

文章编号:1004-9037(2013)03-0330-06

有限反馈 MIMO-OFDM 系统公平性资源分配算法

杜 崇 仵国锋 陈 松 胡捍英

(解放军信息工程大学信息工程学院, 郑州, 450002)

摘要:针对多输入多输出正交频分复用(Multiple input multiple output-orthogonal frequency division multiplexing, MIMO-OFDM)系统资源分配过程中信道信息反馈开销过大的问题,给出了一种基于有限反馈的公平性资源分配算法。该算法在发射总功率、目标误码率以及用户间比例速率约束条件下,以最大化系统和容量为目标,将相邻子载波分簇并反馈部分簇的信道状态信息(Channel state information, CSI),利用部分已反馈簇的信道状态信息 CSI 对未反馈簇的 CSI 进行估计,据此进行子载波簇、功率和比特三级分配。仿真结果表明,该算法在保证用户间比例公平性和系统和容量性能的同时,有效降低了系统的反馈开销,实现了系统性能与反馈开销的良好折中。

关键词:正交频分复用;多输入多输出;有限反馈;比例公平;资源分配

中图分类号:TN929.5

文献标志码:A

Fair Resource Allocation Algorithm Based on Limited Feedback in MIMO-OFDM System

Du Chong, Wu Guofeng, Chen Song, Hu Hanying

(Institute of Information Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou, 450002, China)

Abstract: Aiming at the high channel state information (CSI) feedback spending in resource allocation of multi-user multiple input multiple output orthogonal frequency division multiplexing (MIMO-OFDM) system, a fair resource allocation algorithm is proposed based on limited feedback. The algorithm is to maximize the system throughput under the constraint of transmission total power, bit error rate (BER) and proportionality among user data rates. It separates the adjacent subcarriers into a group and feed partial group channel state information (CSI) back. The feed-backed CSI partial group can be used to estimate the others without CSI feedback, and then subcarrier groups, power and bits should be allocated. Simulation results show that the algorithm ensures users' proportion fairness and system throughput, and reduces system feedback cost, which makes a good tradeoff between performance and cost of feedback.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); multiple input multiple output (MIMO); limited feedback; proportional fairness; resource allocation

引 言

多输入多输出(Multiple input multiple output, MIMO)技术能极大地提高系统容量,正交频分复用(Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术能有效抵抗频率选择性衰落,

因此,多输入多输出正交频分复用(Multiple input multiple output-orthogonal frequency division multiplexing, MIMO-OFDM)技术已成为未来无线通信重要的候选技术之一^[1]。而资源分配能够充分利用空间、时间和频率等资源,已成为国内外的研究热点之一。

资源分配需要接收端反馈系统信道状态信息

(Channel state information, CSI) 给发送端, 现有研究^[2-6]大多假设发送端已知完全的 CSI, 而完整的 MIMO-OFDM 系统 CSI 是一个复数矩阵, 且随天线和子载波数变化而变化, 因此在时变的无线信道中, 由于反馈带宽有限, 发送端只能得到部分 CSI。目前的研究中, 子载波分簇和最优反馈是降低系统反馈开销的两种简单有效方法。文献[7]给出了一种有限反馈下最大化系统和容量(即系统中所有用户的容量和)性能的算法, 但其未考虑用户间公平性; 文献[8]给出了一种反馈最优簇的有限反馈子载波分配公平算法, 但其舍弃所有用户均不反馈 CSI 的簇, 降低了系统容量, 不能较好实现用户间的公平性。

因此, 为了降低系统反馈开销, 本文在有限反馈条件下, 利用反馈簇的 CSI 估计未反馈簇的 CSI, 充分利用所有用户均未反馈 CSI 的簇, 以最大化系统和容量为目标同时兼顾系统用户间公平性, 给出了一种基于有限反馈的公平性资源分配算法, 实现了系统性能和反馈开销的良好折中。

1 系统模型

基于有限反馈的多用户 MIMO-OFDM 系统资源分配如图 1 所示。系统由 1 个基站和 K 个用户组成, 基站端有 M_t 根发送天线, 用户端有 M_r 根接收天线, 各收发天线对间的信道相互独立。用户均匀分布在小区中, 用户间信道相互独立。假设 OFDM 子载波总数为 M , 可以平均分为 N 个子载波簇, 每簇包含 I 个相邻的子载波, 为防止共信道干扰, 每个子载波簇在同一时刻只能被一个用户使用。基站与用户间的 CSI 通过反馈信道反馈给基站, 且认为反馈无误差。

