

文章编号:1001-9081(2010)12-3151-04

## 三协作节点的功率分配及其信道容量

张 愿, 马社祥

(天津理工大学 计算机与通信工程学院, 天津 300191)

(ruruiling1@sina.com)

**摘要:**针对多协作用户的功率分配及其信道容量问题,讨论了在三个协作用户的通信模型中,当信道增益固定情况下的功率分配。以信道容量为目标函数,给出了最优的功率分配算法。实验结果表明,当信源节点到目标节点的信道增益大于信源节点到各中继节点的信道增益时,信源节点可以直接传送给目标节点。当信源节点到各中继节点的信道增益的平方与信源节点发射功率的乘积小于相应中继节点到目标节点信道增益的平方与相应中继节点发射功率的乘积时,信源节点可以完全通过中继节点来传送给目标节点,在其他情况下,信源节点可以一部分通过中继节点传输,一部分直接传输到目标节点。

**关键词:**协作通信; 功率分配; 信道容量; 中继节点; 信道增益

**中图分类号:** TP84    **文献标志码:**A

## Power allocation and channel capacity for cooperative tri-node

ZHANG Yuan, MA She-xiang

(School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** Power allocation for tri-terminal cooperative communication was discussed to predict the power allocation and channel capacity for cooperative multi-terminal when the channel gains are fixed. The optimum power allocation algorithm, with channel capacity as destination function, was given out. The research results show that when the channel gain from source node to destination node is larger than the channel gains from source node to relay nodes, source node can transmit information to the destination node directly. When the product of the square of channel gain from source node to relay node multiplies the power transmitted from source node is smaller than the product of the square of channel gain from relay node to destination node multiplies the power transmitted from relay node, source node can transmit information to the destination node via relay nodes. In other common cases, source node can partly transmit to the destination node via relay nodes and partly transmit information to the destination node directly.

**Key words:** cooperative communication; power allocation; channel capacity; relay node; channel gain

## 0 引言

协作通信的基本思想是在多用户的环境中,通过彼此共享天线,能够产生虚拟的多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)系统。众多研究表明,放大转发与解码转发<sup>[1-2]</sup>作为协作通信基本的方法,受到广泛的关注。

功率分配及其信道容量是协作通信中的最基本问题之一,最早的研究是采用等功率分配法,认为各移动终端有着相同的发射功率,但移动终端并非处于理想状态,如果采用等功率分配法不仅不能保证移动台有着相同的发射功率,还会影响移动台的性能。功率分配以及信道容量分析是协作通信技术中的一项关键技术。在近期的研究中,已有不少学者研究了在两用户协作通信模型下的功率分配以及信道容量问题。文献[3]提出了在固定信道模型下,以降低中断概率为目的的功率分配方案。文献[4]分析了在半双工状态下,且信道的信噪比均很高,通过功率分配来改善系统性能。文献[5]分析了在全双工状态下,信道增益均固定或均不固定,信噪比都高或都不高的情况下,如何通过分配功率来提高系统的信道容量。文献[6]研究了在总功率一定的情况下,在高信噪

比的情况下,通过优化源节点和中继节点的发射功率使得误码率尽可能最小。文献[7]提出了在简单的、发射端不知道信道状态情况下,在各种信噪比场合下,提高MIMO信道容量的功率分配算法。但是针对三个及三个以上协作用户模型的功率分配与信道容量性能分析,目前还没有满意的解决方案。

因此,本文针对三用户协作通信模型,在全双工状态下,噪声信号为加性高斯噪声,基于信道增益固定的条件下,通过功率分配来对系统的信道容量进行分析。

## 1 三协作节点系统模型

三用户协作通信系统模型如图1所示,其中,1、2、3均为协作伙伴,4为目标节点(即为基站), $C_{ji}$ 为第*i*节点到第*j*节点传输的信道增益。协作伙伴中,1表示源节点,是发射信号者,2、3表示中继节点,既是发射信号者,又是接收信号者。

协作分集中信号的合并方式通常有三种,即选择式合并、等增益合并以及最大化合并。选择式合并就是选择各分集支路中,选择信噪比最大的一路支路信号作为输出。等增益合并就是各支路的加权系数相等,输出信号即为各支路信号之和。最大化合并是对等增益合并的改进,即各个支路加权系数与

