

基于 MIMO 系统的容量最大化资源分配算法

刘春玲 马秋成 张 然

(大连大学信息工程学院 辽宁 大连 116622)

摘 要 多输入多输出(MIMO)技术可以提高系统传输速率、增大系统容量。针对应急通信中短时间内用户激增,传统资源分配算法的系统容量无法满足用户需求的问题,提出一种基于 MIMO-OFDM 系统用户最小速率的系统容量最大化资源分配算法。该算法考虑了应急场景内通话类等低速率业务剧增的情况,首先根据用户速率由低到高依次分配子载波,然后根据分得的子载波数之比将剩余子载波按照用户速率由高到低分配;对于有盈余带宽的子载波,采用子载波分组的方法再分配,从而最大化系统服务用户数。为了补偿信道衰弱和抑制信道间干扰,提出一种对子载波信道矩阵分组的功率分配方法,减少了迭代次数,降低了复杂度。从吞吐量、服务用户数和计算复杂度等方面评估了容量最大化算法的性能。仿真结果表明,相对于传统的资源分配算法,所提算法增加了系统服务用户数,减小了计算复杂度。

关键词 应急通信,多输入多输出,容量最大化,子载波分配,功率分配

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A

Resource Allocation of Capacity Maximization Based on MIMO System

LIU Chun-ling MA Qiu-cheng ZHANG Ran

(College of Information Engineering, Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, China)

Abstract Multiple input multiple output (MIMO) technology can improve the transmission rate of system and increase the system capacity. Aiming at the problems that users suddenly increase in emergency communication and the system capacity of the traditional resource allocation algorithm is unable to meet the demand of users, a resource allocation algorithm for maximizing system capacity based on the user's minimum rate of MIMO-OFDM system was proposed. It considers the rapid growth of low rate business such as call service in emergency situations. Firstly, the subcarriers are allocated in descending order according to the users' rate. Then, on the basis of the ratio of allocated subcarriers' number, the remaining subcarriers are allocated from high to low according to the users' rate. For the subcarriers with remaining bandwidth, subcarrier grouping method is used for redistributing, thus it maximizes the number of system serviced users. In order to compensate for channel fading and suppress interference between channels, a power allocation of subcarrier channel matrix grouping was proposed. It can decrease the number of iterations and reduce the computational complexity. The simulation experiment evaluates the performance of the proposed algorithm from throughput, the number of system serviced users, computational complexity and so on. Comparing with traditional resource allocation algorithms, the simulation results show that the proposed algorithm increases the number of system serviced users and reduces computational complexity.

Keywords Emergency communication, MIMO, Capacity maximization, Subcarrier allocation, Power allocation

1 引言

在应急通信中,通常会面临地面基站受损、用户激增等问题。MIMO(Multiple Input Multiple Output)技术^[1]能够通过发送端和接收端配置的多根天线同时发送或接收多个空间流,充分利用空间资源,提高了系统的容量。OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)技术主要是将信道分成多个相互正交的子信道,可以减小信道之间的干扰,提高系统的频谱利用效率。良好的资源分配算法能够有效地提高系统的频谱利用率,提高系统的容量,降低算法的复杂度,能够

保证 QoS 以使用户获得公平的服务。

目前,国内外学者对基于 MIMO 系统资源分配算法的研究已经有很多。文献[2]提出了一种基于用户 QoS 的 MIMO 中继系统资源分配算法,该算法获得了较高的系统容量,并且较好地保证了各个用户的 QoS,但是该算法是基于地面中继的,而在应急条件下地面的通信设施往往会造成毁灭性的破坏,因此这种算法不适用于不存在地面中继的情况。文献[3]针对 MIMO 系统提出了一种基于轮询算法的改进算法,该算法提高了用户之间的公平性,但是没有考虑系统容量和计算复杂度的问题,不符合应急通信场景对系统容量和通信时延

