

多用户多速率 OFDM 中的子载波分配和功率控制

武林俊 李燕文

(河南工业大学信息科学与工程学院 郑州 450001)

摘要:该文基于对多用户多速率正交频分复用(OFDM)系统性能的分析,提出了子载波分配和功率控制方案。在采用 P-QAM 调制的下行链路中,如已知所有子信道的信息状态(CSI),在满足每一个用户的服务质量的前提下,先给固定速率的用户分配最优子信道,再给变速率的用户按照子信道链路增益最大化分配剩余的子信道;每一个用户分配的子信道数目,由链路增益的取值区间决定。信号发射功率则按照“注水”法则分配:链路增益大的子信道分配的功率大,链路增益小的子信道分配的功率小,则系统的总传输速率可达最大。仿真结果证明了该文提出的分配方案优于 Jang 的分配方案。

关键词:移动通信; OFDM; 子载波分配; 功率控制

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)08-1911-05

Sub-carrier Allocation and Power Control in Multi-user Multi-rate OFDM Systems

Wu Lin-jun Li Yan-wen

(School of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on the performance analysis of the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) system, this paper proposes a scheme for sub-carrier allocation and power control in a multi-user multi-rate OFDM system. For the downlink transmission employing P-QAM, if all Channel State Information (CSI) are known, under the constraint of the Quality of Service (QoS) of each user being satisfied, the CBR (Constant Bit Rate) users are allocated with channels prior to the VBR (Variable Bit Rate) users. The VBR users are allocated with remain channels with the rule of link gain maximization. Signal powers are assigned with the water-filling policy: the larger is the link gain of the sub-channel, the more power is assigned. Simulation results show that the proposed sub-carrier allocation and power distribution scheme can achieve higher system capacity than Jang's method.

Key words: Mobile communications; OFDM; Sub-carrier allocation; Power control

1 引言

近年来,无线多媒体业务的迅猛发展对无线传输系统的可靠性和速率要求大大提高。然而高速数据传输受到码间串扰(ISI)的影响,数据的传输速率越高,码片之间的时隙越小,码间串扰就越厉害,对系统的影响也越严重。产生码间串扰的根本原因是由无线链路传播的多径效应造成的。为了解决这一问题,常需要在时频域上对信号进行变换,或在接收端对信道进行均衡。正交频分多址(OFDM)技术是现阶段人们比较看好的解决上述问题的一种方法。

OFDM 是后三代或第四代无线通信的核心技术。它把一个高速数据在不同的子载波上并行传输,这样每一个子载波上的数据传输速率远小于原始速率。如果插入循环前缀,使每一 OFDM-QAM 符号的传输时间都大于最大的多径时延,从而完全消除了 ISI。为了提高频谱的利用率,相邻子载波有部分重叠,子载波之间相互正交。为了同步子载波调

制信号,在发射端采用逆快速傅里叶变换(IFFT),在接收端对信号进行傅里叶正变换,再经过并/串转换,就能恢复出原始数据^[1-3]。

在多用户 OFDM 系统中,由于用户处于不同的位置,每一个用户可能遭受不同的信道衰落。所以对于某个子信道所有用户都同时处于深度衰落的几率很小,在实际情况中可以不予考虑。这就产生了对不同的用户、分配不同的子信道的问题。文献[4-8]都对这一问题进行了讨论。文献[5,7]针对固定速率的用户,目标函数为系统的总功率最小。它给出了子信道分配的判决准则,但这一准则的理论依据有待进一步研究,且未给出物理意义。文献[4,6,8]针对变速率用户,目标函数为系统的总速率(系统容量)最大,证明了把某子信道独立地分配给与之相连的链路增益最大的用户,而其它用户不得再占用此子信道时,系统容量最大。本文进一步考虑在系统中有不同服务质量的用户,有部分固定速率用户,部分变化速率用户的情况。

