分到其所分得的一个或多个子信道上,即小区 i 的第 k 个用户在其所分得的每个子信道上都有一个最小速率要求 $\bar{R}_{\min}^{i,k} = R_{\min}^{i,k} / N_{i,k}$,其中 $N_{i,k}$ 表示小区 i 中第 k 个用户当前分得的子信道数;同时将每个子信道的发送功率限制在 $[0, \bar{p}]$ 范围内,其中 $\bar{p} = P_0 / N$ 。设 $k_{i,n}$ 表示完成子信道分配后,小区 i 中第 n 个子信道的当前归属用户,则经过简化后每个子信道都有一个最小速率要求 $\bar{R}_{\min}^{i,k_{i,n}}$ 和发送功率范围 $[0, \bar{p}]$,此时系统的优化目标可表示为:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i=1}^I R_{i,k_{i,n},n} \quad n=1,2,\dots,N \\ \text{s.t.} & \begin{cases} R_{i,k_{i,n},n} \geq \bar{R}_{\min}^{i,k_{i,n}} & i=1,2,\dots,I \\ p_{i,n} \leq \bar{p} & i=1,2,\dots,I \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

由式(2)可知:

$$R_{i,k_{i,n},n} = \bar{B} \log_2 \left(1 + \frac{g_{ii,k_{i,n},n} p_{i,n}}{\left(\sum_{j \neq i} \sum_{k=1}^K g_{ji,k_{i,n},n} p_{j,n} + \sigma^2 \right) \Gamma} \right) \quad (5)$$

可见每个小区在同频子信道上的功率分配都会影响其他小区在该子信道上的传输速率,增大某个

小区在子信道 n 上的发送功率,必然会减小其他同频小区在该子信道上的传输速率。求解式(4)同样是一个非线性优化问题,本文利用TS算法求解式(4)的优化问题。

由于TS算法为串行搜索,具有较强的“爬山”能力,并能有效避免重复搜索,搜索效率高,因此用在多小区功率分配求解中能够达到比较好的优化效果。本算法中用于功率分配的TS操作设计如下:

1) 量化和编码

由于每个小区在一个子信道上的功率分配取值范围是连续的,因此多小区功率分配的解空间是个无限空间。为了使用TS求解多小区功率分配的最优解,本文通过量子子信道功率分配的取值范围使解空间变为有限空间。用 Δp 表示功率取值范围的量化步长, $\Delta p = \bar{p}/L$, 其中 L 表示量化步数, L 越大表示量化粒度越细,求解过程中得到的解越接近最优,但需要的迭代次数就越多,运算时间越长。因此在选取 L 值时,应在优化效果和运算效率之间进行折中。

在选定量化步数 L 后,对各小区在子信道上的功率分配采用十进制编码。设 \mathbf{X}_n 代表在子信道 n 上的一个多小区功率分配解向量,则 $\mathbf{X}_n = \{x_1^n, x_2^n, x_3^n, \dots, x_I^n\}$, 其中 $x_i^n \in \{0, 1, \dots, L\}$ 表示小区 i 在子信道 n 上的功率分配等级,其对应的功率分配值 $p_{i,n} = x_i^n \Delta p$ 。

2) 适配值函数

适配值函数用于评价解向量的好坏,因此在本文的优化问题中,适配值函数应具备以下两个特点:(1) 根据解向量进行功率分配得到的所有小区在子信道上的传输速率之和越大,适配值应越大;(2) 若根据解向量进行功率分配时存在某个小区在子信道上的传输速率小于其最小速率要求,则适配值应较小。根据以上的两个特点,本文设计的适配值函数如下:

$$F = \sum_{i=1}^I R'_{i,n} \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (6)$$

式中

$$R'_{i,n} = \begin{cases} R_{i,k_i,n,n} & R_{i,k_i,n,n} \geq R_{\min}^{i,n} \\ \beta \left(R_{i,k_i,n,n} - \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) R_{\min}^{i,n} \right) & R_{i,k_i,n,n} < R_{\min}^{i,n} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (7)$$

