

# 基于用户公平性的 OFDMA 业务分集资源调度算法\*

郑吉妮, 秦家银, 刘梁杰

(中山大学信息科学与技术学院电子与通信工程系, 广东 广州 510275)

**摘要:** 提出了一种基于用户公平性、适用于多用户传多业务的 OFDMA 移动通信系统的资源调度算法。该算法采用跨层设计方案, 综合考虑 MAC 层业务的 QoS 要求和物理层的信道状态信息进行自适应资源调度, 以实现提高系统容量和保证用户公平性之间的折中与优化。仿真结果表明, 相对于未采用业务分集的方案, 该文所提算法能够显著的提高系统容量; 同时, 相对于已有的基于容量最大化的算法, 所提算法在保证用户公平性方面有明显的优势。

**关键词:** OFDMA; 资源调度; 业务分集; 用户公平性

**中图分类号:** TN929    **文献标志码:** A    **文章编号:** 0529-6579(2010)04-0053-06

## Resource Allocation Algorithm in OFDMA Traffic-Diversity System Based on Fairness

ZHENG Jini, QIN Jiayin, LIU Liangjie

(Department of Electronic and Communications Engineering, School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** A new resource allocation algorithm, which could ensure the fairness and meet the demand that multiple users transmit multiple traffics simultaneously in OFDMA mobile communication system, is proposed. The algorithm is mainly based on the cross-layer design. It takes into consideration both the QoS requirements of services in the MAC layer and the channel status information in the physical layer, hence makes adaptive resource scheduling to make a trade-off between the fairness and system capacity. Finally, the simulation results, show that the improved system has a higher capacity than the one not applying the traffic-diversity scheme. Besides, the proposed algorithm has an advantage on the performance of ensuing fairness compared with the one that based on the highest capacity.

**Key words:** OFDMA; resource allocation; traffic-diversity; Fairness

正交频分多址 (OFDMA) 技术凭借其高的频谱利用率和良好的抗多径干扰能力, 已成为下一代移动通信 (4G) 的关键技术之一。随着通信技术的飞速发展, 人们对高速数据传输和宽带多媒体业务提出了新的要求, 未来移动通信系统需要满足多个用户同时并行传输多业务的需求。“业务分集”技术首先在 MAC 层对同一用户的各种业务进行区

分, 然后将其按指定的 BER (系统期望误码率) 进行发送, 最后在接收端汇聚属于同一个用户的业务。显然, 该技术能够很好地满足用户对多业务传输的需求。Guan<sup>[1]</sup> 首先提出了业务分集的概念, 并提出了一种基于拉格朗日函数的优化算法, 通过寻找最优参数来提高系统容量。该算法的资源分配只限于物理层, 未对具体业务进行区分, 使算法在

\* 收稿日期: 2009-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60672048); 广州市科技计划资助项目 (2008Z1-D151); 国家自然科学基金和广东省联合基金资助项目 (U0635003)

作者简介: 郑吉妮 (1985 年生), 女, 硕士; 通讯作者: 秦家银; E-mail: issqiy@mail.sysu.edu.cn

提高系统容量的同时不能满足用户的公平性。Jeong<sup>[2]</sup>提出了一种跨层优化的调度算法,其基本思想是首先在 MAC 层使用分组调度器根据业务的 QoS 要求确定用户的优先级,然后在物理层进行资源分配。该算法虽然实现了 MAC 层和物理层的跨层资源调度,有效地提高了频谱利用率,但其简单地假设一部分用户仅传输 RT (实时) 业务,另一部分用户仅传输 NRT (非实时) 业务,即每个用户只传输一种业务类型。这种用户单一业务的使用在资源平面上仅仅是将用户之间的差别体现为业务之间的差别。而对于多用户 OFDMA 系统,用户的公平性是资源调度必须考虑的重要因素,为此 Andrews 构造了一种使系统吞吐量和用户公平性达到折中考虑的优化方案<sup>[3]</sup>,其基本思想是通过用户对用户的待传数据量进行比例常数设置,然后进行相应的子载波和功率分配,使得用户在实际传输数据时可以保证其公平性。由于该方案没有结合业务的 QoS 要求,不是跨层优化算法。因此,本文在文献 [3] 的基础上将业务分集技术与跨层设计方案相结合,首先在 MAC 层根据业务的 QoS 要求动态调整各用户分组业务的优先级,然后在物理层对用户的待传数据量进行比例常数设置,通过相应的子载波和功率分配,实现在提高系统容量的同时尽可能的保证用户的公平性。仿真结果表明:本文所提算法有效地实现了提高系统容量和保证用户公平性之间的折中与优化。