第 2 节给出了 OFDM 系统模型,对问题进行了描述,给出了目标函数和约束条件。第 3 节给出了不同种类业务子

信道分配的一般准则并作了证明。第4节给出了优化功率控制方案。第5节和第6节分别是仿真结果和结论。

2 模型

不失一般性,考虑下行链路多用户、多速率 OFDM 系统,如图1所示。 $\{b_k\}$ 表示第 k 个用户传输的数据符号,经过串/并转换后经 P-QAM 调制再分配其功率值,再经过 IFFT、并/串转换、插入循环前缀,由基站发射出去。解调过程是以上过程的逆。当某一个子信道分配给某个特定用户时,其余的用户将不得使用此信道。本文假设系统有 K 个固定速率的用户,每个固定速率的用户的传输速率 R_i ($i=1,2,\dots,K$);同时有 N 个可变速率的用户,每个用户的传输速率 r_j ($j=1,2,\dots,N$), $r_j \in (0, r_{\max})$ 。总的用户数为 $K+N$ 。 $s_{g,m}$ 表示分配给用户 g 第 m 个子载波的传输功率。假设每一个子载波的带宽远小于信道的相干带宽,每一个子载波经历非频率选择性衰落。由于插入了循环前缀,本文只考虑路径和阴影衰落而不考虑多径效应。对于发射端,假设已知所有用户所有子载波的信道状态信息(CSI),采用子信道分配方案和功率控制技术给每一个子载波的每 OFDM 符号分配适当的比特数和功率值。定义系统的容量为整个系统的总速率之和。当每一个用户的服务质量得到满足时,要求系统容量达到最大。

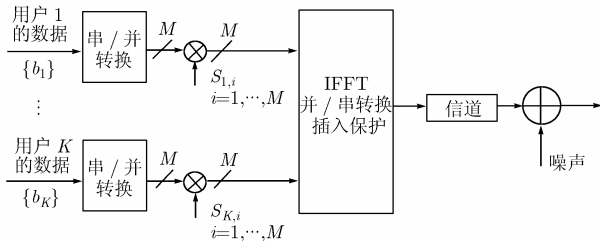


图1 OFDM 系统前向链路发射结构方框图

假设信号经过信道时引入加性高斯白噪声(AGWN),系统的总带宽为 B ,那么每个子载波的带宽为 $B_m = 2B / ((\lg P)(K+N+1)) \approx 2B / ((\lg P)(K+N))$,噪声方差为 $\sigma^2 = N_0 B_m$, N_0 是噪声的功率谱密度,原始数据是均值为0,方差为1的随机变量。在接收端,用户 g 的第 m 个子载波的信干比(SIR) $\gamma_{g,m}$ 为

$$\gamma_{g,m} = \frac{s_{g,m} |\alpha_{g,m}|^2}{N_0 B_m} \quad (1)$$

其中 $\alpha_{g,m}$ 表示基站与用户 g (第 m 个子信道)之间的复衰落。

采用P-QAM调制和理想相位检测,用户 g 的第 m 个子载波信号的误码率BER的上限与 $\gamma_{g,m}$ 的关系为^[6]

$$\text{BER} \leq \frac{1}{5} \exp\left(\frac{-1.5\gamma_{g,m}}{2^{q_{g,m}} - 1}\right) \quad (2)$$

其中 $q_{g,m}$ 为每一个数据符号包含的比特数。对式(2)进行变形可得

$$q_{g,m} \leq \log_2\left(1 + \frac{\gamma_{g,m}}{\Gamma}\right) \quad (3)$$

其中 $\Gamma = -\ln(5\text{BER})/1.5$ 。本文的目的使每一个 OFDM 符号包含最大的比特数。为此式(3)应取等号。

在多用户多速率 OFDM 系统中,我们的目标是在保证每一个用户的服务质量(这里采用误码率 BER)的前提下,系统的总速率最大。系统的目标函数表示为

$$\begin{aligned} R_{\text{all}} &= \sum_{g=1}^{K+N} \sum_{m=1}^M \frac{q_{g,m}}{T} = B_m \sum_{g=1}^{K+N} \sum_{m=1}^M \log_2\left(1 + \frac{\gamma_{g,m}}{\Gamma}\right) \\ &= B_m \sum_{g=1}^N \sum_{m=1}^M \log_2\left(1 + \frac{\gamma_{g,m}}{\Gamma}\right) + \sum_{i=1}^K R_i \end{aligned} \quad (4)$$

