

面向 MIMO 多跳无线网络的多用户视频传输优化方法*

周超, 张行功, 郭宗明

(北京大学 计算机科学技术研究所, 北京 100871)

通讯作者: 郭宗明, E-mail: guozongming@pku.edu.cn, http://www.icst.pku.edu.cn

摘要: MIMO(multi-input multi-output)作为一种有效提高无线信道可靠性和带宽的新兴技术,已在无线网络中得到广泛应用.但是,如何利用 MIMO 在多跳无线网络中为多用户提供高质量视频服务,尚未得到广泛关注.多跳无线链路之间的共信道干扰是需要解决的关键问题.提出一种面向多跳无线网络的多用户视频传输方法,利用链路选择、MIMO 的空间复用和空间分集等特点,减少链路间的共信道干扰,最大化多用户的平均视频传输质量.通过对链路选择和天线分组进行建模,将上述传输策略抽象成一个最优化问题,该问题是一个 NP-hard 问题.为了降低求解复杂度,引入遗传算法来求解链路选择问题.该算法采用基因遗传“优胜劣汰”的特性,在保证性能的同时,大幅度降低了求解复杂度.另外,由于遗传算法中每条“染色体”的“优劣”与天线分组策略有关,因此结合可伸缩视频的失真模型,将天线分组问题转化为一个标准的 0/1 背包问题,并在搜索时采用深度优先和分支限界技术,进一步降低算法复杂度.实验结果表明,所提出的链路选择算法和天线分组算法均能显著提高用户接收视频的质量.

关键词: MIMO(multi-input multi-output)无线网络;多用户;链路选择;天线分组;遗传算法

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

中文引用格式: 周超,张行功,郭宗明.面向 MIMO 多跳无线网络的多用户视频传输优化方法.软件学报,2013,24(2):279-294.
http://www.jos.org.cn/1000-9825/4201.htm

英文引用格式: Zhou C, Zhang XG, Guo ZM. Optimization scheme for multi-user video transmission over MIMO multi-hop wireless networks. Ruanjian Xuebao/Journal of Software, 2013,24(2):279-294 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/4201.htm

Optimization Scheme for Multi-User Video Transmission Over MIMO Multi-Hop Wireless Networks

ZHOU Chao, ZHANG Xing-Gong, GUO Zong-Ming

(Institute of Computer Science and Technology, Peking University, Beijing 100871, China)

Corresponding author: GUO Zong-Ming, E-mail: guozongming@pku.edu.cn, http://www.icst.pku.edu.cn

Abstract: MIMO (multi-input multi-output), a promising technology that hopes to improve reliability and bandwidth of wireless networks, has been widely deployed. However there has been little literature that describes how to provide high-quality video service for multi-user over MIMO multi-hop wireless networks. The co-channel interference among multiple wireless links is one of the critical issues. This paper proposes a scheme for multi-user video transmission over multi-hop wireless networks and combats with interference by employing link selection, spatial multiplexing and spatial diversity gain of MIMO. Furthermore, the study formulates this scheme as an optimization problem, which is a NP-hard problem. To make it suitable for practical implementation, the study employs a modified genetic algorithm to solve the link selection problem. Moreover, according to the characteristics of scalable video and MIMO, the antenna grouping problem is transformed into one 0/1 knapsack problem. The depth first search and branch bound techniques are used to further reduce the searching range. The study demonstrate the effectiveness of the proposed scheme by extensive experiments.

Key words: MIMO (multi-input multi-output) wireless network; multiuser; link selection; antenna grouping; genetic algorithm

* 基金项目: 国家自然科学基金(60902004); 国家科技支撑计划(2012BAH18B03); 高等学校博士学科点专项科研基金(20090001120027);

收稿时间: 2011-09-06; 定稿时间: 2012-02-28

随着无线网络带宽的提升与视频压缩技术的发展,基于无线网络的视频应用得到了迅速发展.但无线信号的干扰和与带宽的有限性使得无线多跳网络上的多用户视频服务仍然面临着许多挑战.MIMO(multi-input multi-output),也称为多天线技术,是无线通信领域的一个突破.它在不增加额外带宽和功率的情况下,可以极大地提高系统容量和传输可靠性^[1-3].目前,MIMO 技术已经成为多个通信标准的核心技术,包括无线局域网协议 IEEE 802.11n、无线城域网协议 IEEE 802.16(WiMAX)以及 LTE 和 LTE-Advanced 等.通常情况下,MIMO 技术可以提供空间分集增益和空间复用增益,分别用于提高系统的传输可靠性和传输有效性.

在多跳无线网络中,多用户多链路同时进行传输,链路之间会产生一定的影响和干扰.如何利用 MIMO 的空间分集和空间复用特性,提高多跳网络中视频传输的质量,尚未得到广泛关注.例如,在如图 1 所示的一个典型的多跳多用户网络中,有 4 个用户利用 4 条链路同时传输视频.其中,链路 I 和链路 III 的传输均会对链路 II 的传输产生干扰;同样地,链路 IV 的传输又会对链路 III 的传输产生干扰.因此,如何控制各条链路之间的相互干扰,是多跳网络多用户视频传输面临的一大挑战,也是本文关注的重点之一.

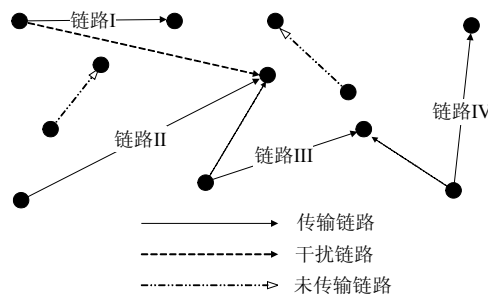


Fig.1 Sketch of co-channel interference in a multiuser network

图 1 多用户网络的共信道干扰示意图

MIMO 可提供空间分集增益和空间复用增益.空间分集主要用于对抗信道的衰落,提高传输的可靠性.空间复用则主要用于提高传输速率,提高系统传输的有效性.但是二者是相互影响、相互矛盾的^[4],提高一种增益必定降低另一种增益.因此,针对无线多跳网络中链路间的干扰,如何有效利用 MIMO 的空间分集增益与空间复用增益,提高多用户视频传输的质量,是本文重点要解决的问题.

本文提出一种面向多跳网络的多用户视频传输的优化传输策略.该策略通过链路选择来控制链路之间的共信道干扰,同时采用 MIMO 天线分组来提高信道抗干扰性.通过 MIMO 的空间复用与空间分集,同时结合可伸缩视频的分层特性^[5],为不同视频层提供非对称保护.通过对天线分组和链路选择进行建模,将本文提出的传输策略形式化描述成一个最优化问题,其目标为最大化多用户的平均视频质量.该优化问题是一个 NP-hard 问题,采用全搜索算法的复杂度太高.由于链路间的共信道干扰只与链路选择策略有关,当给定链路选择方案时,链路之间的共信道干扰将固定.基于这些考虑,本文提出了一种高效的次优解法:首先采用遗传算法确定链路选择方案,然后再用背包算法确定天线分组,从而求解该问题.与传统的全搜索算法相比,本文提出的次优算法在保证性能的同时,大幅度降低了求解复杂度.该算法主要包括以下两个方面:

(1) 利用遗传算法求解链路选择.在多跳 MIMO 网络中,通过选择不同的传输链路,可最大化系统的传输质量.但在一个具有 S 条链路的多跳网络中,一共有 2^S 种可能的链路选择方案.显然,这样的复杂度是难以接受的.本文采用遗传算法求解该问题,对备选的链路选择方案进行编码,并定义每一种选择为一个染色体.然后通过染色体之间的“变异”、“交叉”以及“选择”等操作,经过多次遗传迭代,进而选择优良的染色体作为最终链路选择方案.实验结果表明,与全搜索算法相比,该算法在保证性能的同时,大幅度降低了算法求解复杂度.

(2) 利用背包方法求解天线分组.在上述遗传算法中,为了衡量每一条染色体的“优劣”,需要估计出在该染色体对应的链路选择方案下,所有用户的平均视频质量;而视频质量不仅与链路选择策略相关,而且受到天线分组策略的影响.由于可伸缩视频的视频层具有不同的重要性,可通过天线分组为不同视频层提供非对称保护.组

内的天线采用空间分集技术^[2],提高传输的可靠性;组与组之间采用空间复用技术^[6],提高传输的带宽.由于各天线的质量存在差异,全搜索法具有较大的复杂度.本文提出一种深度优先搜索方法和分支限界方法,将原问题转化为一个 0/1 背包问题,降低搜索空间.