收稿日期:2010-06-17;修回日期:2010-07-16。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60872064)。

作者简介:张愿(1985-),男,安徽六安人,硕士研究生,主要研究方向:协作通信性能分析; 马社祥(1962-),男,陕西延安人,副教授,博士,主要研究方向:图像处理、通信信号处理、信息安全。

该支路信噪比成正比。通过比较表明,选择式合并是最简单的合并技术,但总体性能最差。最大比合并性能最好,等增益合并的合并增益接近最大比合并,但等增益合并较最大比合并容易实现,因此等增益合并应用较多。

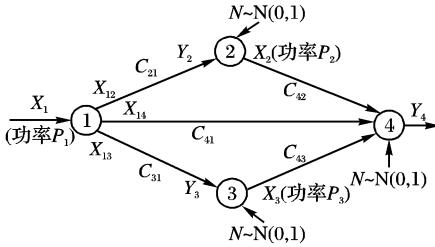


图1 三用户协作系统模型

本文讨论等增益合并的模型。因此,各中继节点和目标节点的接收信号可表示如下:

$$Y_2 = c_{21}X_1 + N \quad (1)$$

$$Y_3 = c_{31}X_1 + N \quad (2)$$

$$Y_4 = c_{41}X_{14} + c_{42}X_2 + c_{43}X_3 + N \quad (3)$$

其中: $X_k$ 为第k节点发射的信号; $Y_j$ 为第j节点接收信号; $N$ 为干扰信号; $X_{14}$ 为源节点直接向目标节点发射的信号。其中, $k \in \{1, 2, 3\}$ ,  $j \in \{2, 3, 4\}$ 。这说明在此模型中,源节点既可以将信息直接传输到目标节点,也可以将信息传输到中继节点2,3,然后由中继节点2,3将自己的信息以及由源节点传输的信息传输到目标节点。

## 2 信道容量分析

文献[8]已经对基本信道容量进行了分析,文献[9-10]已经分析了两协作节点模型下的信道容量性能。下面将分析三协作节点模型下的信道容量性能。

在三协作节点通信系统模型中,假设噪声信号均服从均值为0、方差为1的正态分布,信道增益固定,源节点发射的信号总功率为 $P_1$ ,中继节点发射的功率分别为 $P_2$ 、 $P_3$ ,信道增益 $c_{ji}$ 为节点*i*发射到节点*j*的信道增益, $i \in \{1, 2, 3\}$ , $j \in \{2, 3, 4\}$ 。

在此三协作节点模型中: $X_1, X_2, X_3$ 分别为源节点、中继节点2、中继节点3的发射信号; $Y_2, Y_3, Y_4$ 分别为中继节点2、中继节点3、目标节点的接收信号; $b_1, b_2$ 分别为由源节点向中继节点2,3发射的功率所占源节点发射总功率的比例。由于 $X_1 \sim N(0, P_1)$ ,  $X_2 \sim N(0, P_2)$ ,  $X_3 \sim N(0, P_3)$ ,分解 $X_1 = X_{12} + X_{13} + X_{14}$ ,其中 $X_{12}, X_{13}, X_{14}$ 分别为源节点发送到中继节点2,中继节点3,目标节点的信号。则 $X_{12} \sim N(0, b_1 P_1)$ ,  $X_{13} \sim N(0, b_2 P_1)$ ,  $X_{14} = \sqrt{(1 - b_1 - b_2)} \frac{P_1}{P_2} X_2 = \sqrt{(1 - b_1 - b_2)} \frac{P_1}{P_3} X_3$ ,由于 $X_{12}, X_{13}, X_2, X_3$ 是彼此独立的高斯随机变量,因此,系统的信道容量表示如下:

$$\begin{aligned} C = & \max_{0 \leq b_1 \leq 1, 0 \leq b_2 \leq 1} \max_{f(X_1, X_2, X_3)} \min \{ I(X_1; Y_2, Y_3, Y_4 | X_2 X_3), \\ & I(X_1, X_2, X_3; Y_4), I(X_1; Y_2, Y_4 | X_2), I(X_1; Y_3, Y_4 | X_3) \} = \\ & \max_{0 \leq b_1 \leq 1, 0 \leq b_2 \leq 1} \min \{ R_1, R_2, R_3, R_4 \} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $R_1, R_2, R_3, R_4$ 分别代表上式大括号中的四项。当信源功率一定时,高斯分布信源的熵最大<sup>[9]</sup>。所以有:

$$\begin{aligned} R_1 = & \max_{f(X_1, X_2, X_3)} I(X_1; Y_2, Y_3, Y_4 | X_2 X_3) = \\ & \frac{1}{2} \text{lb} \{ 2\pi e [ D(c_{41}X_{14} + c_{21}X_{12} + c_{31}X_{13}) + N ] \} - \\ & \frac{1}{2} \text{lb} (2\pi e N) = \frac{1}{2} \text{lb} (1 + b_1 P_1 c_{21}^2 + b_2 P_1 c_{31}^2 + \\ & (1 - b_1 - b_2) P_1 c_{41}^2) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} R_2 = & \max_{f(X_1, X_2, X_3)} I(X_1, X_2, X_3; Y_4) = \frac{1}{2} \text{lb} \{ 2\pi e [ D(c_{41}X_{14} + \\ & c_{42}X_2 + c_{43}X_3) + N ] \} - \frac{1}{2} \text{lb} (2\pi e N) = \\ & \frac{1}{2} \text{lb} (1 + (1 - b_1 - b_2) c_{41}^2 P_1 + c_{42}^2 P_2 + c_{43}^2 P_3 + \\ & 2 \sqrt{(1 - b_1 - b_2) c_{41}^2 c_{42}^2 P_1 P_2} + \\ & 2 \sqrt{(1 - b_1 - b_2) c_{41}^2 c_{43}^2 P_1 P_3}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} R_3 = & \max_{f(X_1, X_2, X_3)} I(X_1; Y_2, Y_4 | X_2) = \frac{1}{2} \text{lb} \{ 2\pi e [ D(c_{41}X_{14} + \\ & c_{21}X_{12} + c_{43}X_3) + N ] \} - \frac{1}{2} \text{lb} (2\pi e N) = \\ & \frac{1}{2} \text{lb} (1 + b_1 c_{21}^2 P_1 + (1 - b_1 - b_2) c_{41}^2 P_1 + c_{43}^2 P_3 + \\ & 2 \sqrt{(1 - b_1 - b_2) c_{41}^2 c_{43}^2 P_1 P_3}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} R_4 = & \max_{f(X_1, X_2, X_3)} I(X_1; Y_3, Y_4 | X_3) = \\ & \frac{1}{2} \text{lb} \{ 2\pi e [ D(c_{41}X_{14} + c_{31}X_{13} + c_{42}X_2) + N ] \} - \\ & \frac{1}{2} \text{lb} (2\pi e N) = \\ & \frac{1}{2} \text{lb} (1 + b_2 c_{31}^2 P_1 + (1 - b_1 - \\ & b_2) c_{41}^2 P_1 + c_{42}^2 P_2 + 2 \sqrt{(1 - b_1 - b_2) c_{41}^2 c_{42}^2 P_1 P_2}) \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $D$ 表示方差算子; $N$ 为噪声信号, $N$ 与所有发射以及接收信号独立,且服从均值为0、方差为1的正态分布; $b_1, b_2$ 分别为由源节点向中继节点2,3发射的功率所占源节点发射总功率的比例。

本文的主要目的是通过适当的功率分配,使得系统的信道容量达到最大。因此,主要是求出最佳的 $b_1, b_2$ 。分以下三种情况讨论。

1) 当 $c_{41} \geq \max\{c_{21}, c_{31}\}$ 时, $R_1, R_2, R_3, R_4$ 均随着 $b_1, b_2$ 的增大而减小。因此,当 $b_1 = b_2 = 0$ 时,系统的信道容量最大,即可以归结为当源节点直接向目标节点传输时,信道容量最大。