本文受自然科学基金项目(91338104),辽宁省教育厅科学研究项目(L2013461)资助。

刘春玲(1971—),女,博士,教授,CCF 会员,主要研究方向为信号处理和卫星通信;马秋成(1991—),男,硕士生,主要研究方向为卫星通信网络技术,E-mail:mqc_1991@163.com(通信作者);张 然(1985—),女,博士,CCF 会员,主要研究方向为卫星通信网络技术。

的要求。文献[4]提出通过构造拉格朗日乘子式的方法来最大化系统容量,但是其计算复杂度较大,从而导致通信时延提高。文献[5]提出了一种基于比例公平的 MIMO 系统下行链路资源分配算法,该算法保证了每个用户的 QoS 和用户之间的公平性,但是其复杂度过高。在应急通信系统内,短时间内会有大量用户请求服务。因此,在实现系统容量最大化的基础上降低算法复杂度,并保证一定的公平性成为应急通信领域研究的重点。

针对以上分析,本文提出了一种基于 MIMO-OFDM 系统用户最小速率的系统容量最大化资源分配算法,在优先保证通话类等低速率业务获得服务的同时又在一定程度上满足了高速率业务的需求,从而服务了更多用户,由此得出了子载波的分配方法。为了保证服务质量、降低干扰,提出一种将子载波信道矩阵分组的低复杂度功率分配方法。仿真结果表明,所提算法提升了系统服务用户数,降低了计算复杂度,并且在一定程度上保证了用户之间的公平性,提高了通信性能,更适用于应急通信场景。

2 资源分配系统模型

本文采用的是基于 MIMO-OFDM 的应急通信系统下行通信链路。在 MIMO-OFDM 系统内主要涉及子载波分配和功率分配,子载波分配主要是满足各个用户对传输速率的要求,而功率分配主要用于补偿信道的路径损耗和阴影衰弱,抑制信道间的干扰,从而保证业务质量,降低干扰。

假设卫星端和用户终端通过信道估计完全知道信道状态信息(CSI),MIMO 发送端能够及时地更新收集到的信道信息,在传输过程中信道变化很小,使得卫星资源管理中心可以通过资源分配算法向每个用户分配不同的资源。图 1 给出了 MIMO 系统资源分配方案的过程,首先 MIMO 发送端根据用户的请求信息做出资源分配决策,然后发送端将处理后的控制信息和数据信息通过无线信道传送到接收端。在接收端,用户根据接收到的数据信息进行相应处理,恢复出原始信息。假设数据信息通过单独的子信道发送给每个用户,因此每个用户都可以在其分配的信道上传输数据。

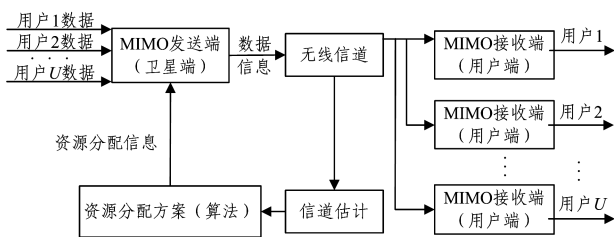


图 1 MIMO 系统资源分配框图

在发送端和接收端分别配置 N_t 和 N_r 根天线,系统中共有 U 个用户。把 MIMO 系统传输信道的发送端和接收端模型看作是 $N_r \times N_t$ 维的矩阵 $H, H \in C^{N_r \times N_t}$ 。

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r 1} & \cdots & h_{N_r N_t} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, $h_{N_r N_t}$ 表示第 N_r 根接收天线和第 N_t 根发送天线之间的信道衰弱系数。假定 $h_{N_r N_t}$ 是平坦的瑞利衰弱,即 $h_{N_r N_t}$ 是服从高斯分布的随机变量。