其中 T 为 OFDM 符号持续期,等于 $1/B_m$ 。约束条件为

$$\sum_{g=1}^{K+N} \sum_{m=1}^M s_{g,m} \leq \hat{S} \quad (5)$$

其中 $s_{g,m}$ 为用户 g 的第 m 个子载波分配的功率值, \hat{S} 为系统能提供的最大功率值。一般来说式(5)总是取等号,以便使目标函数最大。

3 子信道的分配

文献[4]已证明:对某一特定的子信道,只把它分配给它连接的链路增益最大的用户去传输数据,而其他用户不得占用此信道时,系统的容量达到最大。亦即,在一段时间内,对某一子信道,应将它分配给链路性能最好的用户,直至 CSI 发生了变化。它给出了分配子信道的依据,但它是针对系统中的所有用户都是变速率而言;如果系统中还包含有固定速率用户,(而实际情况总是这样,例如必然要包括话音业务),按照以上方案分配子信道性能就不再是最优的。

由于系统包含定速率和变速率用户,它与文献[4,5]只包含变速率或固定速率的用户的系统是不一样的。下面的定理1给出了分配依据。

定理1 在多用户多速率(包含定速率和变速率)的 OFDM 系统中,首先按照子信道链路增益最优原则先给定速率用户分配子信道;当所有定速率用户分配有子信道并满足速率限定条件后,再把剩余的子信道按照链路增益最优原则分配给变速率用户,这样系统的容量最大。

证明 假设用户1是定速率的,速率为 R_1 ,用户2是变速率的,系统的总功率为 S_{all} ,其余用户的分配都不变。有两个子信道 i 和 j ,有两种分配方案:(1) i 子信道分配给用户1, j 子信道分配给用户2;(2) i 子信道分配给用户2, j 子信道分配给用户1。

对于(1),系统的容量为

$$\begin{aligned} \hat{R}_{\text{all}} &= R_{\text{other}} + B_m \log\left(1 + S_{1,i} \frac{|\alpha_{1,i}|^2}{N_0 B_m \Gamma}\right) \\ &\quad + B_m \log\left(1 + (S_{\text{all}} - S_{1,i}) \frac{|\alpha_{2,j}|^2}{N_0 B_m \Gamma}\right) \\ &= R_{\text{other}} + \hat{R}_{1,i} + B_m \log\left(1 + (S_{\text{all}} - S_{1,i}) \frac{|\alpha_{2,j}|^2}{N_0 B_m \Gamma}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

对于(2),系统的容量为

$$\begin{aligned}\tilde{R}_{\text{all}} &= R_{\text{other}} + B_m \log \left(1 + S_{1,j} \frac{|\alpha_{1,j}|^2}{N_0 B_m \Gamma} \right) \\ &\quad + B_m \log \left(1 + (S_{\text{all}} - S_{1,j}) \frac{|\alpha_{2,i}|^2}{N_0 B_m \Gamma} \right) \\ &= R_{\text{other}} + \tilde{R}_{1,j} + B_m \log \left(1 + (S_{\text{all}} - S_{1,j}) \frac{|\alpha_{2,i}|^2}{N_0 B_m \Gamma} \right) \quad (7)\end{aligned}$$

