

# 基于 OFDMA 的无人机群通信链路资源分配算法研究

周凯福, 程伟, 窦立超, 彭岑昕

(空军预警学院, 武汉, 430000)

**摘要** 针对基于 OFDMA 的无人机群通信链路资源分配中系统容量与用户公平度之间的矛盾, 提出了一种新的资源分配算法。该算法主要由子载波分配和功率分配两部分组成。该算法在子载波分配过程中, 每个子载波等功率分配, 通过设置公平度门限确保在最大化系统容量时兼顾用户公平度; 在用户功率分配过程中, 采用基于灰狼算法的功率寻优策略, 通过全局搜索实现用户间的功率分配。仿真结果表明, 文中提出基于灰狼算法的功率分配方法具有较好的稳健性与寻优能力, 即使在用户数较多的情况下, 仍然能够在最大化系统容量的同时具有较高的用户公平度, 并且还可通过设置公平度门限的大小, 灵活地调整系统容量与用户公平度之间的关系。

**关键词** 无人机群; 正交频分多址; 资源分配; 公平度门限; 灰狼算法

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.06.005

**中图分类号** TN914 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)06-0027-06

## A Resource Allocation Algorithm of UAV Group Communication Link Based on OFDMA

ZHOU Kaifu, CHENG Wei, DOU Lichao, PENG Cenxin

(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** In view of the contradiction between system capacity and user fairness in the resource allocation of UAV-based communication links based on OFDMA, a new resource allocation algorithm is proposed. The algorithm is mainly composed of two parts, i. e. subcarrier allocation and power allocation. In the subcarrier allocation process, each subcarrier is allocated by equal power, and the fairness threshold is set to ensure that the user fairness is taken into account when maximizing the system capacity; In the process of user power allocation, the power optimization strategy based on the gray wolf algorithm is adopted, and the power allocation between users is realized through global search. The simulation results show that the proposed power allocation method based on gray wolf algorithm is characterized by robustness and optimization ability. Even in the case of a large number of users, the method can still maximize the system capacity while having high user fairness. At the same time, the relationship between system capacity and user fairness can also be flexibly adjusted by setting the size of the fairness threshold.

**Key words:** UAV group; orthogonal frequency division multiple access; resource allocation; fairness threshold; wolf group algorithm (GWO)

**收稿日期:** 2019-04-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(61502522)

**作者简介:** 周凯福(1995—), 男, 山东蓬莱人, 硕士生, 主要从事通信多址接入技术研究。E-mail: 2503508624@qq.com

**引用格式:** 周凯福, 程伟, 窦立超, 等. 基于 OFDMA 的无人机群通信链路资源分配算法研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(6): 27-32. ZHOU Kaifu, CHENG Wei, DOU Lichao, et al. A Resource Allocation Algorithm of UAV Group Communication Link Based on OFDMA[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(6): 27-32.

军用无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)在现代战场上发挥越来越重要的作用,成为各国发展的军事技术热点之一<sup>[1-2]</sup>。其中无人机通信系统是无人机设计中的关键问题之一,由于航空无线信道具有多径衰减、多普勒频移等特性,传统的单载波通信会导致无人机通信性能大打折扣,而作为多载波传输的正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术,因具有频谱利用率高、对抗频率选择性衰落强、实现简单等优点广泛应用于无线通信网络中<sup>[3-5]</sup>,并且当前已经有很多文献证明了基于 OFDM 技术的无人机通信链路具有良好的通信性能<sup>[6-8]</sup>。

针对无人机群执行作战任务时,可采用基于正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access, OFDMA)的多址接入技术。OFDMA 允许不同无人机用户共享同一个 OFDM 符号,并且可以根据各个无人机用户的信道状态信息,动态地把带宽以及功率资源分配给各个用户,从而保证用户服务质量以及实现系统资源的优化利用。根据系统优化目标不同,主要基于速率自适应(Rate Adaption, RA)准则和余量自适应(Margin Adaptive, MA)准则<sup>[9]</sup>,前者是在总功率固定的条件下使系统容量达到最大化,后者则是在用户速率固定的条件下使总的发射功率达到最小化。因此基于 OFDMA 的无人机通信链路资源分配算法研究,对提高无人机通信链路性能和作战效能具有重要意义。

