

基于虚拟 MIMO 子信道的多用户分集资源调度算法^{*})

王德胜 朱光喜 刘应状 刘德明 胡臻平

(华中科技大学电信系 武汉 430074)

摘要 根据多天线(MIMO)信道空间相关特性,提出一种虚拟子信道的分析方法,从子信道角度探讨信道容量在发射端已知信道响应时预期的性能改善;在此基础上,提出一种逼近信道容量上限的波束形成方法,发掘 MIMO 信道矩阵最大奇异值与波束形成矢量潜在的联系,并从理论角度详细分析了单用户与多用户最大奇异值联合分布特性,实现阵列增益、空间分集和多用户分集充分融合;仿真与分析表明,利用用户间潜在的随机分布特性能有效提高用户的空间分集增益,提高系统资源利用率,对系统性能改善显著。

关键词 MIMO,分集,调度

Muti-User Diversity Based on Virtual Sub-channel for MIMO System

WANG De-sheng ZHU Guang-xi LIU Ying-zhuang LIU De-ming HU Zheng-ping

(Department of Electronics & Information Engineering, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract According to the analysis of MIMO spatial correlation, a virtual sub-channel is proposed to achieve the performance improvement when the CSI is available to the transmitter. Then maximum eigenvalue and the beamforming vector are discovered that aim to obtain the asymptotic upper limit channel capacity. Furthermore, the maximum union-eigenvalue distribution for muti-user is analyzed. The simulation shows spatial diversity among users contain great potential for MIMO performance improvement.

Keywords MIMO, Diversity, Schedule

1 引言

基于 Shannon 网络信息论已严格证明,对于点对多点的广播信道,能够获得类似于 MIMO(Multi-Input Multi-Output)的信道容量^[1],为无线网络信息论的发展奠定良好的理论基础。然而,移动时变无线信道的空间相关性、时间选择性、频率选择性衰落以及功率与带宽受限特性构成了阻碍高性能无线传输的几个主要因素。从信息论角度看,解决这种矛盾的方法主要是来自于挖掘各种各样的自由度,比如空域、时域、频域以及其它一些来自于系统建模得到的数据结构上的自由度。这种自由度既可以被用来增加系统容量,扩展有效性;也可以被用来增加冗余改善链路质量,提高可靠性。MIMO 技术以其潜在的空间自由度、能够实现空间复用与分集之间灵活的分配而受到广泛的关注^[2]。

之前文献大都是基于独立衰落信道的假设,但在实际系统中,由于受到收发信机周围弥散物以及天线尺寸距离的影响,多天线信道之间存在一定的相关性。文献[3]提出并验证了收发端相关可分离的相关信道模型,并利用随机矩阵的相关理论,分析了系统在已知信道信息以及未知信道信息两种情况下的渐进信道容量,但未对逼近信道容量的传输方法作详细描述;文献[4]结合空时分组码(STBC),在对编码增益与分集增益分析过程中,获取了不同信道用户的相关矩阵奇异值分布不一致特性,但未对这种分布特性从理论上作系统分

析,缺乏原理性的支撑。

本文将从 MIMO 信道容量基本理论入手,探讨一种从信道矩阵奇异值角度改善系统性能的新方法,系统地分析奇异值分布特性与系统性能之间的定量关系,建立一种基于信道奇异值的多用户调度策略。论文第 2 部分介绍 MIMO 系统模型;第 3 部分提出一种逼近信道容量上限的方法,并分析接收机性能;第 4 部分对基于多用户空间分集的系统性能进行分析;最后是仿真结果。

标识说明:在以下叙述中, $E[\cdot]$ 表示求随机量的数学期望; U 指酉方阵, I 指单位方阵; $\|\cdot\|_F$ 表示矩阵的 Frobenius 范数, tr 表示矩阵的迹操作, $r(\cdot)$ 表示矩阵秩,粗体字母表示矩阵或者向量; $(\cdot)^*$, $(\cdot)^T$, $(\cdot)^H$, $(\cdot)^{-1}$ 分别表示共轭、转置、Hermitian 转置、求逆; $vec(\cdot)$ 表示将矩阵变换为列矢量算子。

2 MIMO 系统模型描述

在分析信道容量时,通常假设发射端对信道一无所知。因此一种较优的策略是将每个天线上的传输能量与天线所传输的符号分离开来。假设 M_T 为发射天线个数, M_R 为接收天线个数,当发射信号能量 E_s 已知时,AWGN 的能谱密度 N_0 ,未知信道 H 状态信息时,MIMO 信道容量定义为^[1]:

$$C_{MIMO} = \log_2 \left[\det \left(I_{(M_R)} + \frac{E_s}{N_0 M_T} H H^H \right) \right] \quad (1)$$

^{*}国家自然科学基金重大资助课题(60390540);国家“十五”863 重大资助项目(No. 2003AA12331005);国家“十五”863 面上资助项目(2006AA02277);博士后基金一等资助(20070410279)。王德胜 副教授,博士后,主要研究方向为 MIMO 协同网络信息论、MIMO-OFDM 系统建模、空时信道建模、公平性资源调度等;朱光喜 教授,博士生导师,主要研究方向为宽带多媒体通信等;刘应状 副教授,主要研究方向为新一代移动通信系统、多媒体及应用、信号处理等;刘德明 教授,博士生导师,主要研究方向为光纤通信技术、光传感技术、光网络技术。