本文第 1 节回顾相关的研究工作.第 2 节首先对链路选择问题建模,然后联合天线分组问题进一步进行建模.第 3 节首先介绍我们的系统模型,然后将本文提出的传输策略形式化描述成一个最优化问题.第 4 节给出该优化问题的求解算法.与传统的全搜索算法相比,本文提出的算法在保证性能的同时,大幅度降低了算法复杂度.第 5 节从实验的角度验证本文提出的优化传输策略的性能.第 6 节对本文进行总结.

1 相关工作

在 MIMO 系统中,一方面,采用空间复用技术^[6]能够提高系统的传输效率,另一方面,也能通过空间分集技术^[2]来提高系统的传输可靠性.基于 MIMO 系统的传统传输策略,要么侧重于最大化空间分集增益,从而提高系统传输的可靠性;要么侧重于最大化空间复用增益,从而提高系统传输效率.但是在实际系统中,有时期望同时获得这两种增益.文献[7]结合实时的信道状态信息,通过在空间复用增益和空间分集增益之间进行动态的切换,从而提高系统性能.但是该方法并不能同时获得空间复用增益和空间分集增益,只能在二者之间进行切换.Zheng 和 Tse 等人^[8]从信息论的角度证明了在 MIMO 系统中,空间分集增益和空间复用增益之间存在着严格的约束关系,其中一种增益的增大一定是以另一种增益的减小为代价的.但是他们仅仅从信息论的角度证明了这个结论,并没有给出实际中该如何达到最优的折中.

利用 MIMO 进行可伸缩视频传输,是目前的一个研究热点.视频序列经过可伸缩视频编码,被编码为多层结构,包括一个基本层和多个增强层,其中各层的重要性也各不一样.因此在传输过程中,采用非对称保护策略能够显著提高接收视频的质量.Chen 等人于 2007 年提出了 ACS-MIMO^[8].该系统对 PT-MIMO^[9]做了一些改进,即依据视频层的重要性以及各子信道的质量状况,从而将各视频层在各子信道之间动态地切换,实现非对称保护(unequal error protection,简称 UEP).实验结果表明,ACS-MIMO 与 PT-MIMO 相比大幅度提高了接收视频的峰值信噪比(peak signal to noise ratio,简称 PSNR).基于该思想,出现了大量的相关研究^[10,11],但是这类方法都仅从子信道质量的角度实现 UEP,只利用了 MIMO 的空间复用特性,而没有考虑利用 MIMO 的空间分集特性进一步降低重要数据的传输误码率.

在单用户情况下,基于 MIMO 的可伸缩视频传输的研究工作有很多.但是在多用户情况下,存在多条传输链路,各链路之间相互影响,相互干扰,传输策略的设计就变得更加复杂,目前,相关的研究工作非常少.通过天线分组,MIMO 系统可有多种工作模式,不同工作模式的抗干扰能力不一样.文献[12]中提出了通过动态选择恰当的工作模式,利用 MIMO-Pipe 来对抗信道与各链路之间的噪声和干扰,但是这些策略没有采取任何措施来减小链路之间的共信道干扰.Liu 等人^[13]从理论的角度分析了 MIMO 的信道矩阵以及用户之间的干扰,提出了一种称为 OBIC(abbreviation of order-based interference cancelation)的空间调度策略,对抗各条链路之间的共信道干扰.然而,上述这些文献都假设所有发射天线都有相同的质量,而在实际系统中,这种假设是非常不合理的.

2 链路选择与天线分组模型

在多用户 MIMO 网络中存在多条传输链路,各链路之间相互影响,相互干扰.为了降低链路之间的共信道干扰,本文提出采用链路选择策略抑制链路之间的共信道干扰.此外,针对每条 MIMO 链路由于在发射端和接收端装配有多根天线,MIMO 系统能够获得空间分集增益和空间复用增益.为了将这二者有机地结合起来,本文提出了天线分组技术,即把发射天线分成不同小组,每个小组内部的天线采用空间分集技术,以提高传输可靠性;组与组之间则采用空间复用技术,以提高传输有效性.通过采用合适的天线分组策略,各组天线的等效传输信道信噪比可以各不相同,这对于需要进行非对称保护传输的应用是非常有效的,例如可伸缩视频传输.在本节中,我们将先对链路选择进行建模,即建立链路选择方案与共信道干扰之间的关系.在此基础上,我们再联合链路选择与天线分组技术建模,建立各小组天线的丢包率与链路选择及天线分组之间的关系.

2.1 链路选择模型

考虑一个具有 S 条传输链路的多用户 MIMO 网络,所有的链路都在相同的信道上进行传输,彼此之间存在共信道干扰.假设第 s 条链路的发送端和接收端分别装配了 N_t^s 根发射天线和 N_r^s 根接收天线.第 s 条链路的用户收到的信号 y_s 可以表示为如下形式:

$$y_s = \sqrt{\frac{P}{N_t^s d_{ss}^\alpha}} \mathbf{H}_{ss} x_s + \sum_{j \neq s} \sqrt{\frac{P}{N_t^j d_{js}^\alpha}} \mathbf{H}_{js} x_j + n_s \quad (1)$$

其中, P 代表每条链路总的传输功率.同时,我们假设该总功率是固定的,并且平均分配到每根发射天线; x_s 代表第 s 条链路的传输信号,是一个 $N_t^s \times 1$ 维的向量,在每个符号周期,其归一化功率为 1; d_{js} 代表了第 j 个发送端与第 s 个接收端之间的距离, α 是信道衰落指数; \mathbf{H}_{js} 代表了第 j 个发送端与第 s 个接收端之间的信道传输矩阵,是一个 $N_r^s \times N_t^j$ 的二维矩阵.另外, \mathbf{H}_{js} 与 $\mathbf{H}_{j's'}$ ($s \neq s'$) 是相互独立的; n_s 是加性高斯白噪声,其方差为 $\sigma^2 = E[\|n_s\|^2]/N_r^s$. 表达式(1)的右边包括 3 项,其中,第 1 项代表接收到的实际传输有用的信号;第 2 项代表在多用户网络中,链路之间的共信道干扰;最后一项是加性高斯噪声.我们假设信道传输矩阵 \mathbf{H}_{js} 在发送端和接收端均是未知的,在进行实际数据调度和传输之前,通过发送探测符号,在接收端对信道进行估计,得到信道估计矩阵,然后再反馈给各个节点.同时还假设任意两节点之间的信道传输矩阵在一段时间间隔(时隙 T)之内保持不变,但是在各个时隙之间是时变的,因此,整个调度策略是在每个时隙之内进行的.在文献[14]中指出,第 s 个接收端受到其他链路的共信道干扰的大小可以简化表示为

$$I_s = \sum_{j \neq s} \frac{P}{N_t^j d_{js}^\alpha} \frac{E[\text{Tr}\{\mathbf{H}_{js} \mathbf{H}_{js}^H\}]}{N_r^s} \quad (2)$$

定义符号 $A_s \in \{0, 1\}$, $\forall s \geq 1 \& s \leq S$. $A_s = 1$ 表示经过链路选择策略后,第 s 条链路可以进行传输; $A_s = 0$ 表示为了减小链路之间的干扰,第 s 条链路不允许进行传输.

定义符号 A 表示一种链路选择方案,则 $A = [A_1, A_2, \dots, A_S]$, $A_s \in \{0, 1\}$, $\forall s \geq 1 \& s \leq S$. 考虑到实际进行传输的链路的数量不可能超过链路的总数量,因此,

$$\sum_{s=1}^S A_s \leq S \quad (3)$$

结合公式(2),则经过链路选择后,被选择进行传输的链路对第 s 条链路的共信道干扰可以表示为

$$I_s = \sum_{i \neq s} A_i \frac{P}{N_t^i d_{is}^\alpha} \frac{E[\text{Tr}\{\mathbf{H}_{is} \mathbf{H}_{is}^H\}]}{N_r^s} \quad (4)$$

2.2 联合链路选择与天线分组模型

在多用户 MIMO 网络中,影响接收信号的干扰包括两部分:一是链路之间的共信道干扰,由公式(4)给出;二是每条链路各天线之间的噪音.在这一节,我们将首先利用探测符号对信道进行估计,获得当前信道的质量情况,然后讨论天线分组策略对各组天线的等效信噪比的影响,最后对联合链路选择与天线分组策略建模.为了便于表示,下文如果不作特殊说明,约定所有符号的上标 s 均代表第 s 条链路.