迄今为止,已有较多文献对 OFDMA 系统自适应资源分配进行了研究。文献[10]提出了基于比例速率约束条件下系统容量最大化算法,该算法具有较高的用户间公平性,但该算法涉及求解非线性方程,计算复杂度较高,并且该算法只适用于高信噪比信道条件;文献[11]在文献[10]基础上进行了改进,将非线性求解问题转为线性求解问题,虽然改进算法降低了运算复杂度并且提高了系统容量,但是牺牲了用户公平性;文献[12]提出了一种基于鱼群算法的资源分配方案,该算法虽然提高了系统容量,但该算法的用户公平度随着用户数的增加逐渐降低;文献[13]假设每个用户分配的子载波数的比率近似等于各用户数据速率之比,在实际应用中具有一定的局限性;文献[14]提出了一种资源分配算法,该算法可以提高系统的传输容量,同时也能兼顾用户间的公平度,但该算法不能根据用户的需求对系统容量与用户公平度进行灵活调整;文献[15]提出一种加速的多种群自适应免疫优化子载波快速分配算法,但该算法未考虑实际中用户间公平度问题。

针对上述大多算法不能很好兼顾用户公平性与系统传输容量最大化之间的关系,本文提出一种适用于 RA 准则的资源分配算法,该算法由子载波分配和功率分配两部分组成。子载波分配过程中采用了基于公平度门限的系统容量最大化的子载波分配算法,当满足用户公平度门限时,最大化系统的传输容量,当低于用户公平度门限时,优先将子载波分配给当前容量最低的用户;在功率分配过程中采用了基于灰狼算法(Grey Wolf Optimizer, GWO)的分配方案,通过定义合适的适应度函数,经过多次搜索迭代得到最优功率分配结果,最终在保证用户公平度的前提下,实现系统容量最大化。

## 1 系统模型

无人机群下行链路 OFDMA 系统模型如图 1 所示<sup>[16]</sup>。各无人机用户首先根据导频独立进行信道估计,并将信道估计结果通过反馈信令发送至指挥控制中心,然后通过资源分配算法自适应地对各个无人机用户进行子载波和功率分配,然后通过 IFFT 变换以及加循环前缀(Cyclic Prefix, CP)等处理发送至无线衰落信道,而接收端则经过去 CP 以及 FFT 变换等处理,根据发送端各个用户的分配信息实现解调。文中假设各个用户的信道估计良好,并且在各用户信道增益变化前实现资源的分配。

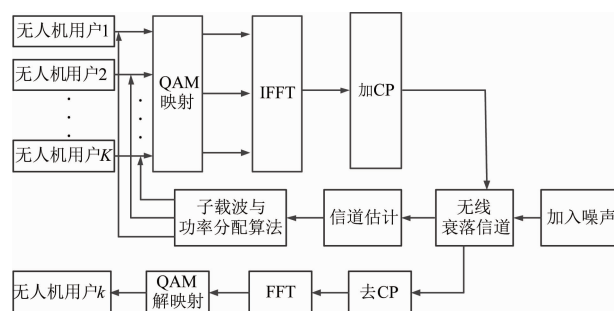


图1 无人机群下行链路 OFDMA 系统模型

本文系统中,假设  $N$  个子载波分配给  $K$  个用户,信道带宽为  $B$ ,发射总功率为  $P_{\text{tot}}$ ,噪声功率谱密度为  $N_0$ ,则高斯白噪声功率为  $\sigma^2 = N_0 B/N$ ,用户  $k(1 \leq k \leq K)$  在子载波  $n(1 \leq n \leq N)$  上的信道增益为  $g_{k,n}$ ,用户  $k$  在子载波  $n$  上的功率分配为  $p_{k,n}$ ,则用户  $k$  在子载波  $n$  上的接收信噪比为  $\gamma_{k,n} = p_{k,n} g_{k,n}^2 / \sigma^2$ ,系统目标误码率为 BER,则系统信噪比间隔为  $\Gamma = -\ln(5\text{BER})/1.6$ <sup>[10]</sup>。文中的分配算法基于 RA 准则,系统目标函数与约束条件如式(1)所示<sup>[10]</sup>:

$$\text{target: } \max_{p_{k,n}} \frac{B}{N} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N c_{k,n} \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_{k,n}}{\Gamma} \right)$$

$$\text{C1: } c_{k,n} \in \{0, 1\} \quad \forall k, n$$

$$\begin{aligned}
& \text{C2: } \sum_{k=1}^K c_{k,n} = 1 \quad \forall n \\
& \text{s. t. : } \text{C3: } p_{k,n} \geq 0 \quad \forall k, n \\
& \text{C4: } \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{k,n} \leq P_{\text{tot}} \\
& \text{C5: } R_i : R_j = \theta_i : \theta_j \quad \forall i, j \in \{j=1, 2, \dots, K\}, i \neq j
\end{aligned} \quad (1)$$