式(7)中的 β 是一个大于1的实数; $R_{i,k_i,n,n}$ 表示根据解向量进行功率分配得到的小区 i 在子信道 n 上

的传输速率。式(7)中 $R'_{i,n}$ 与 $R_{i,k_i,n,n}$ 的关系如图1所示。图中的 $R_{\min}^{i,n}$ 点是直线斜率的转折点,当 $R_{i,k_i,n,n} < R_{\min}^{i,n}$ 时,直线的斜率较大,这样可以使得在搜索功率分配的解向量时,提高不满足最小速率要求的小区子信道速率将比提高其他小区的子信道速率获得更大的适配值增益;反之,减小不满足最小速率要求的小区子信道速率将比减小其他小区的子信道速率导致更大的适配值消减。从而使搜索方向沿着满足所有子信道最小速率要求基础上的吞吐量最大化方向进行。

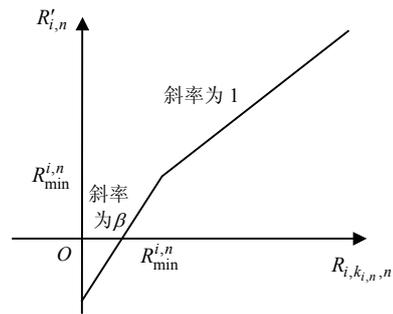


图1 $R'_{i,n}$ 与 $R_{i,k_i,n,n}$ 的关系图

3) Tabu搜索

(1) 移动:采用单个移动方式。由于采用的是十进制编码,因此算法中的单个移动操作为对解向量中的某一位 x_i^n 进行加1或减1操作。若 $x_i^n = 0$,则该位的移动操作只能是加1;若 $x_i^n = L$,则该位的移动操作只能是减1;若 $0 < x_i^n < L$,则该位的移动操作可以是加1或减1。

(2) Tabu表:如果一个单个移动被实现,则Tabu表中将记录该移动位的码串位置及其移动的反方向,即“-1”或“+1”。

(3) 释放准则:采用基于适应度的释放准则,即如果Tabu表中记录的一个移动作用于当前解后,可得到一个适应度比以前所搜索到的所有解都要高的解,则称该移动可以被“释放”。

(4) 终止准则:以最大迭代步数为终止准则。

3 仿真分析

假设系统带宽为10 MHz,有600个可用子载波,每25个连续的子载波组成一个子信道,系统共有24个子信道。发送时间间隔(transmission time interval, TTI)为0.5 ms,一个TTI作为一个调度周期。采用扇区化小区,每个小区3扇区,扇区间频率复用因子为1,每个扇区的最大发送功率为20 W。将本文提出的基于TS的多小区自适应资源分配算法用于一个小区

的3个扇区,则功率分配过程可在一个基站内实现,而无需引入额外的集中控制中心。而且仿真表明,同小区相邻扇区的干扰占总干扰的20%左右。

为了更好地说明算法的性能,将本文算法与经典算法中吞吐量性能最优的Max C/I算法和具有最小速率保证的MRR算法^[10]进行仿真对比。仿真中,本文算法的功率取值范围的量化步数为5,TS的迭代次数为20,禁忌步长为2。假设系统中所有用户的最小传输速率要求都相同。图2显示了在用户最小速率要求为1 024 kb/s 时采用3种算法进行仿真得到的系统吞吐量曲线,表1显示了相应的用户不满足率。其中Max C/I和MRR分别表示等功率分配下的Max C/I算法和MRR算法;TS即本文提出的基于TS的多小区自适应资源分配算法。