针对第 s ($\forall 1 \leq s \leq S$) 条链路,我们首先考虑天线分组策略对接收信号信噪比的影响.

定义符号 $g_{l,i}^s \in \{0, 1\}$, $\forall i, l$, $g_{l,i}^s = 1$ 代表第 i 根天线被分到第 l 组;否则, $g_{l,i}^s = 0$. 考虑到任意一根天线最多被分配到 1 组天线中,因此在进行天线分组时,需要满足如下条件:

$$\sum_{l=1}^{L^s} g_{l,i}^s \leq 1, \forall i \geq 1 \& i \leq N_t^s \quad (5)$$

$$\sum_{l=1}^{L^s} \sum_{i=1}^{N_t^s} g_{l,i}^s \leq N_t^s \quad (6)$$

即每根天线最多被分配到一组,所有被选中的天线不大于天线总数量.其中, N_t^s 代表第 s 条链路发射天线的数

量, L^s 代表第 s 条链路的的天线一共被分成了 L^s 组. 另外, 定义符号 G_l^s , 代表第 s 条链路的第 l 组所包含天线的集合. 考虑到任意一根天线不可能同时出现在两组天线当中, 因此 $G_l^s \cap G_{l'}^s = \emptyset, \forall l \neq l'$. G^s 代表第 s 条链路各分组的集合, 唯一地描述了一种天线分组方案, 即 $G^s = \{G_1^s; G_2^s; \dots; G_{L^s}^s\}$.

在传输数据之前, 我们首先通过传输探测符号的方法对信道情况进行估计^[15]. 假设 X 为 $N_t^s \times L_T$ 的探测符号序列, 其中, L_T 为每根天线发送探测序列的长度. 为了最小化信道估计误差, 探测序列 X 满足^[16]:

$$XX^H = L_T \times I_{N_t^s} \quad (7)$$

其中, $(\cdot)^H$ 代表对矩阵进行厄米共轭操作. 不考虑链路之间的共信道干扰时, 公式(1)的传输方程可以简化为

$$Y = \sqrt{\frac{P}{N_t^s d_{ss}^\alpha}} \mathbf{H}_{ss} X + n_s \quad (8)$$

即, 接收信号中不存在共信道干扰. 其中, Y 代表接收信号向量, d_{ss} 代表发送端与接收端之间的距离, n_s 代表信道高斯白噪声.

在接受端接收到探测序列 Y 后, 采用最小均方误差准则, 则信道估计矩阵可以表述为^[17]

$$\hat{\mathbf{H}}_{\text{MMSE}}^s = \sqrt{\frac{P}{N_t^s d_{ss}^\alpha}} Y X^H \left(\frac{P}{N_t^s d_{ss}^\alpha} X X^H + I_{N_t^s} \right)^{-1} \quad (9)$$

基于该信道估计矩阵, 在接受端接收到的探测序列的判决序列为

$$\hat{X} = \mathbf{G}_{\text{MMSE}}^s \cdot Y \quad (10)$$

其中, $\mathbf{G}_{\text{MMSE}}^s$ 是一个权重矩阵. 依据公式(9)中的信道估计矩阵, $\mathbf{G}_{\text{MMSE}}^s$ 的形式如下^[18]:

$$\mathbf{G}_{\text{MMSE}}^s = \sqrt{\frac{N_t^s d_{ss}^\alpha}{P}} \left(\hat{\mathbf{H}} \hat{\mathbf{H}}^H + \frac{N_t^s}{\rho_{\text{all}}} I_{N_t^s} \right)^{-1} \hat{\mathbf{H}}^H \quad (11)$$

为了使表述简单, 上式中, $\hat{\mathbf{H}}$ 是 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{MMSE}}^s$ 的简写. ρ_{all} 是所有接收符号的总信噪比. 经过天线分组, 组内的天线通过采用空间分集技术(例如正交空时分组码编码)进一步提高接受信号的信噪比. 依据公式(11), 第 l 组天线接受信号的信噪比可以表示为

$$\gamma_l^s = \frac{P \sum_{i \in G_l^s} |(\mathbf{g}_i^s)^H \mathbf{h}_i^s|^2}{N_t^s \sigma^2 \sum_{i \in G_l^s} \|\mathbf{g}_i^s\| + P \sum_{j \in G_l^s} |(\mathbf{g}_j^s)^H \mathbf{h}_j^s|^2} \quad (12)$$

其中, \mathbf{g}_i^s 和 \mathbf{h}_i^s 分别表示了矩阵 $\mathbf{G}_{\text{MMSE}}^s$ 的第 i 行和矩阵 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{MMSE}}^s$ 的第 i 列; N_t^s 代表集合 G_l^s 的势, 即集合 G_l^s 包含天线的数量.

公式(12)描述了天线分组策略对接受信号信噪比的影响. 考虑到在多用户 MIMO 网络中链路之间存在着共信道干扰, 如公式(4)所示, 因此在多链路情况下, 联合链路选择和天线分组策略, 第 s 条链路第 l 组天线在传输时的等效信噪比进一步表示为

$$\begin{aligned} \gamma_l^s &= \frac{P \sum_{i \in G_l^s} |(\mathbf{g}_i^s)^H \mathbf{h}_i^s|^2}{N_t^s \sigma^2 \sum_{i \in G_l^s} \|\mathbf{g}_i^s\| + P \sum_{j \in G_l^s} |(\mathbf{g}_j^s)^H \mathbf{h}_j^s|^2 + I_s} \\ &= \frac{P \sum_{i \in G_l^s} |(\mathbf{g}_i^s)^H \mathbf{h}_i^s|^2}{N_t^s \sigma^2 \sum_{i \in G_l^s} \|\mathbf{g}_i^s\| + P \sum_{j \in G_l^s} |(\mathbf{g}_j^s)^H \mathbf{h}_j^s|^2 + \sum_{i \neq s} A_i \frac{P}{N_t^i d_{is}^\alpha} \frac{E[\text{Tr}\{\mathbf{H}_{is} \mathbf{H}_{is}^H\}]}{N_r^s}} \end{aligned} \quad (13)$$

通过上述建模可以看出, γ_l^s 同时受链路选择策略与天线分组策略的影响. 此时, 采用 M-QAM 调制进行传输, 传输误码率可以表示为^[19]

$$p_b \approx \frac{2(K-1)}{K \log_2 K} Q \left(\sqrt{\left(\frac{3 \log_2 K}{K^2 - 1} \right) \frac{2E_b}{N_0}} \right) \quad (14)$$

其中, $M=2^q$, $K = \sqrt{M}$, q 代表每一个调制符号包含的比特数; $Q(x)$ 是互补误差函数, 其表达式为

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

同时,信噪比也能表示成 E_b/N_0 的函数^[19],即

$$\text{SNR}[\text{dB}] = \frac{E_b}{N_0} [\text{dB}] + 10 \log q \quad (15)$$

结合公式(13)~公式(15)可以看出,传输误码率是调制方式和信噪比的函数,而信道信噪比又受链路选择和天线分组策略的影响,因此,传输误码率可以看作是调制方式、链路选择和天线分组策略的函数.依据公式(14)的传输误码率,则传输每个数据包(block)发生错误的概率为

$$p_B = 1 - (1 - p_b)^N \quad (16)$$

其中, N 是每个数据包的大小.另外,通过采用信道编码能够进一步降低丢包率.例如,对于 $RS(m,k)$ 信道编码,传输数据包发生错误的概率为

$$\rho = 1 - \sum_{i=0}^{m-k} (p_B)^i (1 - p_B)^{m-i} \quad (17)$$

由公式(13)~公式(17)可以看出,传输时数据包发生错误的概率同时受调制方式、信道编码速率以及信道信噪比的影响.而在多用户 MIMO 网络中,公式(13)表明,信道信噪比是链路选择方案和天线分组方案的函数.本文主要讨论链路选择和天线分组策略对系统的影响,故假设调制方式和信道编码速率均是常量.因此,公式(17)可以形式化表示为

$$\rho = f(A, G) \quad (18)$$

即传输错误概率由链路选择方案和天线分组方案唯一决定.

3 优化传输策略

在多用户 MIMO 网络中存在多条传输链路,链路之间存在共信道干扰.此外,对于可伸缩视频编码技术,不同的视频层具有不一样的重要性,在传输时应采用 UEP 策略,予以不同程度的保护.基于这些考虑,同时结合第 2 节的模型,我们首先介绍本文提出的系统模型,然后提出一种用于提高多用户 MIMO 网络的可伸缩视频传输质量的优化传输策略,并给出相应的形式化描述.该策略综合考虑链路选择、MIMO 的天线分组以及可伸缩视频传输的非对称保护,其最终目标是最大化所有用户的平均视频质量.