式中: C1 中  $c_{k,n}$  表示子载波  $n$  是否分配给用户  $k$ , 若是则  $c_{k,n}=1$ , 否则  $c_{k,n}=0$ ; C2 表示每个子载波只能分配给一个用户使用; C3 与 C4 表示每个用户分配的功率大于等于 0, 并且所有用户分配的功率之和不高出系统发射的总功率; C5 中参数集  $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K\}$  是一组预定义的比例常数, 其中  $\theta_K$  是正的实数, 用来保证各个用户对公平性的要求, 该约束条件主要考虑到在无人机集群运动中主要分为领航机与跟随机<sup>[17-18]</sup>, 而领航机的传输速率要求高于跟随机, 其中用户  $k$  的传输速率表示为:

$$R_k = \frac{B}{N} \sum_{k=1}^N c_{k,n} \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_{k,n}}{\Gamma} \right) \quad (2)$$

## 2 基于公平度门限的子载波分配算法

定义用户公平度  $F$  如式(3)所示<sup>[12]</sup>:

$$F = \left( \sum_{k=1}^K \frac{R_k}{\theta_k} \right)^2 / K \sum_{k=1}^K \left( \frac{R_k}{\theta_k} \right)^2 \quad (3)$$

式中:  $F \in (0, 1]$ , 随着  $R$  的增大, 用户间的公平性也逐渐增加, 当  $R_1/\theta_1 = R_2/\theta_2 = \dots = R_K/\theta_K$  时, 公平度  $F$  取最大值 1, 此时能够保证用户间的绝对公平。由于当系统传输容量达到理想最大化时往往会极大降低用户间的公平度, 而当用户公平度达到理想情况时往往又会极大降低系统的传输容量。针对系统传输容量与用户公平度之间的矛盾, 本文通过设置公平度门限  $\zeta$  来合理灵活地调整系统容量与用户间公平度之间的关系, 这样可以保证在分配过程中既保证了用户间的公平度, 又使系统容量实现最大化。

子载波分配的具体算法步骤如下:

1) 初始化: 设置用户公平度门限  $\zeta$ , 假设用户集合  $A_k = \{1, 2, \dots, K\}$ , 子载波集合  $\Omega_N = \{1, 2, \dots, N\}$ , 用户初始速率  $R_k = 0 (k=1, 2, \dots, K)$ , 各子载波平均分配功率  $p = P_{\text{tot}}/N$ ,  $H_{k,n}$  表示用户  $k$  在子载波  $n$  上的信道增益;

2) 首轮分配中, 依次给每个用户分配信道增益最好的子载波。对于用户  $k$ , 找出满足  $H_{k,n} \leq H_{k,i}$  的子载波  $i$ , 则将子载波  $i$  分配给用户  $k$ , 然后将该子载波从子载波集中剔除,  $\Omega_N = \Omega_N - \{i\}$ , 并更新用户  $k$  的速率  $R_k$ , 其中  $R_k = R_k + \frac{B}{N} \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_{k,n}}{\Gamma} \right)$ ;

3) 当  $\Omega_N \neq \emptyset$  (空集) 时, 计算当前用户公平

度  $F$ :

a. 若  $F \geq \zeta$ , 找到  $H_{k,n} \leq H_{k,i} (\forall k \in \Omega_k, i \in \Omega_N)$  的子载波  $i$ , 则将子载波  $i$  分配给用户  $k$ , 然后将该子载波从子载波集中剔除,  $\Omega_N = \Omega_N - \{i\}$ , 并更新用户  $k$  的速率  $R_k$ , 其中  $R_k = R_k + \frac{B}{N} \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_{k,n}}{\Gamma} \right)$ ;

b. 若  $F < \zeta$ , 找到  $R_k/\theta_k \leq R_i/\theta_i$  的用户  $k$ , 并找出满足  $H_{k,n} \leq H_{k,i}$  的子载波  $i (i \in \Omega_N)$ , 则将子载波  $i$  分配给用户  $k$ , 然后将该子载波从子载波集中剔除,  $\Omega_N = \Omega_N - \{i\}$ , 并更新用户  $k$  的速率  $R_k$ , 其中  $R_k = R_k + \frac{B}{N} \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_{k,n}}{\Gamma} \right)$ 。