2) 当 $\min\{c_{21}, c_{31}\} \leq c_{41} < \max\{c_{21}, c_{31}\}$ 时,当 $c_{21} > c_{31}$ 时,则 $b_2 = 0$ 。此时, $R_1 < R_3, R_4 < R_2$ 。由于 $R_1$ 随着 $b_1$ 的增大而增大, $R_4$ 随着 $b_1$ 的增大而减小。则当 $b_2 = 0, b_1 = 1$ 时,

$$R_1 = \frac{1}{2} \text{lb} (1 + P_1 c_{21}^2) \quad (9)$$

$$R_4 = \frac{1}{2} \text{lb} (1 + c_{42}^2 P_2) \quad (10)$$

当 $P_2 c_{42}^2 \geq P_1 c_{21}^2$ 时,则当 $b_1 = 1, b_2 = 0$ 时,系统的信道容量最大,即可以归结为源节点完全将信号通过中继节点2来传输。当 $P_2 c_{42}^2 < P_1 c_{21}^2$ 时,当 $R_1 = R_4$ 时,信道容量最大。当 $c_{21} < c_{31}$ 时,则 $b_1 = 0$ 。此时, $R_1 < R_4, R_3 < R_2$ 。由于 $R_1$ 随着 $b_2$ 的增大而增大, $R_3$ 随着 $b_2$ 的增大而减小。则当 $b_1 = 0, b_2 = 1$

时:

$$R_1 = \frac{1}{2} \ln(1 + P_1 c_{31}^2) \quad (11)$$

$$R_3 = \frac{1}{2} \ln(1 + c_{43}^2 P_3) \quad (12)$$

当  $P_3 c_{43}^2 \geq P_1 c_{31}^2$  时, 则当  $b_1 = 0, b_2 = 1$  时, 系统的信道容量最大, 即可以归结为源节点完全将信号通过中继节点 3 来传输。当  $P_3 c_{43}^2 < P_1 c_{31}^2$  时, 当  $R_1 = R_3$  时, 信道容量最大。

3) 当  $c_{41} < \min\{c_{21}, c_{31}\}$  时, 可得:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{1}{2} \ln(1 + b_1 P_1 c_{21}^2 + b_2 P_1 c_{31}^2 + \\ &\quad (1 - b_1 - b_2) P_1 c_{41}^2) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{1}{2} \ln(1 + (1 - b_1 - b_2) P_1 c_{41}^2 + P_2 c_{42}^2 + P_3 c_{43}^2 + \\ &\quad 2 \sqrt{(1 - b_1 - b_2) c_{41}^2 c_{42}^2 P_1 P_2} + \\ &\quad 2 \sqrt{(1 - b_1 - b_2) c_{41}^2 c_{43}^2 P_1 P_3}) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} R_3 &= \frac{1}{2} \ln(1 + b_1 c_{21}^2 P_1 + (1 - b_1 - b_2) c_{41}^2 P_1 + c_{43}^2 P_3 + \\ &\quad 2 \sqrt{(1 - b_1 - b_2) c_{41}^2 c_{43}^2 P_1 P_3}) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} R_4 &= \frac{1}{2} \ln(1 + b_2 c_{31}^2 P_1 + (1 - b_1 - b_2) c_{41}^2 P_1 + c_{42}^2 P_2 + \\ &\quad 2 \sqrt{(1 - b_1 - b_2) c_{41}^2 c_{42}^2 P_1 P_2}) \end{aligned} \quad (16)$$

由此可得:  $R_1$  随着  $b_1, b_2$  的增大而增大;  $R_2$  随着  $b_1, b_2$  的增大而减小。由于信道容量为  $R_1, R_2, R_3, R_4$  的最小值, 但是由于  $0 \leq b_1 + b_2 \leq 1$ , 假如  $b_1 + b_2 = 1$ , 式(13)~(16) 简化如下:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{1}{2} \ln(1 + b_1 P_1 c_{21}^2 + b_2 P_1 c_{31}^2 + \\ &\quad (1 - b_1 - b_2) P_1 c_{41}^2) \end{aligned} \quad (17)$$