3.1 系统模型

考虑一个具有 S 条传输链路的多用户 MIMO 网络,所有的链路都在相同的信道上进行传输,彼此之间存在共信道干扰,各链路的传输方程由公式(1)给出.对于每一条链路,都是一个端到端的 MIMO 系统,如图 2 所示.在发送端,采用可伸缩视频编码技术^[5],将输入的视频序列编码成 L 个视频层,包括 1 个基本层和 $L-1$ 个增强层.经过 FEC 信道编码和调制以后,各层视频数据依据天线分组结果,分别调度到不同的天线上进行传输.需要注意的是,当某一组天线包含不止 1 根天线时,该组对应的视频层在被调度到发射天线之前需要进行空时编码,以降低其传输误码率.例如对于一个 3 层的视频,在发射端有 4 根发射天线,假设天线被分为 3 组,分组结果为 $\{\{1,3\}; \{2\}; \{4\}\}$,分别用来传输基本层、第 1 增强层和第 2 增强层,如图 2 所示.由于基本层对应的天线分组包含两根天线,因此,该层数据在被调度到发射天线之前需要经过一个正交空时分组码编码器进行编码,以获得空间分集增益,提高传输的可靠性.组与组之间则采用的空间复用技术,提高传输的有效性,达到了 MIMO 系统空间分集与空间复用的有机结合.另外,在进行分组时,主要依据视频层的权重以及视频失真函数.一般而言,重要的视频层(例如基本层)重点保护,一般会分配质量好的天线或分配多根天线,从而实现 UEP,达到最大化接收视频质量的目的.在接收端,采用迫零检测算法(zero-forcing,简称 ZF)或者最小均方误差准则(minimum mean square error,简称 MMSE)对信号进行判决,然后依次通过正交空时分组码解码器、数字解调器和信道解码器,得到传输后的各层视频数据.最后,通过可伸缩视频解码器进行解码,获得传输后的重建视频.

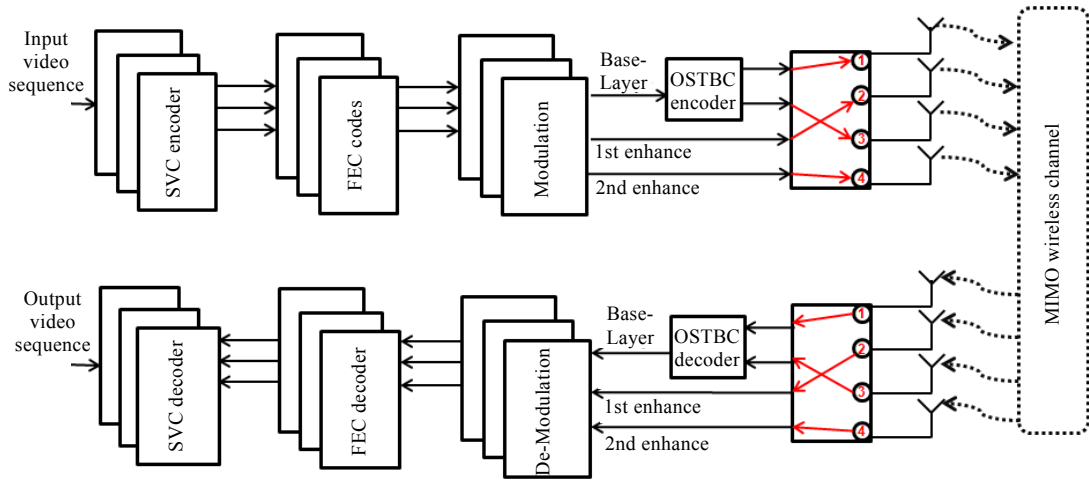


Fig.2 Proposed system framework
图 2 系统构架

3.2 问题描述

在多用户 MIMO 网络中,为了降低用户之间的共信道干扰,本文采取的策略是链路选择,即只选择部分合适的链路进行传输,而抑制其他链路的传输.值得注意的是,一旦确定了允许进行传输的链路,那么用户之间的共信道干扰也就确定了,与天线分组无关.因此,当给定链路选择方案时,对于各链路而言,其最佳的天线分组方案也就唯一确定了.

假设共有 S 条链路,则第 s 条链路上传输的视频序列经过可伸缩视频编码以后,被编码为 1 个基本层和 L^s-1 个增强层,其中, L^s 代表视频的总层数.那么在进行天线分组时,应该将发射天线分为 L^s 组,分别用于传输 L^s 层视频.考虑到每一层视频对视频质量的影响不一样,本文采用文献[20]中的视频失真模型并进行了扩展,第 s 条链路上传输的视频的失真 D^s 可以表示为

$$D^s(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^{L^s} \omega_i^s \times p_i^s \tag{19}$$

其中, ω_i^s 代表第 i 层视频的重要性(权重),即 ω_1^s 代表仅包含基本层时视频的峰值信噪比(PSNR), $\omega_i^s (i \geq 2 \& i \leq L^s)$ 代表当且仅当前面 $i-1$ 层视频均没有发生丢失,由于收到第 i 层视频导致的视频 PSNR 的增加量; p_i^s 代表第 i 层视频的丢失率.

考虑到链路选择的影响,针对第 $s (1 \leq s \leq S)$ 条链路,当 $A_s=0$ 时,意味着该链路不允许进行数据传输,因此该链路上各层视频的丢失率均为 1,公式(19)对应的失真进一步表示为

$$D_0^s = \sum_{i=1}^{L^s} \omega_i^s \tag{20}$$

当 $A_s=1$ 时,意味着该链路将进行视频传输,各层视频的丢失率受天线分组的影响,对应的失真由公式(21)给出,即

$$D_p^s = \sum_{i=1}^{L^s} \omega_i^s \times p_i^s \tag{21}$$

考虑视频层之间的依赖关系,即,如果较低层的视频层(例如基本层)在传输过程中发生错误或丢失,那么较高层的视频层即使正确收到也是无用的,对视频质量没有任何贡献.因此,

$$p_i^s = \begin{cases} \rho_1^s, & i = 1 \\ \rho_i^s + (1 - \rho_i^s) * p_{i-1}^s, & i \geq 2 \& i \leq L^s \end{cases} \tag{22}$$

其中, ρ_i^s 代表第 s 条链路上传输的第 i 层视频在实际传输过程中发生错误的概率. 在给定链路选择和天线分组方案的情况下, 由公式(13)~公式(17)很容易求出 ρ_i^s .

在链路选择方案 $A=[A_1, A_2, \dots, A_S], A_s \in \{0, 1\}, \forall s \geq 1 \& s \leq S$ 下, 结合天线分组策略以及公式(20)、公式(21), 所有用户的平均视频失真包括两部分: 允许进行传输的链路的失真和不允许进行传输的链路的失真, 因此, 平均视频失真可以表示为

$$D_{total} = \frac{1}{S} \left[\sum_{s=1}^S A_s D_p^s + \sum_{s=1}^S (1 - A_s) D_0^s \right] = \frac{1}{S} \left[\sum_{s=1}^S A_s \sum_{i=1}^{L^s} \sigma_i^s \times p_i^s + \sum_{s=1}^S (1 - A_s) \sum_{i=1}^{L^s} \sigma_i^s \right] \quad (23)$$

最后, 在多链路情况下, 我们的传输策略利用链路选择抑制链路之间的干扰. 在此基础上, 通过天线分组实现 MIMO 的空间复用与空间分集增益的有机结合. 同时, 结合可伸缩视频的特性寻找最佳的链路选择方案和天线分组方案, 以达到最小化所有用户的平均视频失真的目的. 整个优化问题可以形式化表述为

$$\left. \begin{aligned} & \min_{\{G, A\}} D_{total} \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{l=1}^{L^s} g_{l,i}^s \leq 1, \forall i \geq 1 \& i \leq N_i^s, s \geq 1 \& s \leq S \\ & \quad \sum_{l=1}^{L^s} \sum_{i=1}^{N_i^s} g_{l,i}^s \leq N_i^s, \forall s \geq 1 \& i \leq S \\ & \quad \sum_{s=1}^S A_s \leq S \\ & \quad g_{l,i}^s \in \{0, 1\}, \forall s \geq 1 \& i \leq S, l \geq 1 \& l \leq L^s, i \geq 1 \& i \leq N_i^s \\ & \quad A_s \in \{0, 1\}, \forall s \geq 1 \& s \leq S \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