由于用户1的速率是固定的,它的速率必然要得到满足,由于其余条件没变,所以必然有

$$\hat{R}_{1,i} = \tilde{R}_{2,j} \quad (8)$$

亦即 $S_{1,i} |\alpha_{1,i}|^2 = S_{1,j} |\alpha_{1,j}|^2$ 是成立的。令 $\Delta R = \hat{R}_{\text{all}} - \tilde{R}_{\text{all}}$ 。由式(6)和式(7)有

$$\Delta R = B_m \lg \left(\frac{1 + (S_{\text{all}} - S_{1,i}) \frac{|\alpha_{2,j}|^2}{N_0 B_m \Gamma}}{1 + (S_{\text{all}} - S_{1,j}) \frac{|\alpha_{2,i}|^2}{N_0 B_m \Gamma}} \right) \quad (9)$$

以下我们对式(9)做两种假设:第1种,式(9)大于0,第2种式(9)小于0。对于第1种情况,有

$$(S_{\text{all}} - S_{1,i}) |\alpha_{2,j}|^2 > (S_{\text{all}} - S_{1,j}) |\alpha_{2,i}|^2 \quad (10)$$

对式(10)进一步化简得

$$S_{\text{all}} \left[|\alpha_{2,j}|^2 - |\alpha_{2,i}|^2 \right] > S_{1,j} \left[\frac{|\alpha_{1,j}|^2}{|\alpha_{1,i}|^2} |\alpha_{2,j}|^2 - |\alpha_{2,i}|^2 \right] \quad (11)$$

当 $|\alpha_{2,j}|^2 < |\alpha_{2,i}|^2$ 时, $\frac{S_{\text{all}}}{S_{1,j}} < \frac{\frac{|\alpha_{1,j}|^2}{|\alpha_{1,i}|^2} |\alpha_{2,j}|^2 - |\alpha_{2,i}|^2}{|\alpha_{2,j}|^2 - |\alpha_{2,i}|^2}$, 一般有

$$\frac{S_{\text{all}}}{S_{1,j}} > 1。$$

由上可得 $|\alpha_{1,i}|^2 > |\alpha_{1,j}|^2$ 。

小结:以上结果上说明,当 $|\alpha_{1,i}|^2 > |\alpha_{1,j}|^2$, $|\alpha_{2,i}|^2 > |\alpha_{2,j}|^2$ 时, $\Delta R > 0$ 是成立的,也就是把 i 子信道分配给固定速率用户时系统的容量最大,这里 i 子信道的链里增益优于 j 子信道的链路增益。

同样对于第2种情况,同理可以得出:当 $|\alpha_{1,i}|^2 > |\alpha_{1,j}|^2$, $|\alpha_{2,j}|^2 > |\alpha_{2,i}|^2$ 时, $\Delta R < 0$ 是成立的,也就说明了把 j 子信道分配给固定速率用户时系统的容量最大,这里 j 子信道的链里增益优于 i 子信道的链路增益。

综合以上说明:在子信道的分配中应该把链路增益最优的子信道先分配给固定速率的用户,这时系统容量最大。

证毕

按照定理1,首先给 K 个定速率用户分配子信道。本文的目的是要在 $M \cdot (K + N)$ 个子信道中选择 $M \cdot K$ 个子信道分配给定速率用户。定义分配指数 $c_{k,m}$, 如果第 m 个子信道分配给用户 k , 则 $c_{k,m} = 1$; 否则 $c_{k,m} = 0$ 。子信道按如

下法则选择:

$\beta_{g,m} = \alpha_{g,m}$, 其中 $g = 1, 2, \dots, K$, $m = 1, 2, \dots, M \cdot (K + N)$ 。

for $t=1, M \cdot K$

$$\hat{g}, \hat{m} = \arg_{g,m} \max \left\{ |\beta_{1,1}|, \dots, |\beta_{1,M \cdot (K+N)}|, \dots, |\beta_{g,1}|, \dots, |\beta_{g,m}|, \dots, |\beta_{K,1}|, \dots, |\beta_{K,M \cdot (K+N)}| \right\}$$