定义 $M_r \times M_t$ 矩阵 \mathbf{H}_k^m 为用户 k 在子载波 m

上的信道增益矩阵, 则在某时刻 t , 用户 k 在子载波 m 上的接收信号可表示为

$$\mathbf{Y}_k^m(t) = \mathbf{H}_k^m(t) \mathbf{X}_k^m(t) + \mathbf{n}_k^m(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Y}_k^m(t)$ 为 $M_r \times 1$ 接收信号矩阵, $\mathbf{X}_k^m(t)$ 为 $M_t \times 1$ 发送信号矩阵, $\mathbf{n}_k^m(t)$ 为 $M_r \times 1$ 噪声矩阵, 其元素服从均值为 0, 方差为 σ^2 的复高斯分布。

在加性高斯白噪声信道中, 假设采用 MQAM 调制, 则误码率(Bit error rate, BER)可以近似表示为^[9]

$$\text{BER}_{\text{target}} = 0.2 \exp \left[-\frac{3P_k^m \|\mathbf{H}_k^m\|^2}{2\sigma^2 (2^{b_k^m} - 1)} \right] \quad (2)$$

式中: P_k^m 为用户 k 在子载波 m 上的功率, $\|\mathbf{H}_k^m\|^2$ 为用户 k 在子载波 m 上的 Euclidean 范数等效信道增益, b_k^m 为用户 k 在子载波 m 上加载的比特数。

令 $\Gamma = \frac{-\ln(\text{BER}_{\text{target}})}{1.5}$, 则

$$b_k^m = \log_2 \left(1 + P_k^m \frac{\|\mathbf{H}_k^m\|^2}{(\sigma^2 \cdot \Gamma)} \right) \quad (3)$$

用户 k 在子载波簇 n 上加载的比特数为

$$b_{k,n} = \sum_{i=1}^I b_k^i = \sum_{i=1}^I \log_2 \left(1 + P_k^i \frac{\|\mathbf{H}_k^i\|^2}{(\sigma^2 \cdot \Gamma)} \right) \quad (4)$$

由于子载波簇的信道增益为其簇内各子载波信道增益的最小值, 令 $G_{k,n} = \min(\|\mathbf{H}_k^i\|^2 / (\sigma^2 \Gamma))$, $P_{k,n} = I \cdot \min(P_k^i)$, $i=1, 2, \dots, I$, 则

$$b_{k,n} = I \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_{k,n}}{I} \cdot G_{k,n} \right) \quad (5)$$

式中: $G_{k,n}$ 为用户 k 在子载波簇 n 上的信道增益, $P_{k,n}$ 为用户 k 在子载波簇 n 上的功率。

暂不考虑 b_k^m 的整数性要求, 本文考虑的资源分配问题可以表示为

$$\max_{\rho_{k,n}, P_{k,n}} \frac{B}{M} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} I \log_2 \left(1 + \frac{P_{k,n}}{I} G_{k,n} \right)$$

s. t.