## 1 系统模型

在多用户 OFDMA 系统中,从信道特性看,基站发出的信号在各个用户处具有独立的衰落特性;从业务类型看,每个用户对业务类型的 QoS 要求不同。这使得系统的研究必须综合 MAC 层和物理层两方面考虑,以全面提高系统的传输性能。

首先,假设每个用户都能够使用系统的所有子载波,且在发射端各用户都可以准确的估计各子载波的实际信道状况。同时,在基站有一个调度器为用户提供调度服务,每个用户对应的业务都有一个容量足够大的缓存来容纳等待提供调度服务的数据队列。用户数据包依次在缓存中排列,并按照先进先出的原则等待发送。在每一帧的开始,调度器根据调度规则确定待发送数据包的优先级,接着在每一个时隙内作出一次子载波的分配决定,并进行对应的功率分配和比特加载,最后数据包在物理层进行编码、调制、IFFT、串并转变等步骤后在不同的子载波上进行传输。假定系统有  $N$  个子载波,  $K$  个

用户,每个用户传输着  $M$  种不同类型的业务。则系统发射端结构模型如图 1 所示。

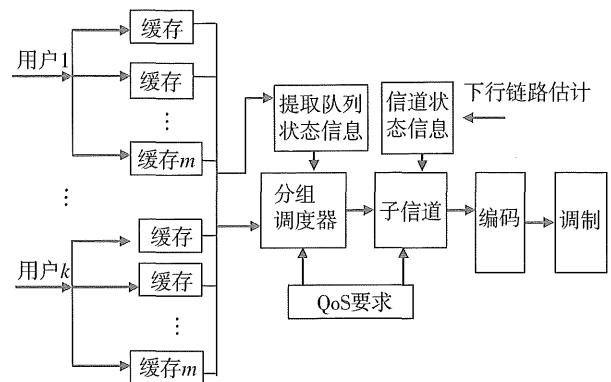


图 1 系统发射端模型

Fig. 1 System transmitter model

此外,在 MAC 层对用户进行业务区分时,首先将每个用户对应的一种业务作为一个虚拟用户,称其为 AU (Allocation Unit/分配单元块)。假定系统有三用户,均传输具有代表性的三种业务(语音、流媒体和数据)。若用  $a$  表示用户类别,  $b$  表示业务类型,则每个原始 AU 可用标识符  $(a, b)$  表示。为了简化算法,将二维标识符以一维特定单元块  $AU_i$  表示,如表 1。文章后续的资源调度均以 AU 为基本单元,取代了传统以用户为基本单元的模式。

表 1 一维 AU 块的定义

Table 1 One-dimensional definition of AU

AU	(1, 1)	...	(2, 1)	...	(3, 3)
$AU_i$	$AU_1$	...	$AU_4$	...	$AU_9$

## 2 算法描述

本文算法主要包括两部分:MAC 层的分组调度算法和物理层的自适应资源分配算法。算法的优化目标是:①保证业务的 QoS 要求,包括数据传输率和传输时延;②满足用户的实际传输速率要求,并使其分配到相应的发射功率;③证明此业务分集方案在提高系统容量的同时能够保证用户的公平性。