$g \in$ 定速率用户, $m = 1, 2, \dots, M \cdot (K + N)$

$$c_{\hat{g}, \hat{m}} = 1. \quad \beta_{\hat{g}, \hat{m}} = 0;$$

for $i = 1, k$

$j = 0;$

for $m = 1, M \cdot (K + N)$

If $c_{i,m} = 1, j = j + 1;$

next $m;$

If $j=M, \beta_{i,m} = 0, m = 1, 2, \dots, M \cdot (N + K);$

next $i;$

next $t;$

通过上述子信道分配,保证每个定速率用户分配到了 M 个子信道,总共有 $M \cdot K$ 个子信道分配给了 K 个用户。剩余 $M \cdot N$ 个子信道则用于分配给 N 个变速率用户。

对于变速率用户,由于不存在速率限制,可按照链路增益最优化分配子信道。分配方案如下:

利用前面的非零 β 值,在分配子信道

for $t=1, M \cdot N$

$$\hat{g}, \hat{m} = \arg_{g,m} \max \left\{ |\beta_{1,1}|, \dots, |\beta_{1,M \cdot (K+N)}|, \dots, |\beta_{g,1}|, \dots, |\beta_{g,m}|, \dots, |\beta_{K,1}|, \dots, |\beta_{K,M \cdot (K+N)}| \right\}$$

$g \in$ 变速率用户

$$c_{\hat{g}, \hat{m}} = 1. \quad \beta_{\hat{g}, \hat{m}} = 0;$$

next $t;$

于是所有的子信道全部分配完毕。定速率用户的子信道分配,目的就是在保证速率和服务质量的前提下,功率最小。由于系统的总功率受限,这样就可以把剩余的功率分配给变速率用户以使系统的容量最大化。

4 功率分配

每一个用户通过前面的子信道分配,获得了 M 个子信道。进一步应合理地分配功率使系统的容量最大。

对于定速率用户,文献[5]基于功率增加最小化算法对功率进行分配。假设把一个比特的信号分别分配到不同的 M 个子信道,比较这 M 次分功率增量的大小,选出最小的一个作为子速率的分配,以上过程重复 R_i 次。这样的分配结果是定速率用户满足速率要求同时花费的功率最小。对于变速率用户,采用“注水”方案分配功率^[4]:链路增益大的用户分配的功率大,链路增益小的用户分配的功率小,使有限的功率能获得最大的系统容量。定理2给出了功率分配对链路增益范围的要求。对某一用户,如果链路增益不在给定取

值区间内, 那么超出这个范围的子信道将不分配功率。

定理 2 对于某一用户, 如它有 M 个子信道, 其路径增益分别为 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M$ (为描述方便, 省略了一个下标), 令 $|\hat{\alpha}| = \max(|\alpha_1|, |\alpha_2|, \dots, |\alpha_M|)$, 如果某一子信道的链路增益不满足式(12)

$$\left(1 + \frac{\gamma_{\hat{\alpha}}}{\Gamma}\right) \cdot |\alpha_m|^2 > |\hat{\alpha}|^2 \quad (12)$$

其中 $\gamma_{\hat{\alpha}}$ 是用户子信道中最优子信道的信干比, 则此子信道不分配功率; 满足式(12)的子信道集合, 对定速率用户按照用户总功率最小分配功率, 对变速率用户按照“注水”理论分配功率大小, 这样系统的容量最优。

证明 问题的描述是: 对于任意一个变速率用户, 它有 M 个子信道, 减少一个或几个子信道, 而把功率分配给链路最好的子信道, 系统容量是否比原来的好?

由于只涉及到一个用户, 只需考虑单用户速率的表达式

$$r_i = \sum_{m=1}^M B_m \lg \left(1 + S_{i,m} \frac{|\alpha_{i,m}|^2}{N_0 B_m \Gamma}\right) \quad (13)$$