4) 当  $\Omega_N = \emptyset$  (空集) 时, 各用户子载波分配完毕。

当前只进行等功率分配的子载波算法(EQ), 虽然可能实现较大的系统传输容量, 但在实际中由于各个无人机用户的信道情况不同, 等功率分配并不能实现系统分配的最优, 因此需要通过功率分配进一步平衡系统容量与用户公平度。

## 3 基于 GWO 的功率分配算法

Seyedali Mirjalili 于 2014 年提出了一种新的智能优化算法——灰狼算法(GWO)<sup>[19]</sup>。GWO 算法具有良好的全局极值搜索能力, 并且具有参数设置少、对初值选择不敏感、迭代速度快、鲁棒性强等优点, 本文采用基于灰狼算法的功率寻优策略, 通过全局搜索可实现用户间的功率分配。

GWO 算法模拟了灰狼在自然界中的领导层次和捕猎机制。GWO 算法中设置 4 种类型的  $\alpha$  狼、 $\beta$  狼、 $\delta$  狼、 $\omega$  狼, 对应的社会等级地位依次降低。假设  $\alpha$  狼所处位置  $\text{pos}_\alpha$  为对应最佳候选解  $\text{sco}_\alpha$ ,  $\beta$  狼与  $\delta$  狼对猎物的潜在位置有较好的了解, 并令其所处位置分别为  $\text{pos}_\beta$ 、 $\text{pos}_\delta$ , 对应的次优候选解表示为  $\text{sco}_\beta$ 、 $\text{sco}_\delta$ 。狼群在捕猎过程中会逐渐包围猎物, 其数学模型如下:

$$\mathbf{D} = |\mathbf{C}\mathbf{X}_p(t) - \mathbf{X}(t)| \quad (4)$$

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{X}_p(t) - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D} \quad (5)$$

式中:  $t$  表示当前迭代;  $\mathbf{X}_p(t)$  表示猎物的位置向量;  $\mathbf{X}(t)$  表示狼的位置向量;  $\mathbf{A}$  与  $\mathbf{C}$  表示系数向量。  $\mathbf{A}$  与  $\mathbf{C}$  的计算方法如下:

$$\mathbf{A} = 2a \cdot \mathbf{r}_1 - a \quad (6)$$

$$\mathbf{C} = 2 \cdot \mathbf{r}_2 \quad (7)$$

式中:  $a$  分量在迭代过程中从 2 线性减少到 0,  $\mathbf{r}_1$ 、 $\mathbf{r}_2$  是  $[0, 1]$  的随机向量。因此  $\mathbf{A}$  与  $\mathbf{C}$  能够影响狼群接近猎物或者偏离猎物, 即  $\mathbf{A}$  与  $\mathbf{C}$  是决定 GWO 算法

能够具有良好全局极值搜索能力的关键因素。

在 GWO 算法中,整个搜索过程由社会等级地位最高的  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$  狼引导,而  $\omega$  狼则根据  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$  狼更新位置,其计算公式见式(8)、式(9), $\omega$  狼群位置更新示意图如图 2 所示。当条件符合设定要求时,狼群开始捕杀猎物。

$$\begin{aligned} D_\alpha &= |C_1 \cdot X_\alpha(t) - X(t)|, X_1 = X_\alpha - A_1 \cdot (D_\alpha) \\ D_\beta &= |C_2 \cdot X_\beta(t) - X(t)|, X_2 = X_\beta - A_2 \cdot (D_\beta) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} D_\delta &= |C_3 \cdot X_\delta(t) - X(t)|, X_3 = X_\delta - A_3 \cdot (D_\delta) \\ X(t+1) &= \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \end{aligned} \quad (9)$$