在 MIMO-OFDM 系统中有多个子载波,而且每个子载波又有多个子信道,因此当一个子载波通过不同的信道分配

给不同的用户时,它们之间的信道矩阵是不同的。

信道容量^[6]是指在一定的信噪比的前提下系统所能达到的最高传输速率,也就是说信道容量和系统的最大传输速率是等价的概念。假设 $r \in C^{N_r \times 1}$ 是接收数据矢量, $x \in C^{N_t \times 1}$ 是发送数据矢量,则它们之间的关系可以表示为:

$$r = Hx + n \quad (2)$$

其中, n 可以看作是一个均值为 0、方差为 σ^2 的加性复高斯随机噪声过程。

对式(1)进行奇异值分解(SVD)后, MIMO 信道就被分解成多个独立并行的 SISO(Single Input Single Output)空间子信道。

$$H = G \cdot D \cdot V^H \quad (3)$$

其中, G 和 V 分别是左右奇异值向量, G 是 $N_r \times N_r$ 维的接收矩阵, V 是 $N_t \times N_t$ 维的发送矩阵, D 是由 H 的特征值按降序排列构成的对角矩阵。

设系统总发送功率为 P_{total} , I 是信道矩阵 H 非零特征值的个数, $p_{u,s}$ 是用户 u 在子载波 s 上的功率, λ_i 是信道矩阵 H 的第 i 个特征值, B 是系统总带宽, n_0 是噪声功率谱密度, $\rho_{u,s}$ 是一个 0 到 1 之间的数,用来表征子载波分配到用户的带宽占整个子载波带宽的比例。

子载波 s 在用户 u 上的速率可以表示为:

$$R_{u,s} = \frac{\rho_{u,s} B}{S} \sum_{i=1}^I \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i p_{u,s}}{n_0 B/S} \right) \quad (4)$$

其中, R_u 为一组表示各个用户传输速率的值,用户 u 的传输速率如式(5)所示:

$$R_u = \sum_{s=1}^S R_{u,s} \quad (5)$$

式(5)表明,用户 u 的传输速率等于它所分配到的所有子载波上的速率之和。

由式(4)、式(5)可以得到 MIMO 系统的最大容量的公式。

$$C = \max \left\{ \frac{\rho_{u,s} B}{S} \sum_{u=1}^U \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \left(\log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i p_{u,s}}{n_0 B/S} \right) \right) \right\} \quad (6)$$

式(6)的约束条件为:

$$\sum_{u=1}^U \sum_{s=1}^S p_{u,s} \leq P_{total}, p_{u,s} \geq 0, \forall u, s$$

本文考虑了语音通话业务、网页浏览业务、文件下载业务和影音业务,其业务的最小速率要求分别为: $r_1 = 64$ kbps, $r_2 = 128$ kbps, $r_3 = 384$ kbps 和 $r_4 = 1024$ kbps。当出现应急情况时,语音通话业务会剧增,因此本文中 4 种业务之间的比例为 5:1:1:1,并且在这 4 种业务中速率要求低的业务具有更高的优先级。每个用户按照业务之间的比例随机选取其中一项业务,然后根据自身业务的需求申请资源。

3 资源分配算法

基于以上分析,本文针对 MIMO-OFDM 系统下行链路,提出一种基于 MIMO-OFDM 系统用户最小速率的系统容量最大化资源分配算法。该算法被分成两步来完成,第一步是子载波分配,第二步是功率分配。

3.1 子载波分配

子载波分配算法的基本思想是:

(1) 传输速率 R_u 最小的用户优先被分配子载波,一旦用户分配到的子载波总数 $n_{u,s}$ 满足用户的传输速率,该用户将不能继续分得子载波,剩余的子载波将在(2)中继续分配。

(2) 在分配剩余子载波时,传输速率 R_u 最大的用户优先

被分配子载波,根据(1)中各个用户分配的子载波数之比,按照用户速率 R_u 由高到低进行分配,直到所有的子载波分配完毕。这样能够满足用户速率大的用户的需求,既提高了系统容量,又能在一定程度上兼顾用户之间的公平性。

(3)对于系统中有盈余带宽的子载波,系统将每两个子载波分为一组进行再分配。按照用户速率 R_u 由小到大的顺序进行分配,保证每个用户最多只分配到一个子载波组。

子载波分配算法的具体步骤如下:

Step1 初始化以下参数:

$$\rho_{u,s} = 0, R_u = 0, u \in \{1, \dots, U\}$$

Step2 初始子载波分配。

1) $u=1$;