$$R_2 = \frac{1}{2} \ln(1 + P_2 c_{42}^2 + P_3 c_{43}^2) \quad (18)$$

$$R_3 = \frac{1}{2} \ln(1 + b_1 c_{21}^2 P_1 + c_{43}^2 P_3) \quad (19)$$

$$R_4 = \frac{1}{2} \ln(1 + b_2 c_{31}^2 P_1 + c_{42}^2 P_2) \quad (20)$$

下面分四种情况讨论。

1) 当  $P_2 c_{42}^2 \geq P_1 c_{21}^2, P_3 c_{43}^2 \geq P_1 c_{31}^2$  时, 无论  $b_1, b_2$  如何取值,  $R_1 \leq \min\{R_2, R_3, R_4\}$ , 因此,  $b_1 + b_2 = 1$ , 即信源节点将信息完全传输给中继节点 2 和 3, 当  $c_{21} > c_{31}$  时,  $b_1 = 1$ , 即信源节点通过中继节点 2 来传输。当  $c_{21} < c_{31}$  时,  $b_2 = 1$ , 即信源节点通过中继节点 3 来传输。当  $c_{21} = c_{31}$  时, 无论  $b_1, b_2$  如何取值, 都不影响系统的信道容量。

2) 当  $P_2 c_{42}^2 < P_1 c_{21}^2, P_3 c_{43}^2 < P_1 c_{31}^2$  时, 令  $b_3 = 1 - b_1 - b_2$ ,  $b_3$  为源节点直接向目标节点发射的功率所占源节点发射总功率的比例, 则式(13)~(16) 分别为:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{1}{2} \ln(1 + b_1 P_1 (c_{21}^2 - c_{31}^2) + P_1 c_{31}^2 - b_3 P_1 c_{31}^2 + \\ &\quad b_3 P_1 c_{41}^2) = \\ &= \frac{1}{2} \ln(1 + P_1 c_{21}^2 + b_2 P_1 (c_{31}^2 - c_{21}^2) - b_3 P_1 c_{21}^2 + \\ &\quad b_3 P_1 c_{41}^2) \end{aligned} \quad (21)$$

$$R_2 = \frac{1}{2} \ln(1 + b_3 P_1 c_{41}^2 + P_2 c_{42}^2 + P_3 c_{43}^2 +$$

$$2 \sqrt{b_3 c_{41}^2 c_{42}^2 P_1 P_2} + 2 \sqrt{b_3 c_{41}^2 c_{43}^2 P_1 P_3}) \quad (22)$$

$$\begin{aligned} R_3 &= \frac{1}{2} \ln(1 + b_1 c_{21}^2 P_1 + b_3 c_{41}^2 P_1 + c_{43}^2 P_3 + \\ &\quad 2 \sqrt{b_3 c_{41}^2 c_{43}^2 P_1 P_3}) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} R_4 &= \frac{1}{2} \ln(1 + b_2 c_{31}^2 P_1 + b_3 c_{41}^2 P_1 + c_{42}^2 P_2 + \\ &\quad 2 \sqrt{b_3 c_{41}^2 c_{42}^2 P_1 P_2}) \end{aligned} \quad (24)$$

由于  $R_1$  随着  $b_3$  的增大而减小,  $R_2$  随着  $b_3$  的增大而增大。

假如  $R_2 = R_3$ , 则:

$$b_1 = \frac{P_2 c_{42}^2 + 2 \sqrt{b_3 c_{41}^2 c_{42}^2 P_1 P_2}}{P_1 c_{21}^2} \quad (25)$$

由于  $b_2 = 1 - b_1 - b_3$ , 将其代入式(24), 将求  $b_1, b_2$  转化成只求  $b_3$  (即源节点直接向目标节点发射的功率所占源节点发射总功率的比例), 减少了计算量。

3) 当  $P_2 c_{42}^2 \geq P_1 c_{21}^2, P_3 c_{43}^2 < P_1 c_{31}^2$  时, 无论  $b_1, b_2$  如何取值,  $R_4 > R_1, R_2 > R_3$  恒成立, 这里可以不考虑  $R_2, R_4$ 。当  $c_{21} \geq c_{31}$  时,  $b_2 = 0, b_1 = 1$ 。当  $c_{21} < c_{31}$  时, 假如  $R_1 = R_3$ , 则:

$$b_2 = \frac{P_3 c_{43}^2 + 2 \sqrt{b_3 c_{41}^2 c_{43}^2 P_1 P_3}}{P_1 c_{31}^2} \quad (26)$$