4 求解算法

4.1 复杂度分析

上述问题采用全搜索算法能够获得最优解, 即搜索整个解空间, 从而找到最佳的链路选择方案和天线分组方案. 但是全搜索的算法复杂度太高, 对于链路选择采用全搜索方法, 其可能的链路选择方案数量(number of link selection, 简称 NLS)为

$$NLS = 2^S \quad (25)$$

针对每一种链路选择方案, 采用全搜索方法, 可能的天线分组方案数量(number of antenna grouping, 简称 NAG)为

$$NAG = \prod_{s=1}^S (A_s (L^s)^{N_i^s} + (1 - A_s)) \quad (26)$$

其中, $A_s (L^s)^{N_i^s}$ 代表第 s 条链路允许传输时, 该链路在进行天线分组时可能的天线分组方案的总数量; $1 - A_s$ 代表第 s 条链路不允许传输, 也就不需要进行天线分组. 每一种链路选择方案都对应着一种最佳的天线分组方案, 因此通过全搜索算法, 同时获得最佳的链路选择与天线分组方案的总体复杂度(total complexity, 简称 TC)为公式(25)与公式(26)的乘积, 即

$$TC = NLS \cdot NAG = 2^S \cdot \prod_{s=1}^S (A_s (L^s)^{N_i^s} + (1 - A_s)) \quad (27)$$

显然, 如此高的复杂度, 在实际系统中是难以承受的. 尤其针对视频这类对延迟很敏感的特殊媒体数据, 采用全搜索算法更是无法接受. 考虑到每一种链路选择方案都对应着一种最佳的天线分组方案, 因此, 本文通过分别减小链路选择和天线分组的复杂度, 从而达到降低总体复杂度的目的. 对于链路选择, 我们引入遗传算法并做一些改进, 从而在保证性能的同时大幅度降低算法复杂度. 在此基础上, 针对每一种备选的链路选择方案, 结合可伸缩视频的特性, 我们将天线分组算法转化为一个 0/1 背包问题, 同时结合深度优先和分支限界技术, 进一步

降低天线分组的复杂度.最后,选择所有用户平均视频失真最小的链路选择和天线分组方案作为目标解.

4.2 问题求解

由于天线分组对链路之间的共信道干扰没有任何影响,因此在给定链路选择方案的情况下,针对每一条链路,采用合适的天线分组(AGA)算法(AGA 算法的具体实现见第 4.3 节),能够找到最佳的天线分组方案,使得该链路的视频失真最小.但是针对不同的链路选择方案,所有链路的平均失真各不一样,因此,需要选择一种合适的链路选择方案,同时结合天线分组算法,使得所有链路的平均视频失真最小.但是对于一个有 S 条链路的网络,可能的链路选择方案共有 2^S 种,这样的复杂度是实际系统难以接受的.本节引入遗传算法来解决链路选择问题,在保证性能的同时,大幅度降低了算法复杂度.

遗传算法(genetic algorithm)^[21,22]是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型,是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法.该算法模拟自然选择和自然遗传过程中发生的繁殖、交叉和基因突变现象,在每次迭代中都保留一组候选解,并按某种指标从解群中选取较优的个体,利用遗传算子(选择、交叉和变异)对这些个体进行组合,产生新一代的候选解群.重复此过程,直到满足某种收敛指标为止.其主要操作包括编码、选择、交叉和变异,将该算法思想用于解决链路选择问题的基本步骤如下:

- A. 假设种群大小为 M_{pop} ,初始化种群 POP ,即随机得到 M_{pop} 种编码方案,每一种编码方案对应着一个链路选择方案,并称每一种编码方案为一条染色体.
- B. 选择.本文采用经典的轮盘赌算法(roulette wheel selection algorithm)从种群中选择两条染色体.
- C. 交叉.即对步骤 B 中的两条染色体按预定义的交叉概率 P_c 执行交叉操作.
- D. 变异.即对步骤 C 中的两条染色体按预定义的变异概率 P_m 执行变异操作.
- E. 种群更新.将上面得到的两条染色体加入到种群 POP 中,并根据天线分组算法对每条染色体(链路选择方案)进行天线分组,得到每条染色体对应的所有用户的平均失真.为了保证种群的大小不超过 M_{pop} ,逐个删除视频失真最大的染色体,直到种群中染色体的数量等于 M_{pop} .
- F. 上述的步骤 B-C-D-E 称为一次遗传迭代过程.当满足以下两种情况的任意一种时,停止遗传迭代:
 - i) 遗传迭代次数达到预定义的最大遗传次数 NG_{max} ,停止遗传迭代;
 - ii) 在 NG_{th} 次连续迭代中,种群 POP 中所有染色体对应的所有用户最小失真保持不变,此时意味着最优解已经以很大的概率存在于种群 POP 中,停止遗传迭代,其中, NG_{max} 和 NG_{th} 是预定义的迭代次数阈值;
 否则,迭代执行遗传过程.
- G. 当遗传迭代停止时,从种群 POP 中选择所有用户平均失真最小的染色体作为目标链路选择方案,对应的天线分组方案作为目标天线分组方案,算法结束.

该算法利用遗传算法的思想进行链路选择.值得注意的是,在执行链路选择算法时,每次种群的更新是依据各染色体对应的视频失真进行的,而视频失真的大小又与天线分组算法相关,因此,在链路选择算法中实际已经嵌入了天线分组算法(AGA).该算法的具体实现见第 4.3 节.当遗传迭代结束时,从种群中选择平均视频失真最小的染色体作为最终链路选择方案,与之对应的天线分组方案作为最终天线分组方案.可以看出,由于在链路选择算法中已经嵌入了天线分组算法,因此该算法最终同时获得了最佳链路选择方案与天线分组方案.

4.3 天线分组算法

在上述联合链路选择与天线分组算法中嵌入了天线分组算法,但并没有给出天线分组的具体算法.下面我们将详细讨论天线分组算法的实现.假设任意给定一种链路选择方案 $A=[A_1, A_2, \dots, A_S]$, $A_s \in \{0, 1\}$, $\forall s \geq 1 \& s \leq S$, 针对其中的第 s ($\forall s \geq 1 \& s \leq S$) 条链路,当 $A_s=0$ 时,该链路不允许传输,不需要进行天线分组;当 $A_s=1$ 时,意味着第 s 条链路允许进行视频传输,需要结合视频的特性进行天线分组,使得该链路的视频失真最小,同时假设该链路上进行视频传输时的最大允许失真为 D^s .此时,可以求出视频在最大允许失真范围内,每层视频允许的最大错误概率阈值 $p_{T,l}^s$, $\forall l \geq 1 \& l \leq L^s$, 即求解如下最优化问题:

$$\left. \begin{aligned} & \max_p p_{T,l}^s, \forall l \geq 1 \& l \leq L^s \\ & \text{s.t. } D_p^s = \sum_{i=1}^{L^s} \alpha_i^s \times p_{T,i}^s \leq D^s \\ & p_{T,i}^s \leq p_{T,j}^s, \forall i, j \geq 1 \& i, j \leq L^s \& i \leq j \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

该优化问题的含义是,在视频失真不大于给定允许失真的前提下,为每层视频设置一个最大的丢包率阈值,从而在失真可接受的情况下节省网络资源.利用拉格朗日乘子法,很容易求解出各层视频允许的最大错误概率阈值 $p_{T,l}^s, \forall l \geq 1 \& l \leq L^s$.

天线分组的本质,就是给每层视频分配一组天线,使各层的实际丢失概率尽可能地满足上述阈值.由于可伸缩视频各层视频的重要性各不相同,一般较低层(例如基本层)的数据比较高层(例如增强层)的数据对视频质量的影响要大得多,因此在进行天线分组时,我们从基本层开始逐层进行分配,使其依次满足上述错误概率阈值的要求.定义集合 G_T^s 代表第 s 条链路的所有发射天线,当为第 l 层视频分配天线时,意味着前面 $l-1$ 层视频均已完成天线分配,并且 $p_i^s \leq p_{T,i}^s, \forall i \geq 1 \& i \leq l-1$.对于第 l 层视频,可用的天线集合为 $G_A^s = G_T^s - \sum_{i=1}^{l-1} G_i^s$.目标是从 G_A^s 中选择一组天线并分配给第 l 层视频.分配的原则是,在满足该层传输错误概率小于其对应的阈值时,尽可能地节约资源.可以看出,该问题是一个标准的 0/1 背包优化问题,其数学描述如下:

$$\left. \begin{aligned} & \max p_i^s \\ & \text{s.t. } p_i^s \leq p_{T,i}^s \\ & G_i^s \subseteq G_A^s \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

该问题的求解可以采用任意已有的解决 0/1 背包问题的经典算法.在链路选择已知的情况下,针对每种天线分组方案,概率 p_i^s 通过公式(13)~公式(17)和公式(22)很容易获得.