2)寻找传输速率 R_u 最小的用户 u : $u = \arg \min R_u, u \in \{1, 2, 3, \dots, U\}$;

3)如果该用户所分到的子载波数 $n_{u,s}$ 满足用户传输速率 $R_u, R_u = R_u + \frac{\rho_{u,s} B}{S} \sum_{i=1}^I \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i p_{u,s}}{n_0 B/S} \right)$;

$$4) U = U - \{u\}, S = S - \{s\}, u = u + 1, R_u = 0;$$

5)重复步骤 2)–4),直到 $u=U$ 。

Step3 剩余子载波再分配。

$$1) \text{剩余子载波数: } S^* = S - \sum_{u=1}^U n_{u,s};$$

2)寻找传输速率 R_u 最大的用户 u : $u = \arg \max R_u, u \in \{1, \dots, U\}$;

3)按照 Step2 中各个用户之间的子载波数之比分配子载波, $R_u = R_u + \frac{\rho_{u,s} B}{S} \sum_{i=1}^I \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i p_{u,s}}{n_0 B/S} \right)$;

$$4) U = U - \{u\}, S^* = S^* - \{s\}, u = u + 1;$$

5)重复步骤 2)–4)。

Step4 系统中有盈余带宽的子载波再分配。假设系统中有 S^* 个有盈余带宽的子载波,每个子载波组的带宽为 B^* 。

1)寻找传输速率 R_u 最小的用户 u : $u = \arg \min R_u, u \in \{1, 2, 3, \dots, U\}$;

$$2) R_u = R_u + \frac{\rho_{u,s} B}{S} \sum_{i=1}^I \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i p_{u,s}}{n_0 B/S} \right) + B^* \sum_{i=1}^I \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i p_{u,s}}{n_0 B^*} \right);$$

$$3) U = U - \{u\}, S^* = S^* - \{s^*\}, u = u + 1;$$

4)重复步骤 1)–3)。

Step5 当子载波集合为空时,子载波分配结束。

3.2 功率分配

由于在卫星通信网络中,信道衰弱和信道之间的干扰是不可避免的,为了补偿信道衰弱和抑制信道之间的干扰,在完成子载波的分配以后还需进行功率分配。其中,一种传统的分配功率方法就是直接使用注水算法在空间子载波信道上分配功率,但是在这种分配方式的计算复杂度过高,尤其对于速率较高的用户更是如此。为了降低计算复杂度,可以对子载波信道矩阵分组,对于用户 u ,具体的分配方法如下。

假设用户 u 分得了 $n_{u,s}$ 个子载波,那么该用户所获得的所有子载波的信道矩阵可表示为:

$$H_u = \begin{pmatrix} s_{u,1}^1 & \cdots & s_{u,n_{u,s}}^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{u,1}^I & \cdots & s_{u,n_{u,s}}^I \end{pmatrix} \quad (7)$$

可以将用户 u 的子载波信道矩阵 H_u 分为 I 组:

$$H_{u,1} = \{s_{u,1}^1, s_{u,2}^1, \dots, s_{u,n_{u,s}}^1\}$$

$$H_{u,2} = \{s_{u,1}^2, s_{u,2}^2, \dots, s_{u,n_{u,s}}^2\}$$

...

$$H_{u,I} = \{s_{u,1}^I, s_{u,2}^I, \dots, s_{u,n_{u,s}}^I\} \quad (8)$$

用每组的平均信道状态代替空间子信道的信道状态。在每个组内,使用相同的调制方式和编码方式,利用注水算法将功率加载到每个组上。

(1)对每组的信道增益 $g_{H_{u,i}}$ 按照由大到小的顺序进行排序;

(2)直到每个组分配的功率之和等于总功率为止。

3.3 复杂度分析

假设用户 u 分得了 $n_{u,s}$ 个子载波并且每个用户所获得的子载波信道矩阵被分成了 I 个组,本文算法只需将功率在 I 个组之间分配,因此分配功率只需要计算 I 次并且每分配一次功率需要比较 $I-1$ 次,所经历的时间复杂度为 $O(I)$ 。而传统的资源分配算法需要将功率计算 $n_{u,s} I$ 次,并且每分配一次功率需要比较 $n_{u,s} I-1$ 次,所经历的时间复杂度为 $O(n_{u,s} I)$ 。因此,较传统的功率分配算法,本文算法大大降低了计算复杂度。