只求出  $b_3$  即可。

4) 当  $P_2 c_{42}^2 < P_1 c_{21}^2, P_3 c_{43}^2 \geq P_1 c_{31}^2$  时, 分析方法类似于 3)。

### 3 仿真分析

由式(5)~式(8) 可得, 当各发射功率同时扩大或缩小相同的倍数, 对各信道容量性能分析没有影响。因此, 在仿真时仅用相对功率来表示。由于该实验的参数较多, 且各参量的取值范围较大。为了减少实验量, 可以将  $P_i c_{ij}^2 (i \in \{1, 2, 3\}, j \in \{2, 3, 4\})$  作为一个整体变量。下面分别根据第 2 章讨论的各种情况进行仿真, 如图 2~图 4 所示。

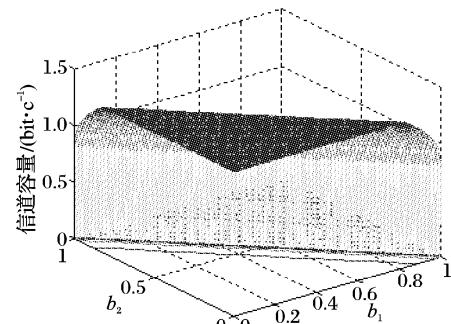


图 2  $P_1 c_{21}^2 = P_1 c_{31}^2 = P_1 c_{41}^2 = 12, P_2 c_{42}^2 = P_3 c_{43}^2 = 1$  时的仿真

由于篇幅有限, 仿真实验不再一一举出。由图 2~图 3 得出, 当信源节点到目标节点的信道增益大于信源节点到各中继节点的信道增益时, 信源节点可以直接传送给目标节点。当信源节点到各中继节点的信道增益的平方与信源节点发射功率的乘积小于各中继节点到目标节点信道增益的平方与相应中继节点发射功率的乘积时, 信源节点可以完全通过中继节点来传送给目标节点。

在其他一般情况下, 源节点可以一部分直接传输到目标

节点,一部分通过中继节点来传输,由图2~图4可知,存在 $b_1, b_2 \in [0,1]$ ,使得系统的信道容量最大。

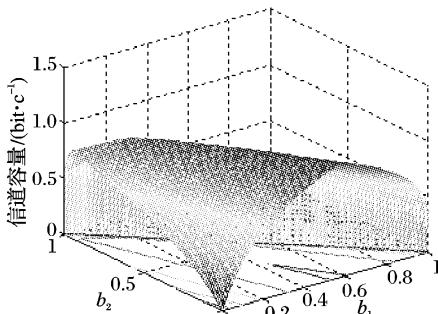


图3  $P_1 c_{21}^2 = 12, P_1 c_{31}^2 = 4, P_1 c_{41}^2 = 6, P_2 c_{42}^2 = 1, P_3 c_{43}^2 = 2$  时的仿真

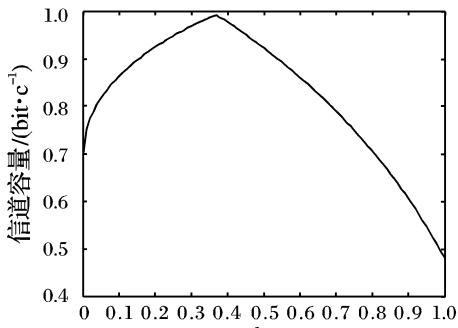


图4  $P_1 c_{21}^2 = 8, P_1 c_{31}^2 = 12, P_1 c_{41}^2 = 1, P_2 c_{42}^2 = 1, P_3 c_{43}^2 = 2$  时的仿真

## 4 结语

本文研究了在三用户协作通信系统模型下,在等增益合并模型中,基于固定信道增益情况下的不同功率分配的信道

(上接第3150页)