### 2.1 MAC 层的分组调度算法

在业务层面上,不同业务的 QoS 要求不同。其中,语音业务对时延和误比特率要求较严格,除了必须按其需要分满子载波,同时还得保证其传输

时延不得超过门限值；流媒体业务主要负责静态数字音频业务的存储，其允许的最大时延比语言业务大；数据业务一般不苛求传送过程中的一致性和连贯性，它只需要分到可用子载波即可。因此，业务所允许的最大传输时延必须作为判定优先级的考虑因素。另一方面，由于业务流传输的 QoS 保障对象就是业务的时延特性，而业务包的传输时延，取决于发送队列的拥塞情况和出错重传次数。发送窗口的拥塞越厉害，出错重传就越频繁，时延特性也就越差。同时，即使是对时延敏感性较弱的业务，诸如网页浏览，邮件发送等服务，如果数据包等待时间  $W_i$  过长，用户也将无法忍受。因此，本文定义了紧急参数  $\eta_i$  表示业务传输的紧急程度，且  $h_i = W_i/d_i$ 。

在用户层面上，不同用户对应业务的待传数据量  $R_i$  不同，将导致 AU 的数据包在缓存中的等待时间不同；同时， $R_i$  较大的 AU 更需要选择信道特性较好的信道来保证数据的正常传输。因此，AU 的优先级可根据下式判定：

$$P_i = \arg \max_i R_i h_i \quad (1)$$

其中  $\beta > 0$  为常数。从上式可知，将  $R_i$  和  $\eta_i$  的乘积作为确定 AU 优先级的依据，既保证了待传数据量较大的 AU 能及时传送数据，同时又可以保证业务的 QoS 要求。

### 2.2 物理层的自适应资源分配算法

物理层主要根据信道状态信息为 AU 进行动态的资源配置，具体包括以下两个步骤。

步骤 1：子载波分配。

假定系统中单个子载波所允许的最大传输速率为  $R_{\max}$ （可由香农公式得到），将  $R_i$  与  $R_{\max}$  的比值取整作为初次分配给 AU 的子载波数。然后将所有 AU 分配到的子载波数求和，再与系统现有总子载波数进行比较，若比之多，则按优先级排序依次使低优先级的 AU 其子载波数减一。这是因为低优先级意味着此 AU 不是待传数据量少就是分组等待时间较小，这样的 AU 对子载波数要求较低，可以减少其子载波数。反之，若子载波数求和后比系统的总子载波数少，则按上述规则，依次使高优先级别的 AU 子载波数加一。具体算法流程如图 2。

步骤 2：功率分配。

由于路径损耗等原因，靠近基站的用户其平均接收信噪比往往要高于距离基站远的用户。如果仅仅从最大化系统容量的角度出发进行资源分配，很容易造成靠近基站的用户占据了大部分资源，而小区边缘的用户得不到满足，所谓的“公平性”也