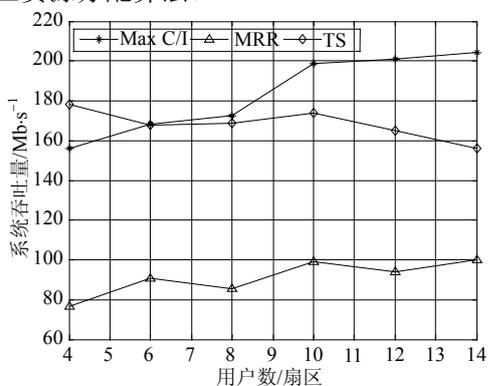


图2 系统吞吐量对比

表1 不满足最小速率要求的用户比例

用户数	4	6	8	10	12	14
Max $\frac{C}{I}$ / (%)	25.0	33.3	54.2	56.7	69.4	71.4
MRR / (%)	0	0	0	6.7	5.6	9.5
TS / (%)	0	0	0	0	0	0

从仿真结果可看出,Max C/I算法具有很高的系统吞吐量,但是由于没有考虑用户速率要求,因此系统中许多用户的最小速率要求都得不到满足;MRR算法以牺牲系统吞吐量为代价换来了用户QoS保证,虽满足了各用户的最小速率要求,却降低了频谱效率;基于TS的多小区自适应资源分配算法能够在保证各用户最小速率要求的基础上,显著提高系统吞吐量,由图2可见,在系统负载量较小时该算法的吞吐量甚至能超越Max C/I,而在系统负载量较大时,该算法为了保证众多用户的速率要求而降低了频谱效率,其系统吞吐量低于Max C/I,但仍远大于MRR。

4 结 论

综上所述,本文算法综合考虑了用户速率要求和频谱效率,能够在满足用户最小速率要求的基础上提高系统吞吐量,实现了系统性能的优化。算法中的信道容量计算是基于理想的连续速率调制方式的,希望进一步研究在自适应调制与编码(adaptive modulation and coding, AMC)方式下的自适应资源分配算法。

参 考 文 献

- [1] CHUANG J, SOLLENBERGER N. Beyond 3G: wideband wireless data access based on OFDM and dynamic packet assignment[J]. IEEE Commun Mag, 2000, 38: 78-87.
- [2] ROHLING H, GRUNHEID R. Performance comparison of different multiple access schemes for the downlink of an OFDM communication system[C]//IEEE VTC'97. Phoenix: IEEE Press, 1997: 1365-1369.
- [3] 符初生, 张忠培. 基于OFDMA资源调度分配算法的研究[J]. 电子科技大学学报, 2003, 32(5): 508-511.
FU Chu-sheng, ZHANG Zhong-pei. Study of resource scheduling based on OFDMA[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2003, 32(5): 508-511.
- [4] SONG G, LI Y. Adaptive resource allocation based on utility optimization in OFDM[C]//IEEE Globecom. San Francisco: IEEE Press, 2003: 586-590.
- [5] WANG Qian, XU Dan, XU Jing, et al. A grouped and proportional-fair subcarrier allocation scheme for multiuser OFDM systems[C]//IPCCC'06. [S.l.]: IEEE Press, 2006: 97-101.
- [6] YU Wei, RHEE W, BOYD S, et al. Iterative water-filling for Gaussian vector multiple-access channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50: 145-152.
- [7] 张天魁, 曾志民, 唐南, 等. 用于OFDMA蜂窝系统的多小区自适应资源分配算法[J]. 北京邮电大学学报, 2007, 30(5): 67-71.
ZHANG Tian-kui, ZENG Zhi-min, TANG Nan, et al. A Multicell adaptive resource allocation scheme for OFDMA cellular System[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007, 30(5): 67-71.
- [8] WANG Lan, XUE Yi-sheng, SCHULZ E. Resource allocation in multicell OFDM systems based on noncooperative game[C]//PIMRC'06. Helsinki: IEEE Press, 2006: 1-5.
- [9] JANG J, LEE K B. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(2): 171-178.
- [10] SONG Peng-peng, CAI Li-yu. Multi-user subcarrier allocation with minimum rate requests for downlink OFDM packet transmission[C]//IEEE VTC. [S.l.]: IEEE Press, 2004: 1920-1924.

编辑 张俊