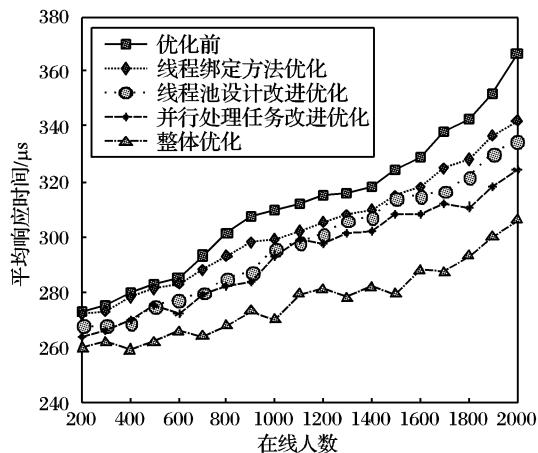


图5 各种优化方法在不同在线人数下的平均响应时间

由图5可以看出,采用不同方法对服务器系统优化后,用户动作消息响应时间明显变短,服务器性能有了进一步提升。

## 5 结语

通过采用相应方法对网络服务器模型建立和求解,可以有效地分析出影响服务器性能的因素,并对此进行改进。此外,由于本文对服务器性能的优化主要集中在单服务器上,所以对性能的提高具有一定限制。采用分布式策略以及使用更为精确的性能模型和优化方法是提高服务器性能需要进一步研究的问题。

容量问题,给出了在最大容量准则下的最优功率分配方法。这样,不必要在移动终端安装多根天线,推动了MIMO技术的实用化。

### 参考文献:

- [1] ZHAO SHAOGANG, LI YUEMENG. Cooperative communication in mobile communication networks[J]. Mobile Communication, 2005, 29(4): 91~94.
- [2] LANEMAN J N, TSE D N C. Cooperative diversity in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062~3071.
- [3] 郭佳,罗汉文,李洪星. AF-DSTC 协作通信中基于中断概率的功率分配方法[J]. 上海交通大学学报,2009, 43(3): 377~380.
- [4] 古金凤,赵生妹. 协作中继信道的容量分析和功率控制[C]//中国电子学会第十五届信息论学术年会暨第一届全国网络编码学术年会论文集(下册). 北京:[s. n.], 2008: 907~910.
- [5] HOST-MADSEN A, ZHANG JUNSHAN. Capacity bounds and power allocation for wireless relay channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(6): 2020~2029.
- [6] 江俊. 合作通信系统分集技术及功率优化分配研究[D]. 成都:电子科技大学, 2005.
- [7] 倪涛. 提高 MIMO 系统容量的功率分配与编码方法的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2007.
- [8] 傅祖芸. 信息论——基础理论与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
- [9] COVER T M, GAMAL A A. Capacity theorems for the relay channel[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1979, 25(6): 577~584.
- [10] 高源,高西奇. 三节点无线高斯中继信道容量分析[J]. 通信学报, 2006, 27(7): 127~134.

### 参考文献:

- [1] 叶晖俊. 基于排队网络的电子商务系统的性能建模[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2006.
- [2] 徐超, 刘璐璐. 基于排队网络的大型网络游戏服务器性能分析[J]. 微计算机应用, 2009, 30(3): 1~4.
- [3] REISER M. Mean value analysis of distributed server system [D]. Canada: Carleton University, 1999.
- [4] REISER M, LAVENBURG S S. Mean value analysis of closed multichain queueing networks [R]. Yorktown Heights, NY: Watson Research Center, 1979.
- [5] 贺娜, 杨扬. 资源同时占有平均值分析方法的C/S系统应用[J]. 计算机与现代化, 2004(4): 50~52.
- [6] 强彦, 李轶, 陈俊杰. 集合点平均值分析方法的分布式系统应用[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(11): 173~176.
- [7] 林闯. 计算机网络和计算机系统的性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [8] 徐宝, 宋立新. 贝叶斯框架下泊松分布参数的估计[J]. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2009, 45(6): 23~25.
- [9] 徐磊, 徐莹, 张丹丹. 利用 OpenMP 线程绑定技术提升多核平台应用性能[J]. 高性能计算发展与应用, 2009(1): 67~70.
- [10] 王华, 马亮, 顾明. 线程池技术研究与应用[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(11): 141~143.