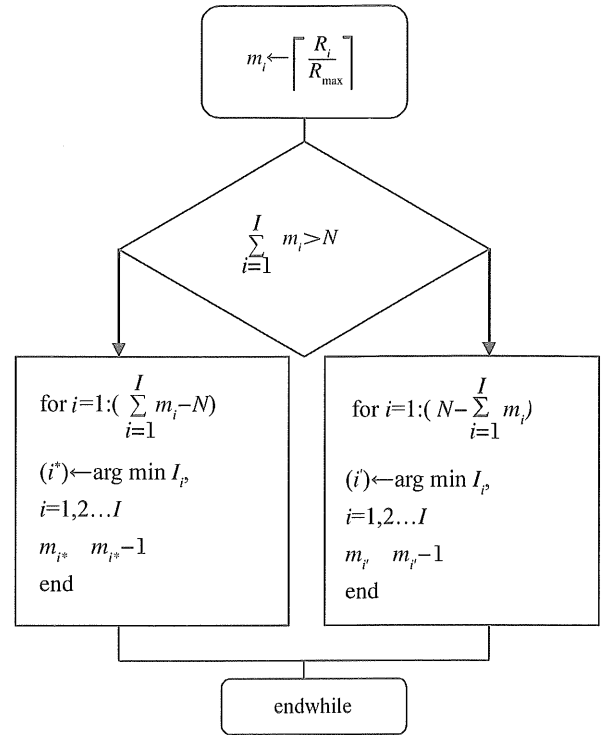


图 2 子载波分配算法流程图

Fig. 2 The flow chart of carriers allocation algorithm

就无从保证了。因此，本文将采用文献 [3] 的功率分配方案。首先，使系统满足如下约束条件

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{k,n} = P_{\text{total}}, p_{k,n} \geq 0 \\ U_1 : U_2 : \dots : U_K = \varphi_1 : \varphi_2 : \dots : \varphi_K, \\ \text{且 } \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_K = 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中， $p_{k,n}$  为用户  $k$  在第  $n$  个子载波上分配到的发射功率， $P_{\text{total}}$  为系统总功率， $U_k$  为各用户的待传数据量， $\varphi_1 : \varphi_2 : \dots : \varphi_K$  为各用户的待传数据量比例关系。根据这个比值进行相应的功率分配和比特加载，可以使用户在实际传输过程中得到相应的信道容量，满足用户的不同传输需求。当第  $k$  个用户对应第  $n$  个子载波的信道增益为  $H_{k,n}$  时，用户的功率分配如下：

$$P_k = \begin{cases} (P_{\text{total}} - \sum_{k=2}^K \frac{b_k}{a_{k,k}}) / (1 - \sum_{k=2}^K \frac{1}{a_{k,k}}), k = 1 \\ (b_k - P_1) / a_{k,k}, k = 2, \dots, K \end{cases} \quad (3)$$

推导过程参考文献 [3]。 $a_{k,k} = -\frac{N_1}{N_k} \frac{H_{k,1}}{H_{k,n}} \frac{W_k}{W_1}$ ,  $b_k = \frac{N_1}{H_{1,1}} (W_k - W_1 + \frac{H_{1,1} V_1 W_1}{N_1} - \frac{H_{k,1} V_k W_k}{N_k})$ ，其中， $V_k = \sum_{n=2}^{N_k} \frac{H_{k,n} - H_{k,1}}{H_{k,n} H_{k,1}}$ ， $W_k = (\prod_{n=2}^{N_k} \frac{H_{k,n}}{H_{k,1}})^{\frac{1}{N_k}}$ 。用户内部各子

载波的功率分配使用注水方案。

$$\begin{cases} P_{k,1} = \frac{P_k - V_k}{N_k} \\ P_{k,n} = P_{k,1} + \frac{H_{k,n} - H_{k,1}}{H_{k,n} H_{k,1}} \end{cases} \quad (4)$$

### 3 仿真结果与性能分析

本文仿真采用 COST207 中的无线信道模型<sup>[8]</sup>, 考虑了路径损耗、阴影衰落和多径衰落等相关因素。其中, 路径损耗采用 Hata 模型, 阴影衰落均值为 0 dB, 方差为 8 dB; 多径信道采用 TU 信道模型, 每条信道建模为包含 6 个相互独立分布的瑞利信道, 幅度按照指数衰减; 系统的最大时延扩展为 5  $\mu$ s, 最大多普勒频移为 15 Hz, 高斯白噪声功率密度为 -5 dBmW。考虑到无线信道在时间上的相关性和资源分配的复杂度, 系统将每 6 个 OFDM 符号构成一个子帧, 在时域上以子帧为单位, 在频域上以子载波为单位进行资源调度。在每个调度时刻, 接收端向基站反馈信道状态信息, 基站结合其他反映用户服务状态的信息进行时频资源的分配和调制编码方式的选择, 并将分配结果通知相应的用户。当无线链路中采用自适应调制编码 (AMC) 和 HARQ 等技术时, 误包率相对于因超时而引起的丢包率来说是很小的。为了简化分析, 仿真中忽略无线链路中误包率的影响。由于在同一个时间片段内, 对时延要求比较严格的业务需要传输更多的数据, 才能保证业务的正常传输。因此, 设未采用业务分集方案的系统中三业务的待传数据量比例均为 15:2:1<sup>[7]</sup>。且在业务分集系统中, 若每个用户都同时传输上述三种业务时, 用户内部三种业务的待传数据量也满足此关系。事实上, 如果系统传输三种业务, 则在业务分集系统中, 会出现两种不同的情况, 即各用户同时传输的业务数相同和各用户同时传输的业务数不同。

#### 3.1 各用户同时传输的业务数相同

假定业务分集系统有 4 用户, 各传输 3 种业务, 且 3 业务的待传数据量满足上述比例关系。对于未采用业务分集方案的系统<sup>[2]</sup>, 4 用户同时各传 3 业务, 则会出现 3 种情况:

1) 有 2 个用户同时传输语音业务, 仿真中称其为算法 1;

2) 有 2 个用户同时传输流媒体业务, 仿真中称其为算法 2;

3) 有 2 个用户同时传输数据业务, 仿真中称其为算法 3。

从图 3 中可以看出, 随着子载波数的增加, 由于文献 [1] 的业务分集方案采用的是拉格朗日极值法, 其对应的系统容量一直是理想化的最大值。但采用本文算法的系统相对于未采用业务分集方案的系统在容量上则有明显的提高, 且随着子载波数的增加, 容量的差距明显增大。在子载波数为 2 048 个时, 本文算法比算法 1 竟提高了 30% 的系统容量。由此可以得出, 本文所提算法能够提高传统系统的容量。假定系统 4 用户的待传数据量比值为 1:1:1:1, 用户内部 3 业务的数据量满足上述关系。从图 4 可以看出, 采用本文算法的业务分集系统相对于文献 [1] 的系统, 其用户的实际传输数据量更接近于 1:1:1:1 比值。从而证明了本文算法相对文献 [1] 更能保证用户的公平性, 满足用户的传输需求。

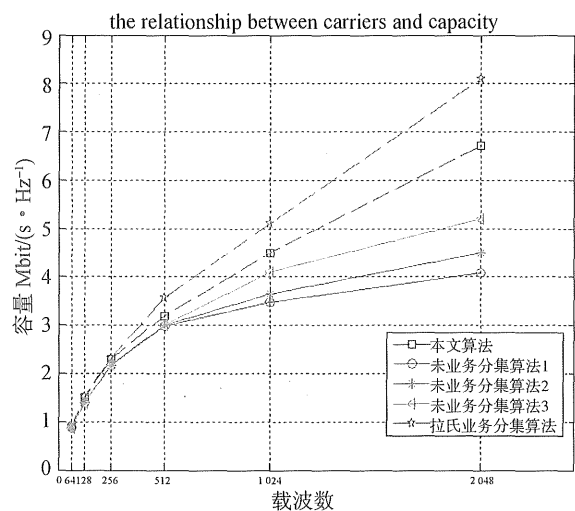


图 3 系统容量的比较 1

Fig. 3 The first comparison of system capacity

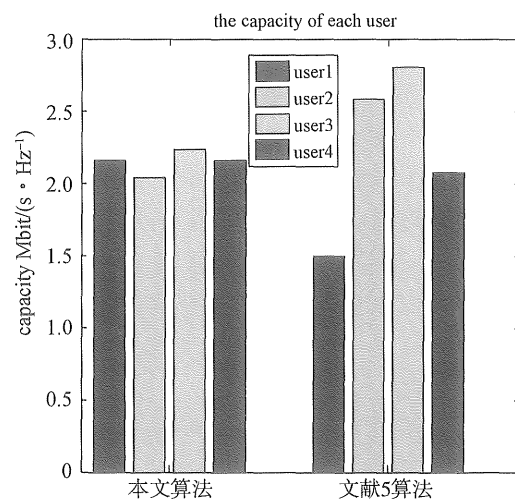


图 4 用户公平性比较 1

Fig. 4 The first comparison of fairness

### 3.2 各用户同时传输的业务数不同

假设业务分集系统中，第 1 个用户只传输 1 种业务，第 2 个用户同时传输 2 种业务，第 3 个用户同时传输 3 种业务。为了分析在 3 用户都对时延要求相对严格或相对宽松时的系统性能，本文就 2 种比较特别的情况进行分析，分别假定了所有用户都传输语音业务（方案 1）和所有用户都传输数据业务（方案 2）。括号里的内容为不同业务的待传数据量比值。

表 2 两种业务传输方案

Table 2 Two schemes of traffic-transmission

用户	方案 1	方案 2
User1	语音	数据
User2	语音、流媒体 (15:2)	数据、流媒体 (1:2)
User3	语音、流媒体、数据 (15:2:1)	数据、流媒体、语音 (1:2:15)