4 算法仿真及分析

在仿真中,考虑 MIMO 下行链路的子载波和功率分配,不考虑子信道之间的干扰,信道是瑞利衰弱信道。仿真参数如表 1 所列。

表 1 仿真参数

参数名称	参数值
系统带宽/MHz	20
子载波数	1200
发送天线数	4
接收天线数	2,4
载波频率/GHz	2.6
用户数	20~200
发送功率/W	20
噪声功率谱密度/(dBW/Hz)	-80

为了检验容量最大化算法,在相同的仿真条件下,在 Matlab 环境中对比了轮询算法^[10]、最大载干比算法^[11]、比例公平算法^[12],并进行了仿真分析。

(1)吞吐量分析

吞吐量表示的是单位时间内成功发送的数据量,容量最大化算法与传统资源分配算法的吞吐量比较如图 2 所示。

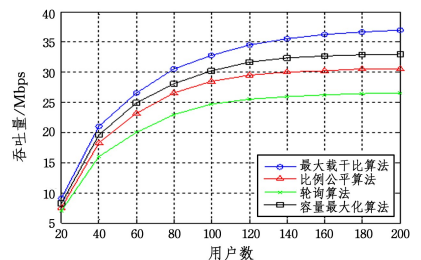


图 2 用户数和吞吐量的关系

图 2 给出了在发射天线和接收天线的数量都是 4 的情况下,不同的资源分配算法用户数与吞吐量之间的关系。从图 2 中可以看到,在给定用户数的前提下,容量最大化算法虽然较最大载干比算法有一定损失,但是较比例公平算法和轮询

算法有较大提升。

(2) 系统服务用户数分析

根据 MIMO 系统容量、各业务的速率要求和业务之间的比例可以得到系统所服务的用户数。

图 3 给出了不同算法下,请求业务的用户数与系统所服务用户数之间的关系。从图 3 中可以看出,在用户数较少的情况下,系统资源相对来说较充足,每个用户均能接入系统,此时 4 种算法所能服务的用户数是一样的。但是,当接入的用户数较多时,系统资源相对不足,资源受限。由于容量最大化算法优先考虑了传输速率小的用户,又满足传输速率大的用户对于传输速率的要求,因此其服务的用户数是最多的。

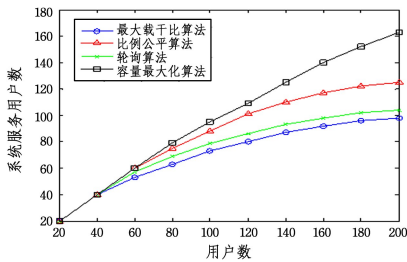


图 3 用户数与系统所服务用户数的关系

(3) 公平性分析

在应急通信场景下,用户数会短时间剧增,为了尽可能地确保每个用户都完成通信,需要考虑用户之间公平性的问题。本文定义公平指数 α 如下:

$$\alpha = \frac{(\sum_{u=1}^U R_u)^2}{U \sum_{u=1}^U R_u^2} \quad (9)$$

其中, α 为一个 0 到 1 之间的值, α 的值越接近 1 则公平性越好, α 的值越接近 0 则公平性越差; U 为系统所服务的用户数。

图 4 给出了在不同资源分配算法下,用户数与公平指数之间的关系。最大载干比算法只服务信道条件好的用户,使得信道条件差的用户几乎很难获得服务,因此公平性最差。轮询算法让每个用户获得相同的的服务概率,因此公平性最高。比例公平算法考虑了系统吞吐量与公平性的一个折中,因此其公平性介于最大载干比算法与轮询算法之间。容量最大化算法是在追求系统容量最大化的基础上同时兼顾了用户之间的公平性,又尽可能地使系统内的所有用户都被调度到,因此其公平性较比例公平算法略高。