本文采用回溯算法来求解上述优化问题,同时结合可伸缩视频编码和天线分组的特征,采用深度优先搜索和分支限界技术进一步降低搜索范围.上述优化问题的目的是寻找一种天线组合,使得该组天线在进行视频传输时发生错误的概率小于某一阈值,同时尽可能地节约资源.而在进行天线分组时,在某一组天线中额外增加天线将导致该组天线的性能更好,传输误码率更低.即对于任意天线分组 G' 和 G'' ,在传输时发生错误的概率为 p' 和 p'' ,则当 $G' \subseteq G''$ 时, $p' \geq p''$.因此在搜索时,一方面,当某一组天线满足传输错误概率阈值要求时,就应该停止该分支的进一步搜索.如图 3 所示,当搜索节点 B_1 满足阈值要求时,则停止该分支的搜索,即整个 Q_1 范围都不用进行搜索.另一方面,当搜索到叶节点并且该组天线仍然不能满足传输错误概率阈值要求时,则从该组天线中剔除任何天线的分支都不应该再搜索,因为天线的剔除只会使得传输错误概率进一步增大,无法满足传输错误概率阈值的要求.如图 3 所示,当搜索节点 B_4 不能满足传输错误概率阈值要求时,整个 Q_2 范围也都不要再进行搜索,这也是采用深度优先搜索的原因.最后,需要从满足传输错误概率满足阈值要求的所有天线组合中选择传输错误概率最大的天线组合作为第 l 层视频的天线组合.这样既满足了传输错误概率小于阈值的要求,又尽可能地节约了资源.

但是,由于受到实际信道质量的影响,在进行天线分组时,针对第 $l(l \geq 1 \& l \leq L^s)$ 层视频:

- A. 当把所有可用的天线都分配给第 l 层视频时,仍然无法满足传输错误概率小于阈值 $p_{T,l}$ 的要求.此时采取的策略为将所有的天线都分配给第 l 层视频,而对于第 $k(\forall k > l \& k \leq L)$ 层视频,则不分配任何天线,在发送端直接丢弃.这主要是由于信道质量太差,无法满足所有视频层的错误概率小于各自对应的阈值的要求,因此只能尽可能地满足较重要的视频层(低层视频)的阈值要求,结束分组.
- B. 当把所有可用的天线都分配给第 l 层视频时,刚好满足传输错误概率小于阈值 $p_{T,l}^s$ 的要求,当从中剔除任意一根天线都无法满足该要求时,其分配策略为将所有的天线都分配给第 l 层视频.而对第 $k(\forall k > l \& k \leq L)$ 层视频则不分配任何天线,在发送端直接丢弃,结束分组.

- C. 当从可用的天线集合中选择部分天线分配给第 l 层视频时,就能满足传输错误概率小于阈值 $p_{T,l}^s$ 的要求.此时的分配策略就是按照上述回溯算法,选择最佳的一组天线分配给第 l 层视频.
- D. 对于步骤 C 中剩下的天线,迭代执行步骤 A 或步骤 B 或步骤 C,直到没有剩余的天线可用,或者各视频层分配的天线均满足各自传输错误概率阈值的要求.
- E. 当所有的视频层都分配完天线,并且对应的传输错误率均小于各自对应的阈值,但还有天线剩余时,简单地将这些剩余的天线依次分配给各视频层(按照视频层从低到高的顺序),以进一步降低重要视频层的传输错误率,提高视频质量.

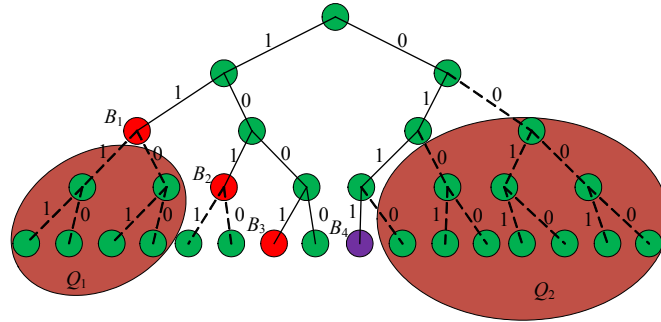


Fig.3 Antenna grouping: depth-first search and branch-and-bound
图 3 天线分组:深度优先搜索与分支限界

5 性能比较分析

在这一节,我们将从实验的角度验证本文提出的传输策略以及求解算法的性能.目前还没有相关的研究工作在多用户 MIMO 网络中同时结合链路选择技术与天线分组技术,用于提高可伸缩视频传输的视频质量.在本文,我们首先分别考察了天线分组与链路选择对系统性能的影响.另外,我们还考察了不同的系统参数对系统性能和复杂度的影响.

5.1 实验配置

本文采用了模拟实验环境,采用的实验工具为 Matlab 仿真软件,版本号为 version 7.6.0.324.实验中一共包含 20 个网络节点,均匀地分布于 $50 \times 50 \text{m}^2$ 的区域,构成 10 条传输链路,即 $S=10$,同时, $N_r^s = N_t^s = 4, \forall s \geq 1 \& s \leq 10$.待传输的视频序列包含 Foreman, City, Football 和 Mobile 这 4 项标准的测试序列,采用 SVC 编码器 MGS 编码模式^[5],每个视频序列均被编码为 1 个基本层和 2 个增强层,每层视频的权重见表 1.每条链路随机从这 4 个测试序列中选择一个作为待传输的视频序列,所有链路进行传输时均采用 16-QAM 调制方式,信道编码采用 RS 码,编码速率为 2/3.其他相关的参数如果没有特殊的说明,其默认的取值见表 2.

Table 1 Weights of each layer for different test video sequences

表 1 视频测试序列各层权重值

	w_1 (dB)	w_2 (dB)	w_3 (dB)
Foreman	31.04	5.63	3.27
City	30.57	5.06	3.25
Football	32.14	5.36	3.52
Mobile	31.24	4.97	3.36

Table 2 Parameters configuration

表 2 参数设置

Parameter	M_{pop}	P_c	P_m	NG_{max}	NG_{th}	$D^s (1 \leq s \leq 10)$
Value	5	0.5	0.03	50	10	4dB

5.2 天线分组对性能的影响

这一节主要讨论天线分组策略对系统性能的影响.为了评估本文提出的天线分组策略的性能,我们分别与固定天线分组策略(第1根和第2根天线分配给基本层,第3根和第4根天线依次分配给第1增强层和第2增强层)和不分组策略(包括完全空间分集和完全空间复用)进行比较.为了公平比较,所有的天线分组策略都是基于本文提出的链路选择策略的.

图4比较了在不同策略下,所有用户接收到的视频的平均峰值信噪比(PSNR).空间分集技术和空间复用技术分别通过正交空时分组码(orthogonal space-time block coding,简称OSTBC)^[3]和V-BLAST^[6]系统的编码方案来实现.从图中可以看出,在不同的平均信道信噪比情况下,本文提出的传输策略的性能总是最好的,与其他3种

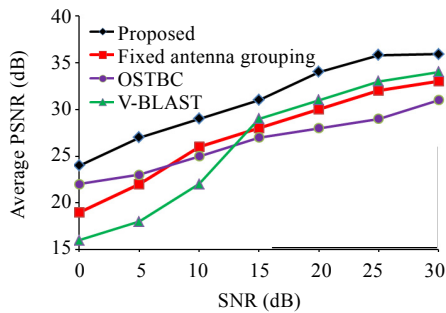


Fig.4 Performance comparison of different antenna grouping schemes

图4 不同天线分组策略的性能比较

策略相比,本文提出的策略能够获得大约3dB~5dB的PSNR增益.对于空间分集技术与空间复用技术,当信道信噪比较小,即信道质量很差时,采用空间分集技术有利于降低传输误码率.此时,采用空间分集技术,系统的性能一般要优于采用空间复用技术.随着信道信噪比的增大,信道质量不断变好,传输误码率也不断降低,此时,采用空间复用技术有利于提高传输码率.此时,采用空间复用技术,系统的性能一般要优于采用空间分集技术.在图4中,所有用户接收视频的平均PSNR也证明了这一点.此外,固定分组策略的性能也远远不如本文提出的策略,这主要是由于在固定天线分组时,无法根据信道的实际质量状况有机地结合空间分集增益与空间复用增益.同时,分配给每层视频的天线是固定的,没有最大程度地实现非对称保护,因此也将导致一定的性能损失.