从图 5 中可以看到，3 用户同时各传 3 业务的系统较其他系统在容量方面上有所提高，并随着子载波数的增加，其差距越明显。从而证明了本文算法符合文献 [1] 的结论：业务分集的层次越深，即用户同时传输的业务数越多，产生的分集增益就越大。此外，从方案 1 和方案 2 的容量比较中可以看到，算法给予了对时延要求较严格的业务高优先级，从而满足了业务的 QoS 要求。由于文献 [1] 的算法对业务不进行具体区分，只要确定各用户传输的业务数，系统就只存在一种情况。当用户待传数据量比值为 1:1:1 时，从图 6 中可以看到，无论是方案 1 还是方案 2，3 用户的实际传输数据量都

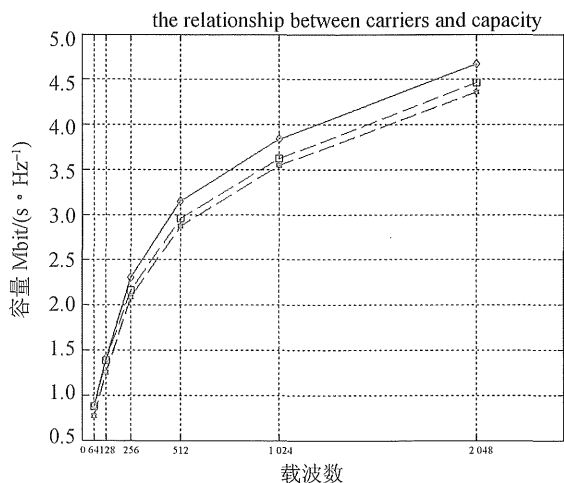


图 5 系统容量的比较 2

Fig. 5 The second comparison of system capacity

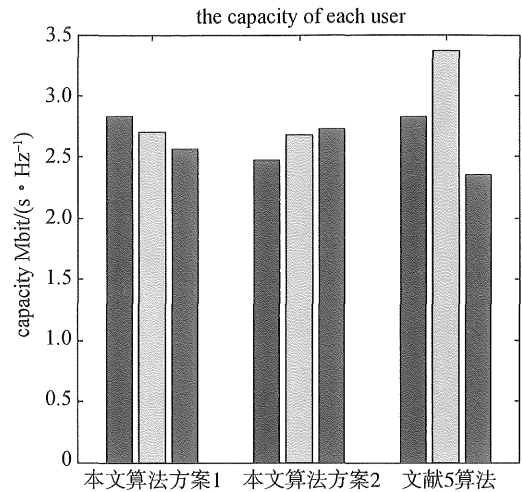


图 6 系统用户公平性比较 2

Fig. 6 The second comparison of fairness

比文献 [1] 算法中的更接近于预先设定的比值。由此可以得出结论，采用本文方案的系统更能保证用户的公平性。

若同一时刻用户传输的业务数不同，且用户的待传数据量比值是除了 1:1:1 之外的情况，考虑到语音业务对时延要求较严格，其需要传输的数据量较大，此时的用户公平性不能从用户的实际传输数据量是否满足待传数据量比值这个方面来衡量。因此，本文算法较适用于所有用户都传输相同种业务的系统。

## 4 结 语

本文提出了在 OFDMA 系统中满足多用户同时传输多业务需求的一种资源调度算法。该算法主要结合业务分集技术和跨层设计思想，分别在 MAC 层对基本单元块进行优先级排序和在物理层进行自适应资源分配。仿真结果表明，本文所提业务分集方案不仅能够产生分集增益，同时具有保证用户公平性的优点。而如何将业务分集技术与 MIMO 技术结合，以实现在提高系统容量方面有更大的突破是下一步有待研究的问题。

### 参考文献：

[1] GUAN Y F, HU A Q. Traffic-diversity-based resource allocation for OFDMA system [J]. Electronics Letters, 2007, 43 (15): 11 - 12.  
 [2] JEONG S S, JEONG D G, JEONG W S. Cross-layer design of packet scheduling and resource allocation in OFDMA wireless multimedia networks [C]. IEEE Vehicular Technology Conference, 2006, 1(1): 309 - 313.