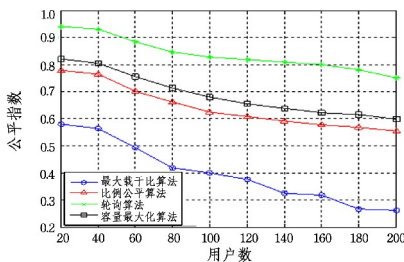


图 4 用户数与公平指数的关系

有的子载波分配完毕,对于有盈余带宽的子载波采用子载波分组的方法再分配,从而使系统服务用户数最大化。另外,为了减小信道之间的干扰和信道衰弱,提出了一种将子载波信道矩阵分组的低复杂度的功率分配算法。仿真结果表明,该算法用较小吞吐量的损失换取了系统服务用户数的提升和计算复杂度的下降,并且在一定程度上保证了用户之间的公平性,提高了通信性能,更适用于应急通信场景。本文是在卫星端和用户端完全知道信道状态的情况下进行的,是一种理想的假设,下一步应该在本文研究的基础上考虑信道的实际通信情况,通过信道估计来获取信道状态信息,然后再研究算法的性能。

参考文献

- [1] 胡莹,冀保峰,黄永明,等. 大规模 MIMO-OFDMA 下行系统能效资源分配算法[J]. 通信学报, 2015, 36(7): 40-47.
- [2] 郭涛,李有明,雷鹏,等. MIMO 中继系统中一种基于用户 QoS 的资源分配方法[J]. 电信科学, 2015, 31(4): 115-120.
- [3] PATIL P, BORSE C. Fair resource allocation to MIMO wireless system using Opportunistic Round Robin scheduling algorithm [C]// International Conference on Pervasive Computing. IEEE, 2015: 1-3.
- [4] GANGWAR A, BHARTI M R. An efficient dynamic resource allocation algorithm for downlink MIMO-OFDMA systems[C]// International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies. IEEE, 2015: 775-779.
- [5] ALI M A, AL-GHADHBAN S, MAHMOUD A S H. Resource allocation scheme for MIMO-OFDMA systems with proportional fairness constraints[C]// IEEE, International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. IEEE Computer Society, 2012: 512-516.
- [6] 王大鸣,吕璐,窦冬冬,等. 一种虚拟 MIMO 中的低复杂度功率分配算法[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(3): 280-283.
- [7] WANG Z, VANDENDORPE L. Energy efficient resource allocation in MIMO-OFDMA downlink systems[C]// IEEE, International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. IEEE, 2016: 1-5.
- [8] ADIAN M G, AGHAEINIA H. Resource Allocation in MIMO-OFDM-Based Cooperative Cognitive Radio Networks[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2016, 27(1): 34-50.
- [9] GUO C, ZHAO L, FAN G, et al. Capacity-and-Energy Efficient Resource Allocation for Emergency Communications[C]// Vehicular Technology Conference. IEEE, 2015: 1-5.
- [10] PATIL P, BORSE C. Fair resource allocation to MIMO wireless system using Opportunistic Round Robin scheduling algorithm [C]// International Conference on Pervasive Computing. IEEE, 2015: 1-3.
- [11] MUSHTAQ A S, HAIDER A Z, OREST L, et al. Improving QoS in MAX C/I scheduling using resource allocation type 1 of LTE[C]// Experience of Designing and Application of Cad Systems in Microelectronics. IEEE, 2015: 12-14.
- [12] CHINGOSKA H, NIKOLOSKA I, HADZI-VELKOV Z, et al. Proportional fair scheduling in wireless powered communication networks[C] // International Conference on Telecommunications. IEEE, 2016: 1-5.

结束语 针对应急通信场景下地面通信设施受损、用户激增等情况,提出了一种基于 MIMO-OFDM 系统用户最小速率的系统容量最大化资源分配算法。考虑到应急场景下通话类等低速率业务增多的特点,首先通过子载波分配使得通话类等低速率业务优先获得服务,然后将剩余子载波根据之前分得的子载波数之比按照用户速率由高到低分配,直到所