令 $|\hat{\alpha}_i| = \max(|\alpha_{i,1}|, |\alpha_{i,2}|, \dots, |\alpha_{i,M}|)$, 不妨假设 $|\alpha_{i,1}| > |\alpha_{i,2}| > \dots > |\alpha_{i,M}|$ 。假设第 M 个子载波不分配能量, 把这部分能量分配给最优子信道, 用户的速率可表示为

$$\begin{aligned} \tilde{r}_i = & \sum_{m=2}^{M-1} B_m \lg \left(1 + S_{i,m} \frac{|\alpha_{i,m}|^2}{N_0 B_m \Gamma}\right) \\ & + B_m \lg \left(1 + (S_{i,1} + S_{i,M}) \frac{|\alpha_{i,1}|^2}{N_0 B_m \Gamma}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\Delta r_i = r_i - \tilde{r}_i$$

$$\begin{aligned} = & B_m \lg \left(1 + S_{i,1} \frac{|\alpha_{i,1}|^2}{N_0 B_m \Gamma}\right) + B_m \lg \left(1 + S_{i,M} \frac{|\alpha_{i,M}|^2}{N_0 B_m \Gamma}\right) \\ & - B_m \lg \left(1 + (S_{i,1} + S_{i,M}) \frac{|\alpha_{i,1}|^2}{N_0 B_m \Gamma}\right) \\ = & B_m \lg \left(\frac{\left(1 + S_{i,1} \frac{|\alpha_{i,1}|^2}{N_0 B_m \Gamma}\right) \cdot \left(1 + S_{i,M} \frac{|\alpha_{i,M}|^2}{N_0 B_m \Gamma}\right)}{1 + (S_{i,1} + S_{i,M}) \frac{|\alpha_{i,1}|^2}{N_0 B_m \Gamma}} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

假设 $\Delta r_i > 0$, 则有

$$S_{i,1} \frac{|\alpha_{i,1}|^2 |\alpha_{i,M}|^2}{N_0 B_m \Gamma} > |\alpha_{i,1}|^2 - |\alpha_{i,M}|^2 \quad (16)$$

进一步可得

$$\frac{\gamma_{i,1}}{\Gamma} |\alpha_{i,M}|^2 > |\alpha_{i,1}|^2 - |\alpha_{i,M}|^2$$

于是就有

$$\left(1 + \frac{\gamma_{i,1}}{\Gamma}\right) |\alpha_{i,M}|^2 > |\alpha_{i,1}|^2 \quad (17)$$

上式说明, 如果子信道的链路增益满足式(17)时, 所有子信道都分配功率, 则用户的速率最大; 如果子信道的链路

增益不满足式(17), 则把不满足式(17)的子信道信号功率设定为 0, 把这部分功率分配给最优子信道, 用户的速率最大。对式(17)归一化即得到式(12)。证毕

这说明, 对子信道的分配, 不一定每个用户都要平等的分配到 M 个子信道, 用户最多可得 M 个子信道, 但也可以分配到少于 M 个子信道。当进行 IFFT 变换时, 按照 M 点进行, 不够的补 0。

既然某用户分配的子信道可以小于 M , 便可以把剩余的子信道分配给其他的用户, 而不是让它的功率为 0。那么第 3 节的子信道分配方案就需要考虑式(12): 每一个用户的子信道链路增益被其最大值归一化, 链路增益范围为 $\left[\frac{1}{1 + \gamma_{\hat{\alpha}}/\Gamma}, 1\right]$, 不属于这个范围的子信道将不会分配给该用户, 但可以将它分配给其他用户。

5 仿真结果

首先假设, 每一个用户的子信道的链路增益为相互独立的 Rayleigh 衰落, 平均信道功率增益 $E[|\alpha_{i,m}|^2]$ 对所有的 i 和 m 都为 1。定速率用户(只考虑语音业务)的 BER 为 10^{-3} , 变速率用户(只考虑对延时不敏感的数据业务)的 BER 为 10^{-4} 。噪声功率假设为单位 1, 其它条件与 Jang 给出的仿真条件相同^[4]。