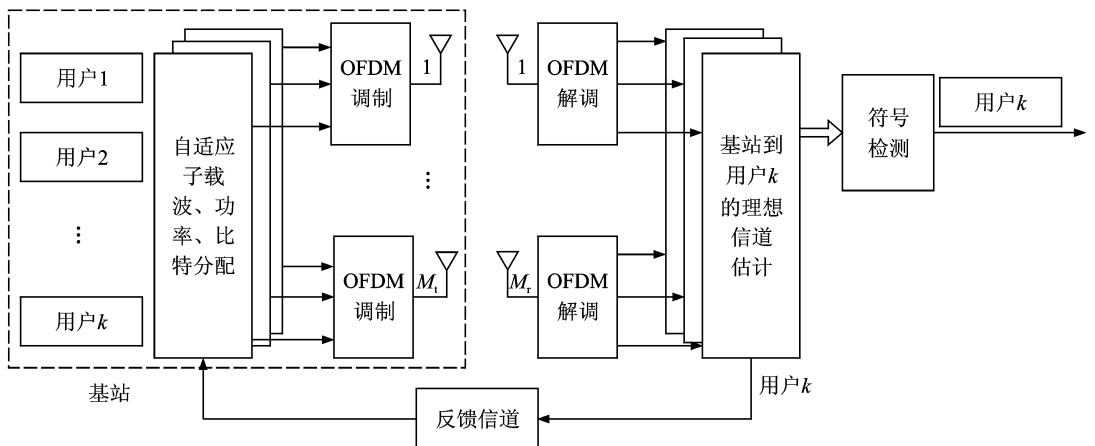


图 1 多用户 MIMO-OFDM 系统资源分配模型

$$\begin{aligned}
C_1 : \rho_{k,n} &\in \{0,1\} \quad \forall k,n \\
C_2 : \sum_{k=1}^K \rho_{k,n} &= 1 \quad \forall n \\
C_3 : P_{k,n} &\geq 0 \quad \forall k,n \\
C_4 : \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} \cdot P_{k,n} &\leq P_{\text{total}} \\
C_5 : R_1 : R_2 : \dots : R_K &= r_1 : r_2 : \dots : r_K
\end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\rho_{k,n}$ 表示是否将子载波簇 n 分配给用户 k , 若子载波簇 n 分配给用户 k , 则 $\rho_{k,n} = 1$, 反之, $\rho_{k,n} = 0$; P_{total} 为系统总功率; B 为系统带宽; $r_1 : r_2 : \dots : r_K$ 为用户速率成比例约束条件, R_k 为用户 k 的总

数据速率, 且 $R_k = \frac{B}{M} \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} b_{k,n}$ 。

2 基于有限反馈的资源分配

最优的资源分配策略是基站根据信道完整的 CSI 自适应地将子载波、功率和比特联合分配, 但其反馈量和复杂度均太高, 不利于系统的实现。因此, 本文设计了一种基于有限反馈的次优资源分配方案, 在用户间比例速率约束条件下以最大化系统和容量为目标, 将相邻子载波分簇, 利用已反馈簇的 CSI 估计未反馈的 CSI, 并将子载波簇分配、功率分配和比特加载分级完成, 大大降低了系统反馈开销和复杂度。

2.1 有限反馈技术

为降低反馈开销, 将 I 个相邻子载波看作一簇, 使得分配的最小单位为子载波簇, 用簇内最差子载波的 CSI 表示该簇的 CSI, 考虑到用户总是选择信道状态较好的子载波簇进行传输, 因此反馈信道状态较好 Q 个簇的 CSI 给基站。但是有些簇对所有用户均处于信道状态较差的情况, 每个用户均不反馈其 CSI, 导致系统容量下降; 有些簇对多个用户信道状态均较好, 但只能被一个用户使用, 使得系统公平性得不到满足。

为解决上述问题, 本文给出一种反馈最好的 Q 个簇和最差的一个簇的 CSI 以及相邻两个簇的 CSI 差值的最大值的反馈方案, 基站利用线性内插的思想, 估计未反馈簇的 CSI, 充分利用系统资源, 有效降低了系统反馈开销。具体流程如下:

(1) 基站首先获得每个用户反馈的最好的 Q 个簇和最差的 1 个簇的 CSI, 以及相邻两个簇的 CSI 差值的最大值 D_k , 即 $D_k = \max(|G_{k,1} - G_{k,2}|, |G_{k,2} - G_{k,3}|, \dots, |G_{k,N-1} - G_{k,N}|)$ 。

(2) 估计未反馈簇的 CSI。 $G_{k,j} = \max(G_{k,q} -$

$|q-j| \cdot D_k, G_{k_{\text{lowest}}})$ 。 $\forall j, G_{k,q}$ 表示用户 k 的距第 j 个未反馈簇最近的已反馈簇的 CSI, $G_{k_{\text{lowest}}}$ 表示用户 k 的信道增益最小值。至此, 得到所有用户子载波簇的 CSI。

对于每个用户, 假设其子载波 CSI 全反馈算法反馈量为 N_{full} , 按上述方法反馈有限簇的 CSI 的方法, 其反馈量为 $N_{\text{full}} \cdot \frac{(Q+2)}{(I \cdot N)}$, 例如当 $I = 8$, $N = 128$, $Q = \text{floor}(0.6N) = 76$ 时, 反馈量仅为子载波 CSI 全反馈算法的 7.6%, 大大降低了系统反馈信息。