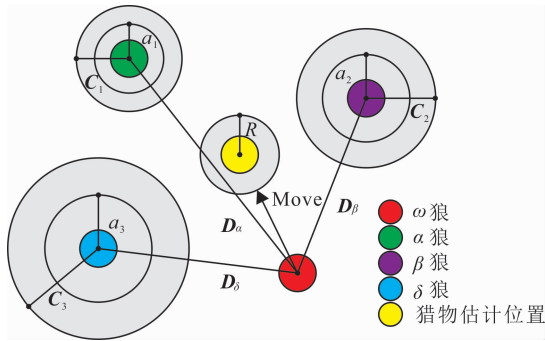


图 2 GWO 算法中狼群位置更新示意图

基于 GWO 算法进行功率分配时, $\omega$  狼的位置坐标表示为  $\text{pos}_\omega = [P_1, P_2, \dots, P_K]$ ,其中  $P_k$  ( $1 \leq k \leq K$ ) 表示第  $k$  个用户被分配的子载波的功率和,假设  $N_k$  为第  $k$  个用户被分配的子载波个数,为降低计算的复杂度,则使每个用户分配的所有子载波等功率分配,即:

$$P_{k,n} = P_k / N_k \quad (10)$$

为兼顾系统容量与用户间的公平度,定义 GWO 算法的适应度函数如下:

$$\text{fitness} = \begin{cases} (\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N_k} \log_2(1 + p_{k,i} H_{k,i})) F, & F \geq \xi \\ 0, & F < \xi \end{cases} \quad (11)$$

该适应度函数能够保证当用户间公平度满足设置的门限时,使系统的传输容量达到最大,而当用户间公平度不满足设置的门限时,即当解值不在可行域内时,适应度函数设置为 0,通过继续更新  $\omega$  狼的位置来获得最优的功率分配方案。

基于 GWO 的功率分配算法的具体步骤如下:

1) 初始化:公平度门限设置为  $\xi$ , $\omega$  狼的数量为  $m$ ,初始化  $\omega$  狼的位置  $\text{pos}_\omega = [P_1, P_2, \dots, P_K]$ ,其中  $P_k = P_k / \sum_{k=1}^K P_k$  (归一化功率),能够保证初始化每只  $\omega$  狼的位置分量均在可行域内;

2) 根据式(10)计算各个子载波分配的功率,根

据式(2)计算各个用户的速率,根据式(11)计算每只  $\omega$  狼的适应度  $\text{sco}_\omega$ ;

3) 将适应度最大的 3 只  $\omega$  狼的位置  $\text{pos}_\omega$  依次赋值给  $\alpha$  狼  $\text{pos}_\alpha$ 、 $\beta$  狼  $\text{pos}_\beta$ 、 $\delta$  狼  $\text{pos}_\delta$ ,此时  $\alpha$  狼的位置  $\text{pos}_\alpha$  为当前最优分配结果, $\text{sco}_\alpha$  为当前最大适应度值;

4) 位置更新:根据式(6)与(7)更新系数向量  $A$  与  $C$ ,根据式(8)更新  $X_1$ 、 $X_2$  与  $X_3$ ,根据式(9)更新  $m$  只  $\omega$  狼的位置  $\text{pos}_\omega$ ,为保证每只  $\omega$  狼更新后的位置分量均在可行域内,仍对  $\text{pos}_\omega$  进行归一化处理;

5) 如果未达到最大迭代次数则转至 2),否则  $\text{pos}_\alpha$  为最优分配结果。

## 4 仿真实验与结果分析

本文 OFDMA 系统选择在 6 径莱斯信道条件下进行仿真,无人机空地通信中最大多普勒频移一般设置为 200 Hz,莱斯因子为 15 dB<sup>[20]</sup>,假设系统总带宽为 1 MHz,子载波数为 64,系统发射总功率为 1 W,目标误码率为  $10^{-3}$ ,信噪比间隔为 3.3,系统无人机用户数的变化范围为 2~16,变化间隔为 2,每组用户进行 15 000 次信道仿真。基于 GWO 的功率分配算法中设置  $\omega$  狼的数量  $\text{count}=3$ ,最大迭代次数  $\text{int\_max}=80$ , $\omega$  狼位置分量上限设置为 1,下限设置为 0。将本文算法与 Shen 算法<sup>[8]</sup>和 Wong 算法<sup>[9]</sup>进行仿真性能对比。