图 2, 图 3 给出了系统容量(系统的总速率)与用户数的关系, 其中子载波数 $M = 256$ 。对于固定速率的用户, 当用户数给定时, 它对系统容量的贡献是一定的。为便于比较, 在此本文只把可变速率用户的总速率作为系统容量, 没有记入固定速率对系统总速率的贡献, 并且进行了带宽归一化处理。图 2 给出了系统总速率(不考虑固定用户)与可变速率用户数之间的关系。当可变速率用户数增大时系统的总速率同时增大, 但不是线性增大; 当 K 增大时, 对于相同的变速率用户数, 单位带宽上的平均速率值降低, 这是因为固定速率的用户数变大, 它们分配到最优的子信道个数增加, 于是能分配给变速率用户的子信道相对变差, 变速率用户的平均速率必然降低。图 3 给出了系统总速率与固定速率用户数的关系, 由于固定速率用户数的增大, 链路增益大的子信道以更大几率被固定速率用户占据, 分配给可变速率用户的链路状态较差, 同时系统功率受限, 必然是系统总速率(不考虑

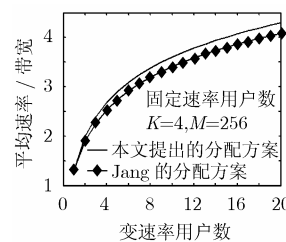


图 2 系统容量与可变速率用户的关系

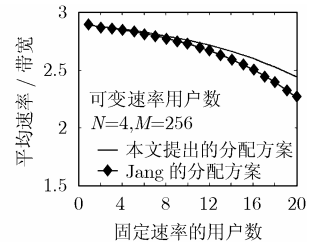


图 3 系统容量与固定速率用户数的关系

固定用户)降低。从图 2, 图 3 可以看出本文的分配方案优于

Jang 给出的方案; 如果系统容量考虑固定速率的贡献, 当固定速率的用户数减小, 相应的变速率用户数增加时, 系统的平均速率将增大, 仍然能得到上面的结果。

6 结束语

通过分析 OFDM 系统的性能, 在多用户多速率的系统中, 本文得出了: 在总功率受限的条件下, 先给固定速率的用户分配最优子信道, 然后再给可变速率的用户分配剩余的链路最优的子信道, 则系统容量最大。同时对于可变速率的用户, 给出了其分配的子信道的链路变化范围, 满足这一范围时系统的容量最大。为此可以得出用户分配的子信道数不同时, 系统的容量大于相同子信道数分配的系统容量。

参考文献

- [1] Czulwik A. Adaptive OFDM for wideband radio channels. *IEEE Global telecommunications Conf.* London, U.K. Nov. 1996: 713-718.
- [2] Sun Yi. Bandwidth-efficient wireless OFDM. *IEEE Journal Selected Areas in Communications*, 2001, 19(11): 78-82.
- [3] Rainbolt B J and Miller S L. Multicarrier CDMA for cellular overlay systems. *IEEE Journal Selected Areas in Communications*, 1999, 17(10): 1807-1814.
- [4] Jang Jiho and Lee kwang Bok. Transmit power adaptation for multiuser OFDM system. *IEEE Journal Selected Areas in Communications*, 2003, 21(2): 171-178.
- [5] Wong Cheong Yui and Cheng Roger S. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation. *IEEE Journal Selected Areas in Communications*, 1999, 17(10): 1747-1758.
- [6] Goldsmith A J and Chua S G. Variable rate variable power MQAM for fading channels. *IEEE Trans. on Commun.*, 1997, 45(6): 1218-1230.
- [7] Webb W T and Steele R. Variable rate QAM for mobile radio. *IEEE Trans. on Commun.*, 1995, 43(8): 2223-2230.
- [8] Yih C H and Geraniotis E. Power allocation and control for coded OFDM wireless networks. 2000 IEEE Sixth international symposium on spread spectrum techniques and applications, Parsippany, New Jersey, USA, 2000. Vo1.1: 164-168.

武林俊: 男, 1968 年生, 博士, 副教授, 现主要从事移动通信系统中信道分配和无线资源管理、数字信号处理、后三代移动通信技术等方面的研究。

李燕文: 女, 1967 年生, 讲师, 从事数字信号处理、图像处理等方面的研究。