在我们提出的天线分组策略中,通过给不同的视频层分配一组天线,从而获得不对等的信噪比,如公式(13)所示,进而实现非对称保护.与已有的传统策略相比,我们提出的天线分组策略显著提高了视频传输质量.此外,我们还比较了在不同的天线分组策略下,各链路进行视频传输时视频质量的分布情况.图5分别描述了当信噪比 $SNR=15dB$ 和 $SNR=25dB$ 时,视频质量的链路累积分布数量(cumulative distribution number,简称CDN)图.可以看出,与其他策略相比,我们提出的天线分组策略的视频质量主要集中在质量较高的区域.例如,当 $SNR=25dB$ 时,视频的PSNR低于35dB的链路只有2条,而其他策略都在6条以上.这也是在图4中,我们提出的策略的平均视频质量要优于其他策略的原因之一.

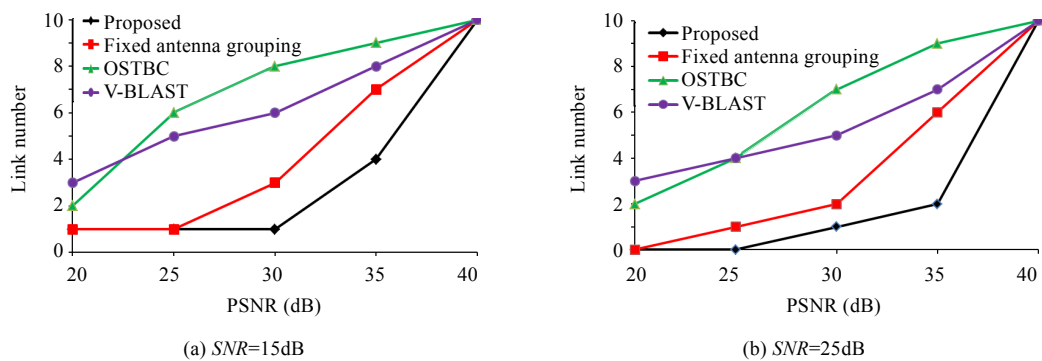


Fig.5 CDN of different antenna grouping schemes

图5 不同天线分组策略的链路累积分布数量

5.3 链路选择对性能的影响

基于本文提出的链路选择策略,上一节的实验结果证实了本文提出的天线分组算法的有效性.在这一节,我们主要讨论链路选择算法对系统性能的影响.为了便于比较,我们分别执行了全搜索算法(FSA)和遗传算法进行链路选择.此外,我们还考察了在不进行链路选择,即所有的链路都允许传输时系统的性能.值得注意的是,以上各种策略在进行天线分组时,均执行本文提出的天线分组算法.

图 6 描述了在不同信道信噪比情况下,不同的链路选择策略的性能.可以看出,本文提出的策略与全搜索算法相比,虽然所有用户接收视频的平均质量有所下降,但是二者之间的差距非常小,这主要是由于本文采用的链路选择算法是遗传算法.该算法是一种次优算法,只有当遗传次数足够大时才能保证最终一定获得最佳的结果.但是遗传次数设置过大,将导致算法复杂度增加,不利于视频传输.另外,与不进行链路选择的策略相比,本文提出的策略在性能上有很大的提升,所有用户接收视频的平均 PSNR 大约有 6dB 的提升.这主要是由于采用了链路选择策略,抑制了链路之间的共信道干扰.链路之间的共信道干扰直接受链路选择策略的影响,如公式(4)所示.因此,选择合适的链路选择向量能够降低共信道干扰,从而提高视频的传输质量.值得注意的是,在不进行链路选择的策略中,随着信道信噪比的增大,接收视频的 PSNR 先增大后减小.这主要是因为当信噪比较小时,随着信噪比的增大,能够在较大程度上降低误码率,系统性能也逐渐变好.但是当信道的信噪比足够大时,随着链路信噪比的不断增大,各链路之间的共信道干扰也进一步增强,此时如果不进行合适的链路选择抑制链路之间的共信道干扰,将导致传输误码率增大,从而导致视频的质量下降.

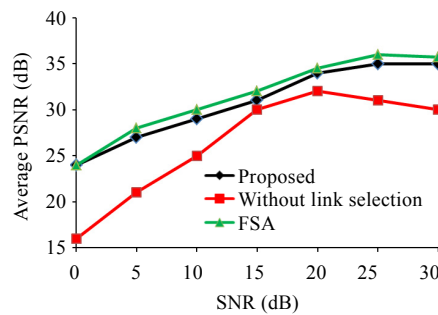


Fig.6 Performance comparison of different link selection schemes

图 6 不同链路选择策略的性能比较

与第 4.2 节类似,我们也比较了在不同的天线链路选择策略下,各链路进行视频传输时视频质量的分布情况.图 7 分别给出了当信噪比 $SNR=15\text{dB}$ 和 $SNR=25\text{dB}$ 时,视频质量的链路累积分布数量(CDN)图.可以看出,本文提出的策略与全搜索算法的 CDN 图完全重合,说明两种策略的视频质量分布情况基本相同,因此在图 6 中,两种策略的平均视频质量非常接近.与不进行链路选择的策略相比,当 $SNR=15\text{dB}$ 时,二者的性能以及 CDN 曲线图相差不大,这主要是由于此时平均信道质量不是很好,即使没有共信道干扰,链路之间的传输可靠性也很差,而链路选择主要用于抑制共信道干扰,因此当信道信噪比很小时,链路选择的作用就不是很明显.而当 $SNR=25\text{dB}$ 时,可以看出,在本文提出的链路选择策略下,各链路的视频质量主要集中在质量较高的区域,因此能够获得较高的平均 PSNR.

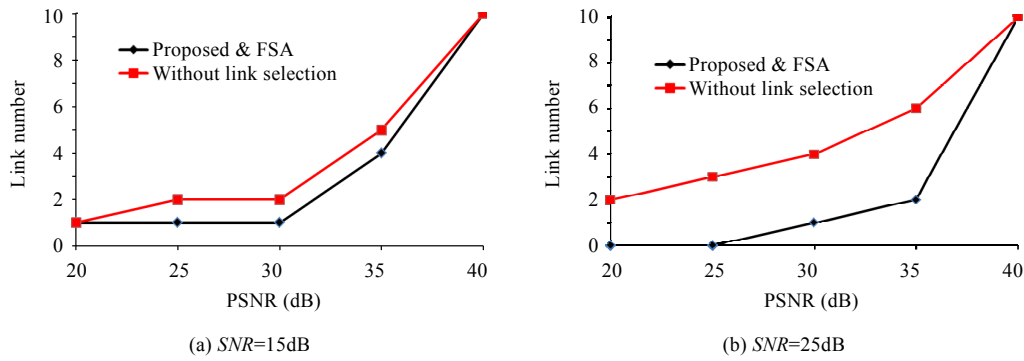


Fig.7 CDN of different link selection schemes

图7 不同链路选择策略的链路累积分布数量

5.4 遗传迭代次数对性能的影响

本文采用遗传算法来求解链路选择问题.在遗传算法中,参数的合理设置是非常重要的.例如,最大遗传次数 NG_{max} , NG_{max} 越大,算法执行的时间越长,但是获得最优解的概率也越大; NG_{max} 越小,算法执行的时间越短,但是获得最优解的概率也越小.又如变异概率 P_m , P_m 越大,算法收敛的速度越慢,但是搜索到最优解的概率越大,反之亦然.

全搜索算法的链路选择方案共有 $2^S=2^{10}=1024$ 种,而采用遗传算法时,每次遗传过程会产生 2 条新的染色体,即 2 种新的链路选择方案,因此,遗传算法的链路选择方案共有 $2 \times NG_{max}$ 种,如图 8(a)所示.可以看出,当遗传次数不是很大时,与全搜索算法相比,遗传算法能够大幅度降低算法复杂度;但是遗传次数过小,将导致性能的损失.