### 4.1 基于 GWO 功率分配算法的收敛性能

前文中要求在各用户信道增益变化前实现资源的分配,因此 GWO 算法的收敛性快慢对 OFDMA 系统性能具有重要意义。图 3 为基于 GWO 的功率分配算法迭代过程图,其仿真条件为用户数  $k=8$ ,公平度门限  $\xi=0.999$ 。

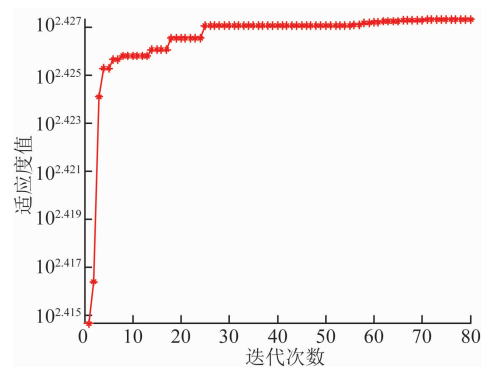


图 3 基于 GWO 的功率分配算法迭代过程

由图可知仅需迭代约 40 次即可得到最优功率分配结果,这是由于系数向量  $A$  与  $C$  的影响,使得基于 GWO 的功率分配过程既没有因过早收敛而陷

入局部最优,也没有因收敛过慢而降低时效性,这也体现出 GWO 算法具有迭代速度快、良好的全局搜索能力的优点。

#### 4.2 系统容量仿真结果分析

图 4 为某一时刻不同无人机用户在不同子载波上信道增益图,可以看出当前时刻用户 2、5 等信道条件良好,而用户 7、8、10 等信道条件较差,只有通过 OFDMA 自适应资源分配技术才能够在保证用户间公平性的基础上,实现传输容量最大化。图 5 显示了不同算法条件下的系统容量对比图,由图可知,3 种算法的系统容量均随着用户数的增加而提高,这是由于多用户分集增益带来的效应。当用户数大于 6 时,本文提出的算法系统容量大于 Wong 算法与 Shen 算法, $\xi=0.999$  的等功率分配的子载波算法(EQ)系统容量稍大于基于 GWO 的功率分配,并且当放宽公平度门限  $\xi$  时, $\xi=0.950$  时的系统容量较  $\xi=0.999$  会有进一步的提高,可见本文算法可以灵活地调整系统容量与用户间公平度之间的关系。

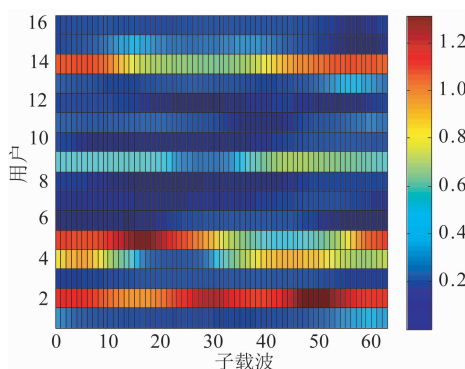


图 4 不同用户在各个子载波的信道增益情况

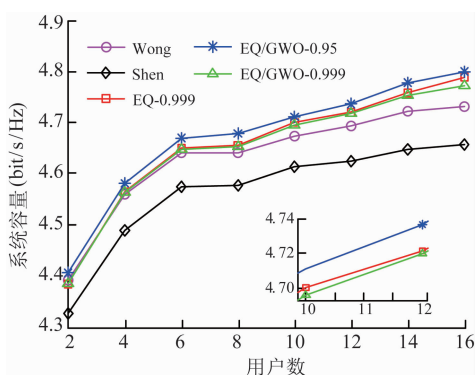


图 5 不同算法条件下系统容量性能曲线

#### 4.3 系统公平度仿真结果分析

图 6 为  $\xi$  取 0.999 时的本文算法(EQ/GWO)、等功率分配的子载波算法(EQ)、Wong 算法和 Shen 算法的用户公平度性能曲线。可以看出随着用户数增加,Wong 算法的用户间公平度逐渐降低,结合图 5 说明了 Wong 算法在提高系统容量时牺牲了一定用户公平度;Shen 算法随着用户数的增加始终保持