2.2 资源分配策略

基站根据得到的 CSI, 按用户间比例公平约束条件进行子载波簇分配; 然后利用子载波簇的分配结果, 以最大化系统和容量为目标, 进行功率分配; 最后根据功率分配结果得到各子载波上加载的比特数, 并对其进行整数化调整。

2.2.1 子载波簇分配

为实现用户间比例公平, 假设所有簇分配的功率相等, 利用已得到的 $G_{k,n}$, 每次找出按速率比例折算后传输速率相对最小的用户, 从尚未分配的子载波簇中选择对其信道增益最大的簇分配给该用户。流程如下:

(1) 初始化, $\forall k$, 用户 k 的速率 $R_k = 0$, 已分配的子载波簇 $\Omega_k = \Phi$, 未分配子载波簇 $A = \{1, 2, \dots, N\}$;

(2) 对于用户 k , 找最大的 $G_{k,n}, n \in A, \Omega_k = \Omega_k \cup \{n\}, A = A - \{n\}, R_k = \frac{B}{M} b_{k,n}$;

(3) 若 $A \neq \Phi$, 对于 $\min\left(\frac{R_k}{r_k}\right)$ 的用户 k , 找最大的 $G_{k,j}, \Omega_k = \Omega_k \cup \{j\}, A = A - \{j\}, R_k = \frac{B}{M} \sum_{n \in \Omega_k} b_{k,n}$;

(4) 若 $A = \Phi$, 分配结束。

2.2.2 功率分配

子载波簇分配之后, 假设用户 k 分配的子载波簇为 $\Omega_k, k = 1, 2, \dots, K$, 则式(6)可以转化为

$$\max_{P_{k,n}} \frac{B}{M} \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} I \log \left(1 + \frac{P_{k,n} G_{k,n}}{I} \right) \quad (7)$$

对式(7)利用拉格朗日方法求解, 令

$$\begin{aligned}
F &= \frac{B}{M} \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} I \log_2 \left(1 + \frac{P_{k,n} G_{k,n}}{I} \right) + \\
&\lambda_1 \left(\sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} P_{k,n} - P_{\text{total}} \right) +
\end{aligned}$$

$$\sum_{k=2}^K \lambda_k \left[\sum_{n \in \Omega_1} \frac{B}{M} I \log_2 \left(1 + \frac{P_{1,n} G_{1,n}}{I} \right) - \frac{r_1}{r_k} \sum_{n \in \Omega_k} \frac{B}{M} I \log_2 \left(1 + \frac{P_{k,n} G_{k,n}}{I} \right) \right] \quad (8)$$

对式(8)求导并令导数等于零得

$$\frac{\partial F}{\partial P_{1,n}} = \frac{B}{M \ln 2} \frac{G_{1,n}}{1 + \frac{G_{1,n} P_{1,n}}{I}} + \lambda_1 + \frac{B}{M \ln 2} \sum_{k=2}^K \lambda_k \frac{G_{1,n}}{1 + \frac{G_{1,n} P_{1,n}}{I}} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial F}{\partial P_{k,n}} = \frac{B}{M \ln 2} \frac{G_{k,n}}{1 + \frac{G_{k,n} P_{k,n}}{I}} + \lambda_1 - \frac{B}{M \ln 2} \frac{r_1}{r_k} \lambda_k \frac{G_{k,n}}{1 + \frac{G_{k,n} P_{k,n}}{I}} = 0$$

$$k = 2, 3, \dots, K, n \in \Omega_k \quad (10)$$

由式(9,10)可得

$$\frac{G_{k,n}}{1 + \frac{G_{k,n} P_{k,n}}{I}} = \frac{G_{k,m}}{1 + \frac{G_{k,m} P_{k,m}}{I}} m$$

$$n \in \Omega_k, k = 1, 2, \dots, K \quad (11)$$

不失一般性,假设 $G_{k,1} \leq G_{k,2} \leq \dots \leq G_{k,N_k}, k = 1, 2, \dots, K, N_k$ 是集合 Ω_k 的元素个数,则

$$P_{k,n} = P_{k,1} + I \frac{G_{k,n} - G_{k,1}}{G_{k,n} \cdot G_{k,1}} \quad (12)$$