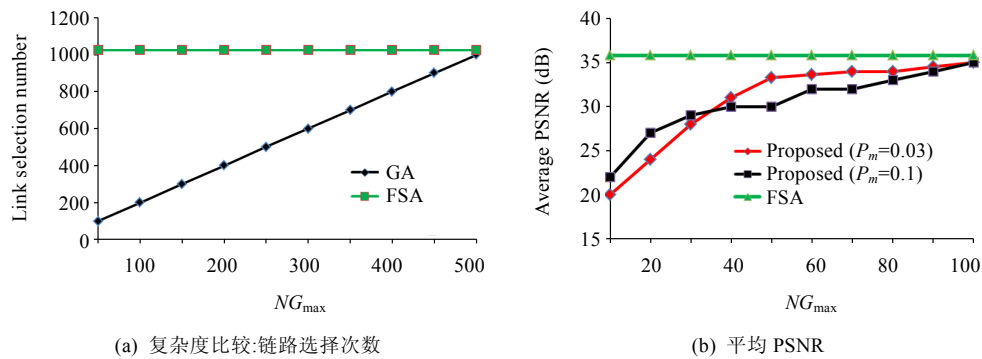
Fig.8 Effect of parameters on system performance ($SNR=25dB$)图8 系统参数对性能的影响($SNR=25dB$)

图 8(b)比较了当平均信道信噪比 $SNR=25dB$ 时,在不同变异概率与最大遗传次数的情况下,所有用户接收视频的平均 PSNR.同时还执行了全搜索算法,以便做性能上的比较.从图中可以看出:当遗传次数足够大时,遗传算法的性能就近似达到全搜索算法的性能;同时,遗传算法能够大幅度降低算法复杂度.例如在本实验中,全搜索算法的链路选择方案共有 $2^S=2^{10}=1024$ 种,而当遗传次数达到 60 次~70 次时,遗传算法的性能就基本与全搜索算法的性能一致.但是每次遗传过程会产生 2 条新的染色体,即 2 种新的链路选择方案,因此总的搜索次数为 140 次左右.可见,采用遗传算法能够在保证系统性能的同时,大幅度降低算法复杂度.另外,变异概率对算法的收敛速度有很大的影响.可以看出:当变异概率 $P_m=0.1$ 时,其收敛速度要比 $P_m=0.03$ 时慢;但是变异概率越大,获得最优性能的概率一般也越大.因此,在实际系统设计时,需要综合考虑性能和复杂度等因素.

6 结束语

本文综合考虑多链路之间共信道干扰、MIMO 的空间分集特性和空间复用特性以及可伸缩视频编码的分层特性,提出了一种用于提高可伸缩视频在多用户 MIMO 网络上进行传输的优化传输策略.该策略通过链路选择技术对抗链路之间的共信道干扰,利用天线分组技术实现 MIMO 空间分集和空间复用的有机结合;同时,结合可伸缩视频的分层特性,实现视频传输的非对称保护,最终达到最大化所有用户的平均视频质量的目的.通过对本文提出的联合链路选择与天线分组策略进行建模,我们形式化地描述了该传输策略,并给出了相应的求解算法.为了降低算法复杂度,我们引入遗传算法来求解链路选择问题.另外,结合可伸缩视频编码和天线分组的特性,将天线选择问题转化为一个标准的 0/1 背包问题,并采用深度搜索优先和分支限界技术,进一步减小搜索范围.最后,通过实验验证了本文提出的传输策略的有效性.

References:

- [1] Tarokh V, Seshadri N, Calderbank AR. Space-Time codes for high data rate wireless communications: Performance criterion and code construction. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1998,44(2):744–765. [doi: 10.1109/18.661517].
- [2] Alamouti SM. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1998,16(8):1451–1458. [doi: 10.1109/49.730453]
- [3] Tarokh V, Jafarkhani H, Calderbank AR. Space-Time block codes from orthogonal designs. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1999,45(5):1456–1467. [doi: 10.1109/18.771146]
- [4] Zheng L, Tse D. Diversity and multiplexing: A fundamental tradeoff in multiple antenna channels. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2003,49(5):1073–1096. [doi: 10.1109/TIT.2003.810646]
- [5] Wiegand T, Sullivan GJ, Bjontegaard G, Luthra A. Overview of the H.264/AVC video coding standard. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003,13(7):560–575. [doi: 10.1109/TCSVT.2003.815165]
- [6] Wolniansky PW, Foschini GJ, Golden GD, Valenzuela RA. V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel. In: *Proc. of the IEEE ISSSE*. IEEE Press, 1998. 295–300. [doi: 10.1109/ISSSE.1998.738086]
- [7] Jr. Heath RW, Paulraj AJ. Switching between multiplexing and diversity in MIMO systems. *IEEE Trans. on Communications*, 2005,53(6):2005. [doi: 10.1109/TCOMM.2005.849774]
- [8] Song D, Chen CW. Scalable H.264/AVC video transmission over MIMO wireless systems with adaptive channel selection based on partial channel information. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2007,17(9):1218–1226. [doi: 10.1109/TCSVT.2007.905531]
- [9] Liu Z, Giannakis G, Barbarossa S, Scaglione A. Transmit antennae space-time block coding for generalized OFDM in the presence of unknown multipath. *IEEE Journal on Selected Areas Communications*, 2001,19(7):1352–1364. [doi: 10.1109/49.932702]
- [10] Ru CC, Yin LG, Lu JH, Chen CW. A new UEP scheme based on adaptive modulation for robust video transmission in MIMO system. *Journal of China Communications*, 2006,3(5):102–107.
- [11] Sabir MF, Jr. Heath RW, Bovik AC. Unequal power allocation for JPEG transmission over MIMO systems. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2010,19(2):106–116. [doi: 10.1109/TIP.2009.2032346]
- [12] Ge WY, Zhang JS, Xue GL. MIMO-Pipe modeling and scheduling for efficient interference management in multihop MIMO networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2010,59(8):3966–3978. [doi: 10.1109/TVT.2010.2060376]
- [13] Liu J, Shi Y, Hou YT. A tractable and accurate cross-layer model for multi-hop MIMO networks. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM*. IEEE Press, 2010. 1–9. [doi: 10.1109/INFOCOM.2010.5462061]
- [14] Lozano A, Tulino AM, Verdú S. Multiple-Antenna capacity in the low-power regime. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2003, 49(10):2527–2544. [doi: 10.1109/TIT.2003.817429]
- [15] Lee K, Chun J. On the interference nulling operation of the V-BLAST under channel estimation errors. In: *Proc. of the IEEE VETECF*. IEEE Press, 2002. 2131–2135. [doi: 10.1109/VETECF.2002.1040595]
- [16] Marzetta TL. BLAST training: Estimating channel characteristics for high-capacity space-time wireless. In: *Proc. of the 37th Annual Allerton Conf. on Communication, Control, and Computing*. Monticello, 1999. 958–966.

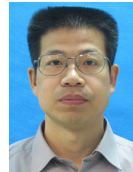
- [17] Paulraj A, Nabar R, Gore D. Introduction to Space-Time Wireless Communications. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 240–251.
- [18] Berenguer I, Wang XD. Space-Time coding and signal processing for MIMO communications. Journal of Computer Science and Technology, 2003,18(6):689–702. [doi: 10.1007/BF02945457]
- [19] Sklar B. Digital Communications. 5th ed., London: Prentice Hall, Inc., 2001. 532–665.
- [20] Fallah Y P, Mansour H, Khan S, Nasiopoulos P, Alnuweiri HM. A link adaptation scheme for efficient transmission of H.264 scalable video over multi-rate WLANs. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 2008,18(7):875–887. [doi: 10.1109/TCSVT.2008.920745]
- [21] Goldberg DE. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Reading: Addison-Wesley, 1989. 296–358.
- [22] Jiang ZY, Cai ZX, Wang Y. Hybrid self-adaptive orthogonal genetic algorithm for solving global optimization problems. Ruanjian Xuebao/Journal of Software, 2010,21(6):1296–1307 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3592.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03592]

附中文参考文献:

- [22] 江中央,蔡自兴,王勇.求解全局优化问题的混合自适应正交遗传算法.软件学报,2010,21(6):1296–1307. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3592.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03592]



周超(1986—),男,湖北黄冈人,博士生,主要研究领域为视频通信,无线流媒体传输, MIMO 通信.
E-mail: guozongming@pku.edu.cn



郭宗明(1966—),男,博士,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为视频处理,多媒体网络,图像处理.
E-mail: guozongming@pku.edu.cn



张行功(1973—),男,博士,副研究员,主要研究领域为多媒体网络,视频通信,无线 QoS.
E-mail: zhangxg@pku.edu.cn