着较高的用户公平度;当  $\xi$  取 0.999 时,本文的算法用户间公平度虽然略低于 Shen 算法,但优于 Wong 算法与等功率分配的子载波算法(EQ)。图 7 和图 8 直观描述了用户速率归一化比例特性,用户间理想速率比为  $R_1 : R_2 : \dots : R_7 : R_8 = 2 : 1 : \dots : 1 : 1$ ,  $R_1 : R_2 : R_3 : \dots : R_{14} : R_{15} : R_{16} = 2 : 2 : 1 : \dots : 1 : 1 : 1$ , 其中比率高的代表领航机,比率低的代表跟随机,图中 Gamma 为理想比例特性,可以看出本文算法与 Shen 算法比较接近理想特性,而 Wong 算法相对较差。

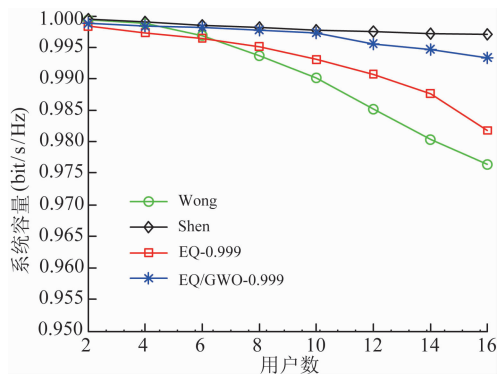


图 6 不同算法条件下多用户间公平度性能曲线

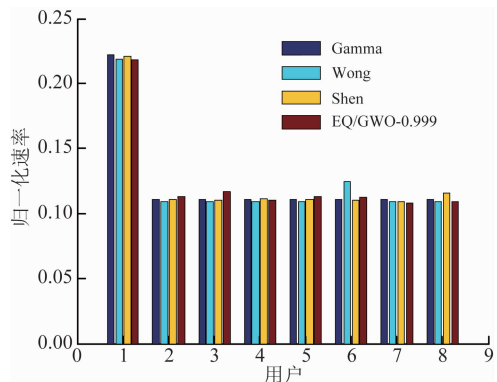


图 7 不同算法条件下 8 用户间速率比例特性

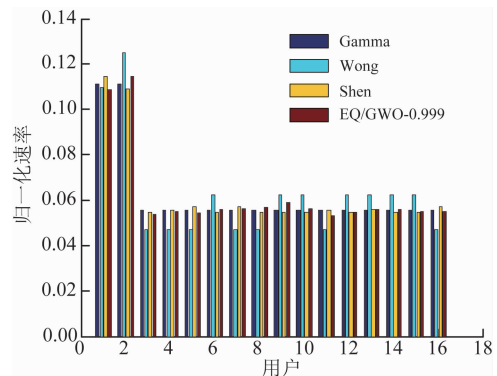


图 8 不同算法条件下 16 用户间速率比例特性

## 5 结语

本文针对基于 OFDMA 的无人机群通信链路资源分配问题,提出了一种基于公平度门限的子载



波分配和基于 GWO 的功率分配方案。仿真结果表明,本文提出的算法能够较好地兼顾系统容量与用户间公平度,还可通过设置公平度门限  $\xi$  的大小,灵活地调整系统容量与用户间公平度之间的关系,为基于 OFDMA 的无人机群通信系统自适应资源分配问题提供了一条有效解决途径。