由式(12)可得用户 k 分得的总功率

$$P_k = N_k P_{k,1} + I \sum_{n=1}^{N_k} \frac{G_{k,n} - G_{k,1}}{G_{k,n} \cdot G_{k,1}} \quad (13)$$

则用户速率约束条件可表示为

$$\frac{N_1}{r_1} \left[\log_2 \left(1 + \frac{P_1 - V_1 G_{1,1}}{N_1 I} \right) + \log_2 W_1 \right] = \frac{N_k}{r_k} \left[\log_2 \left(1 + \frac{P_k - V_k G_{k,1}}{N_k I} \right) + \log_2 W_k \right] \quad (14)$$

式中: $V_k = I \sum_{n=2}^{N_k} \frac{G_{k,n} - G_{k,1}}{G_{k,n} \cdot G_{k,1}}, W_k = \left(\prod_{n=2}^{N_k} \frac{G_{k,n}}{G_{k,1}} \right)^{1/N_k}, k = 2, 3, \dots, K$ 。

系统总功率约束为

$$\sum_{k=1}^K P_k = P_{total} \quad (15)$$

根据式(14,15)可以求出比例公平下的最优能量分配,但一般情况下该方程组是非线性的,需要迭代搜索,复杂度一般为 $O(\epsilon K), \epsilon$ 典型值至少大于 $10^{[1]}$,复杂度较高。这里根据松弛比例约束条件知 $r_1 : r_k \approx N_1 : N_k$,因此,联立式(14,15)即可确定每个用户分配的总功率 P_k ,而且由于这 K 个

方程是线性的,其复杂度较低。再由式(12,13)即可求得每个用户在其各个子载波簇上分配的功率。

2.2.3 比特加载

根据上述子载波簇上分配的功率,由式(4,5)计算所有子载波上加载的比特数 b_k^m ,并进行整数化调整。

$$(1) \hat{b}_k^m = \text{round}(b_k^m), b_{k,n} = I \cdot \hat{b}_k^m \text{ 以及 } \hat{P}_{k,n} = I \cdot \frac{(2^{\hat{b}_k^m} - 1)}{G_{k,n}};$$

(2) 若 $\sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} \hat{P}_{k,n} > P_{total}$,则选择 Δb_k^m 最小的那个子载波簇, $\hat{b}_k^m = \hat{b}_k^m - 1$;

(3) 若 $\sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} \hat{P}_{k,n} < P_{total}$,则选择 Δb_k^m 最大的那个子载波簇, $\hat{b}_k^m = \hat{b}_k^m + 1$;

重复上述步骤,直到 $\sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} \hat{P}_{k,n}$ 从左侧逼近 P_{total} ,剩余的功率舍弃不用,完成比特加载。

3 性能仿真与分析

假设系统发送天线数为 4,接收天线数为 4,各收发天线对之间信道相互独立,信道模型采用 6 径 Rayleigh 衰落信道,功率时延分布呈指数衰减为 $\{1, \exp(-0.1), \exp(-0.2), \exp(-0.3), \exp(-0.4), \exp(-0.5)\}$,系统子载波个数为 1 024,带宽 20 MHz,系统相干带宽远大于子载波带宽,用户同一时刻只进行一种业务,目标误码率 $BER_{target} \leq 10^{-4}$ 。

图 2 给出了本文所给算法与全反馈子载波分配(Full feedback resource allocation, FFRA)算法^[6]和 best-Q 算法^[8]的系统容量性能比较。仿真场景中,SNR = 10dB,16 个子载波为一簇, $Q =$