义势函数, 提出了改进算法的人工势场法, 与传统势场函数相比, 引入机器人与目标之间的相对距离, 保证了整个势场仅在目标点全局最小。实验及仿真结果表明: 机器人能跳出局部极小点, 顺利到达目标。

#### 参考文献:

- [1] 韩庆珏, 刘少军, 金燕. 海底采矿移动机器人的避障研究[J]. 机电工程技术, 2006, 35(1): 46 - 46.
- [2] 戴圣伟, 王随平, 罗飞. 基于深海采矿车的避障规划模糊控制器的研究[J]. 湖南工业大学学报, 2009, 23(1): 79 - 82.
- [3] 廖平, 傅杰. 基于遗传算法的深海集矿车避障路径规划方法[J]. 机电工程技术, 2006, 35(3): 40 - 42.
- [4] MASOUD A A, BAYOUMI M M. Robot navigation using the vector potential approach[C]//Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1993.
- [5] MASOUD A A, MASOUD S A. Motion planning in the presence of directional and obstacle avoidance constraints using nonlinear, anisotropic, harmonic potential fields [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, CA, 2000.
- [6] BROOKS R A. A robust layered control system for a mobile robot[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1986, 2(1): 1.
- [7] ELFES A. Sonar - based real - world mapping and navigation [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(3): 249 - 265.
- [8] KHATIB O. Real - time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots in proc [C] // IEEE Int Conf On Robotics and Automation, 1985: 500 - 505.
- [9] 吴晓涛, 孙增圻. 基于网络结构的并行路径规划算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1996, 36(5): 67 - 71.
- [10] MARTINEZ A H, FLUGRAD D R. Collision - free path planning for mobile robots and/or agvs using simulated annealing[J]. Proc of International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1994, 1: 270 - 275.
- [11] 黄炳强, 曹广益. 基于模糊人工势场的移动机器人路径规划[J]. 上海理工大学学报, 2006, 28(4): 347 - 350.
- [12] 吴镜开, 黄远灿, 王世兴. 基于势场法的移动机器人避障路径规划[J]. 微计算机信息, 2007, 23(2): 228 - 230.

(上接第 57 页)

- [3] SHEN Z, ANDREWS J G, EVANS B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional fairness [J]. IEEE Trans Wireless Communication, 2005, 4(6): 2726 - 2737.
- [4] WONG I C, SHEN Z, ANDREWS J G, et al. A low complexity algorithm for proportional resource allocation in OFDMA systems [C] // IEEE SIPS' 04, Austin, USA, 2004, 1: 1 - 6.
- [5] SHEN Z, ANDREWS J G, EVANS B L. Optimal power allocation in multiuser OFDM systems [C] // IEEE Global Communications Conference, December 2003, 1: 337 - 341.
- [6] CHUNG S T, GOLDSMITH A. Degrees of freedom in adaptive modulation: A unified view [J]. IEEE Transactions on Communications, 2001, 49: 1561 - 1571.
- [7] SONG G, LI Y. Cross-layer optimization for OFDM wireless networks: theoretical framework [J]. IEEE Trans Wireless Commum, 2005, 4(2): 614 - 634.
- [8] 杨大成. 移动传播环境 [M]. 北京: 北京机械工业出版社, 2003.
- [9] SONG G, LI Y. Cross-layer optimization for OFDM wireless networks-part II: algorithm development [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2005, 4: 625 - 634.
- [10] CHEN Y F, CHEN J W. A fast subcarrier, bit, and power allocation algorithm for multiuser OFDM-based systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57: 873 - 881.
- [11] HUANG X Z, WU H C, WU Y Y. Novel pilot-free adaptive modulation for wireless OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57: 3863 - 3867.
- [12] HAN Z, JI Z, LIU K. Fair multiuser channel allocation for OFDMA networks using nash bargaining solutions and Coalitions [J]. IEEE Trans Commun, 2005, 53: 1366 - 1376.
- [13] YU G, ZHANG Z, CHEN Y, et al. Subcarrier and bit allocation for OFDMA systems with proportional fairness [C] // IEEE WCNC'06, Las Vegas, USA, 2006, 3: 1717 - 1722.