#### 参考文献(References):

- [1] 祁圣君, 井立, 王亚龙. 无人机系统与发展趋势综述[J]. 飞航导弹, 2018(4):17-21.  
QI S J, JING L, WANG Y L. Overview of UAV Systems and Development Trends[J]. Winged Missiles Journal, 2018(4):17-21. (in Chinese)
- [2] 关中锋. 美军无人机通信系统发展现状及趋势[J]. 通信技术, 2014,47(10):1109-1113.  
GUAN Z F. Current Status and Trend of US Military UA Communication System[J]. Communication Technology, 2014,47(10):1109-1113. (in Chinese)
- [3] ALFA A S, MAHARAJ B T, LALL S, et al. Mixed-Integer Programming Based Techniques for Resource Allocation in Underlay Cognitive Radio Networks [J]. Journal of Communications and Networks, 2016, 18(5):744-761.
- [4] HU H, ZHANG H, LIANG Y C. On the Spectrum and Energy-Efficiency Tradeoff in Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016,64(2): 490-501.
- [5] DAI L L, WANG Z C, YANG Z X. Time-Frequency Training OFDM with High Spectral Efficiency and Reliable Performance in High Speed Environments[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2012,30(3):695-707.
- [6] 邹春海, 刘广武. OFDM 在无人机通信中的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2007,19(10):2293-2295.  
ZOU C H, LIU G W. Simulation and Research of OFDM Technique in UAV Communication[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(10):2293-2295. (in Chinese)
- [7] 李晓明, 王凤春. MIMO-OFDM 技术在无人机数据链路中的仿真应用[J]. 兵工自动化, 2014,33(5):42-46.  
LI X M, WANG F C. Simulation of MIMO-OFDM Technique in UAV Data Link[J]. Ordnance Industry Automation, 2014,33(5):42-46. (in Chinese)
- [8] XIN G, YANG H. Joint Subcarrier and Power Allocation for Multi-UAV Systems[J]. China Communication, 2019, 13(1):47-56.
- [9] 袁建国, 张芳, 王竟鑫. 基于公平度和惩罚函数的 OFDMA 自适应资源分配[J]. 系统工程与电子技术, 2018,40(2): 427-434.  
YUAN J G, ZHANG F, WANG J X. OFDMA Adaptive Resource Allocation Based on Fairness and Penalty Function[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018,40(2): 427-434. (in Chinese)
- [10] SHEB Z, ANREWS J G, EVANS B L. Optimal Power Allocation in Multiuser OFDM Systems [C]// Proceedings of IEEE Global Communications Conference. [S. l.]:IEEE,2003:337-341.
- [11] WONG I C, SHEN Z K, EVANS B L, et al. A Low Complexity Algorithm for Proportional Resource Allocation in OFDMA Systems. [C]//Proceeding of IEEE Workshop on Signal Processing Systems. Austin TX, USA;IEEE,2004:2056-2060.
- [12] 汪照, 李有明, 陈斌, 等. 基于鱼群算法的 OFDMA 自适应资源分配[J]. 物理学报, 2013,62(12):509-515.  
WANG Z, LI Y M, CHENG B, et al. OFDMA Adaptive Resource Allocation Based on Fish Swarm Algorithm[J]. Acta Physica Sinica, 2013,62(12):509-515. (in Chinese)
- [13] SHARMA N, MADHUKUMAR A S. Genetic Algorithm Aided Proportional Fair Resource Allocation in Multicast OFDM Systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2015, 61(1):16-29.
- [14] JIANG L J, SONG R F. A Low-Complexity Resource Allocation Scheme for OFDMA Multicast Systems with Proportional Fairness[J]. China Communication, 2018,12(1):1-11.
- [15] 郑航, 郭建新, 周东旭. NC-OFDM 多种群自适应免疫优化子载波分配算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2015,16(3):77-81.  
ZHENG H, GUO J X, ZHOU D X. Multi-Colony Adaptive Immune Optimization Based Subcarrier Allocation Algorithm in NC-OFDM[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2015,16(3):77-81. (in Chinese)
- [16] YIN Z D, ZHUANG S F, WU Z L. Rate Adaptive Based Resource Allocation with Proportional Fairness Constraints in OFDMA Systems[J]. Sensor, 2015, 15(10):24996-25014.
- [17] 李朝旭, 刘忠, 尹晖. 多无人机协同运动的虚拟队形制导控制[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(6): 1220-1224.  
LI C X, LIU Z, YIN H. Cooperative Motions Control Method Guided by Virtual Formations for Multi-UAVs [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(6):1220-1224. (in Chinese)
- [18] 景晓年, 梁晓龙, 孙强. 基于规则的无人机集群运动控制[J]. 计算机仿真, 2016,33(9):50-54.  
JING X N, LIANG X L, SUN Q. Motion Control of UAVs Based on Rules[J]. Communication Simulation, 2016,33(9):50-54. (in Chinese)
- [19] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey Wolf Optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014,69(5): 46-61.
- [20] HAAS E. Aeronautical Channel Modeling[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(2): 254-264.

(编辑:徐楠楠)