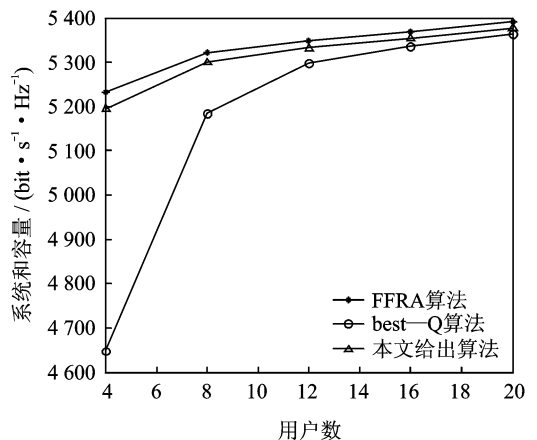


图 2 3 种算法系统和容量性能比较

$\text{floor}(0.6N)$, 比例约束条件概率 $P(r=0.1)=0.5, P(r=0.4)=P(r=0.2)=0.25$ 。

从图 2 可以看出,当用户数较少时所给算法系统和容量性能较 FFRA 算法稍有下降,较 best-Q 算法有较大提升。这是由于所提算法将子载波分簇,用最差的子载波信道增益代替整个簇的信道增益,所以性能有所降低。但所提算法利用线性内插思想,用反馈簇的 CSI 估计未反馈簇的 CSI,将未反馈簇充分利用起来,因此较 best-Q 算法系统和容量性能有明显提升。由于每个用户反馈其最优的 Q 个簇,所以随着系统用户数增加,best-Q 算法充分利用多用户分集降低了未反馈簇带来的影响,系统和容量与本文算法逐渐趋于一致。而且由于本文算法利用部分反馈子载波簇 CSI 估计未反馈簇 CSI 的思想,在上述仿真条件下,本文算法反馈量为全反馈的 $(Q+2)/(I \cdot N)=3.9\%$,best-Q 算法反馈量为全反馈的 $Q/(I \cdot N)=3.7\%$,可以看出所提算法反馈开销与 best-Q 算法相当,较全反馈算法大大降低,实现了系统性能与反馈量的良好折中。

图 3 给出了各用户之间归一化的容量分布。仿真场景中,用户数为 8,SNR=10 dB,每个簇有 16 个子载波, $Q=\text{floor}(0.6N)$,比例约束条件为 $r_1:r_2:r_3:r_4:r_5:r_6:r_7:r_8=4:4:2:2:1:1:1:1$,并设 $\hat{B}_k=B_k/\sum_{k=1}^K B_k$ 为用户 k 的归一化容量,其中 B_k 为用户 k 的比特数。

从图 3 可以看出,本文所给算法较 best-Q 算法能够取得用户间更好的比例公平性。这是因为 best-Q 算法中,每个用户仅反馈其最优的 Q 个簇,而对于某些簇可能被多个用户反馈,但只能被一个用户使用,某些簇对所有用户均不反馈造成资源浪费,这些均会破坏用户间的公平性。而本文所给算法利

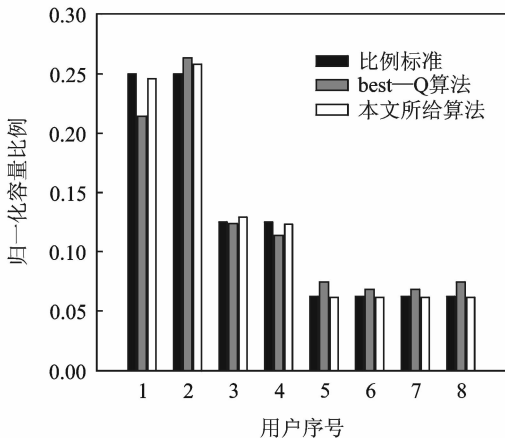


图 3 用户归一化容量分布图

用已反馈 CSI 估计未反馈簇的 CSI,利用系统中未反馈 CSI 的子载波簇,提升了用户之间的公平性。

图 4 给出了簇内包含子载波数不同时对系统和容量性能的影响。仿真场景中,用户数为 8, $Q=\text{floor}(0.6N)$,比例约束条件为 $r_1:r_2:r_3:r_4:r_5:r_6:r_7:r_8=4:4:2:2:1:1:1:1$,图 4 给出了簇内包含子载波数为 1,16,32 和 64 时系统和容量性能曲线。

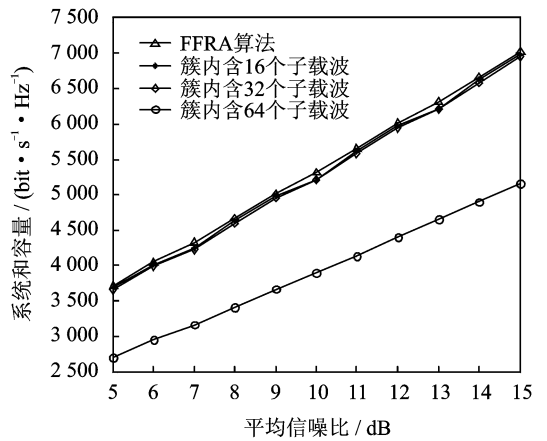


图 4 簇内包含子载波数不同时系统和容量性能

从图 4 可以看出,随着簇内包含的子载波数增多,系统和容量呈下降趋势。这是因为当簇内子载波数较少时,簇内子载波间的相关性较大,用最差子载波的 CSI 代替整个簇的 CSI 带来的损失较小,而随着簇内子载波数增多,簇内子载波间的相关性变小,此时再用最差子载波的 CSI 代替整个簇的 CSI 带来的损失较大,造成系统性能严重下降。因此,要根据系统相关带宽合理选择簇内子载波个数,在保证系统性能的同时有效降低反馈开销。

4 结束语

本文研究了比例速率约束条件下有限反馈 MIMO-OFDM 系统资源分配问题,利用子载波分簇并反馈部分簇的 CSI,利用已反馈 CSI 估计未反馈 CSI,大大降低了系统反馈量,之后进行子载波簇、功率和比特分配。仿真结果表明,该算法在保证系统和容量和用户间比例公平性的同时,大大降低了系统的反馈开销,很好地达到了高效性、实时性和公平性。

参考文献:

- [1] 周恩,张兴,吕召彪,等.下一代宽带无线通信 OFDM 与 MIMO 技术[M].北京:人民邮电出版社,2008.

- Zhou En, Zhang Xing, Lü Zhaobiao, et al. OFDM and MIMO in the next generation broadband wireless communications technology[M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2008.
- [2] Papoutsis V D, Frimis I G, Kotsopoulos S A. User selection and resource allocation algorithm with fairness in MISO-OFDMA[J]. IEEE Communications Letters, 2010,14(5):411-413.
- [3] 魏伟,尤嗔辉,益晓新. OFDMA 无线 mesh 网中公平资源分配算法[J]. 数据采集与处理,2010,25(1):61-65.
- Wei Wei, You Chenhui, Yi Xiaoxin. Fair resource allocation algorithm in OFDMA wireless mesh networks[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2010,25(1):61-65.
- [4] Xu J, Lee S J, Kang W S, et al. Adaptive resource allocation for MIMO-OFDM based wireless multicast systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2010,56(1):98-102.
- [5] 杜娜,顾品标,闵锐,等. 一种低复杂度基于公平性的 MIMO-OFDMA 资源分配方案[J]. 电子信息学报, 2010,32(4):770-774.
- Du Na, Gu Pinbiao, Min Rui, et al. A low complexity resource allocation scheme with proportional fairness for MIMO-OFDM system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010,32(4):770-774.
- [6] Shen Z, Andrews J G, Evans B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005,4(6):2726-2737.
- [7] Han Z H, Lee Y H. Opportunistic scheduling with partial channel information in OFDMA/FDD systems[J]. IEEE Vehicular Technology Conference, 2004, 60(1):511-514.
- [8] 张冬梅,王金龙. OFDMA 系统中基于有限反馈的资源公平调度算法[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2005,6(2):104-107.
- Zhang Dongmei, Wang Jinlong. Fair resource scheduling based on limited feedback in OFDMA system[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science, 2005,6(2):104-107.
- [9] Goldsmith A J, Chua S G. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(10):1218-1230.
- [10] Chung S T, Goldsmith A. Degrees of freedom in adaptive modulation: a unified view[J]. IEEE Transactions on Communication, 2001,49(9):1561-1571.
- [11] Forsythe M M G, Moler C. Computer methods for mathematical computations [M]. Prentice Hall, 1977:156-171.
- 作者简介:**杜崇(1987-),男,硕士研究生,研究方向:MIMO-OFDM 技术,E-mail:rainpopo@126.com; 仵国锋(1974-),男,讲师,研究方向:认知无线网络;陈松(1986-),男,博士研究生,研究方向:MIMO-OFDM 技术;胡捍英(1961-),男,教授,研究方向:移动通信。