当已知信道特性时,信道容量直接与所传输信号矢量相关;假设经过信源预编码后加载在发射信号矢量 $\vec{X}^{[5]}$,其相关性为 $\mathbf{R}_{xx} = E\{\vec{X}\vec{X}^H\}$,这里 $\vec{X} = \{X_1[n], X_2[n], \dots, X_{M_T}[n]\}^T$,满足功率约束 $tr(\mathbf{R}_{xx}) = E_t$,则此时信道容量可重新描述为:

$$C_{MIMO} = \log_2 [\det(\mathbf{I}_{(M_R)} + \frac{E_t}{N_0 M_T} \mathbf{H} \mathbf{R}_{xx} \mathbf{H}^H)] \quad (2)$$

考虑到 Hermit 阵 $\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{S} \mathbf{D} \mathbf{S}^H$, 其中 $\mathbf{D} = \text{diag}\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{M_T}\}$. 通过矩阵构造, 令 $\mathbf{H} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda}^{1/2} \mathbf{V}^H$, 其中 $\mathbf{\Lambda}$ 是由奇异值 λ_m 构成的对角矩阵, $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, 0, \dots, 0\}_{M_R \times M_R}$, 当 \mathbf{H} 有 M_{sub} 个非零奇异值时, $M_{sub} = \text{rank}(\mathbf{H}) \leq \min\{M_T, M_R\}$. 式(2)可重写为:

$$C_{MIMO} = \log_2 [\det(\mathbf{I}_{(M_R)} + \frac{E_t}{N_0 M_T} \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V} \mathbf{S} \mathbf{D} \mathbf{S}^H (\mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V})^H)] \\ = \sum_{i=1}^{M_{sub}} \log_2 (1 + \frac{E_t}{N_0 M_T} \gamma_i \lambda_i) \quad (3)$$

对式(3)分析可知, MIMO 信道具有 M_{sub} 个独立的虚拟子信道, 子信道的增益即为 $\lambda_i^{1/2}$, 那么整个 MIMO 信道容量可以表示为若干个相互独立的子信道容量之和. 当 $\gamma_i = 1$ 时, 信号是等增益传输, 信道容量等同于发射端未知信道状态下的信道容量. 传输功率 γ_i 可通过求条件极值的方法确定, 使得与 λ_i 进行有效适配, 互信息最大.

3 逼近信道容量的波束形成方法

假设用户 m 所加载在各天线上的信号均为 d_m , $\|d_m\| = 1$; 用户 m 发射端的波束成型矢量为 \mathbf{W}_m , 并且已知理想的信道信息 CSI, 接收端波束矢量 \mathbf{W}_m , 则在接收端的信号可表示为:

$$\hat{d}_m = (\mathbf{W}_m)^H \mathbf{H}_m \mathbf{W}_m d_m + (\mathbf{W}_m)^H \mathbf{N} \quad (4)$$

此处:

$$\mathbf{W}_m = [w_m(1), w_m(2), \dots, w_m(N_T)]^T$$

$$\mathbf{W}_m = [w_m(1), w_m(2), \dots, w_m(N_R)]^T$$

$$\mathbf{H}_m = \begin{bmatrix} H_{1,1} & H_{2,1} & \dots & H_{N_T,1} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & \dots & H_{N_T,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{1,N_R} & H_{2,N_R} & \dots & H_{N_T,N_R} \end{bmatrix}_{N_R \times N_T}$$

$$\mathbf{N} = [n_1, n_2, \dots, n_{N_R}]^T$$

则接收端 SNR 为:

$$\text{SNR} = \frac{E\{ |(\mathbf{W}_m)^T \mathbf{H}_m \mathbf{W}_m d_m|^2 \}}{E\{ |(\mathbf{W}_m)^T \mathbf{N}|^2 \}} \\ = \frac{E\{ |(\mathbf{W}_m)^T \mathbf{H}_m \mathbf{W}_m d_m|^2 \}}{(\mathbf{W}_m)^H \mathbf{R}_m \mathbf{W}_m} \\ \leq (\mathbf{W}_m)^H (\mathbf{H}_m)^H \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{H}_m (\mathbf{W}_m) \\ = (\mathbf{W}_m)^H \mathbf{H}_m^H \sigma^2 \mathbf{I} \mathbf{H}_m \mathbf{W}_m \\ = \sigma^{-2} (\mathbf{W}_m)^H (\mathbf{H}_m)^H \mathbf{H}_m \mathbf{W}_m \quad (5)$$

上式不等式采用 Cauchy-Schwartz 不等式. 不等式中等号成立的条件是 $\mathbf{W}_m = \alpha \mathbf{H}_m \mathbf{W}_m$, 其中 α 取值使接收信号矢量归一化, 即 $\|\mathbf{W}_m\|^2 = 1$.

以上是讨论接收端与发送端波束形成矢量之间的对应关系, 即在发送矢量与信道矩阵确定的条件下确定接收向量. 由于信道本身特性是不受干预的, 那么如何使得发送矢量最佳, 则是下一步要讨论的问题.

在发送矢量中, 此处我们不考虑发射功率, 为分析简便, 我们对权矢量进行归一化处理, 即令: $\|\mathbf{W}_m\|^2 = 1$, 由式(5)

我们可得:

$$(\mathbf{W}_m)_{opt} = \arg \max (\mathbf{W}_m)^H (\mathbf{H}_m)^H \mathbf{H}_m (\mathbf{W}_m) \\ = \arg \max (\mathbf{W}_m)^H \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{U}^H \mathbf{W}_m \\ = \arg \max \sum_{\mu=1}^{N_t} \delta_{\mu} | [\mathbf{U}^H \mathbf{W}_m]_{\mu} |^2 \\ = \text{eig}_{\max} \text{vec} [(\mathbf{H}_m)^H (\mathbf{H}_m)] \quad (6)$$

式(6)中, 由于 $\mathbf{H}_m (\mathbf{H}_m)^H$ 是 Hermit 矩阵, 因此有奇异值分解:

$$(\mathbf{H}_m)^H \mathbf{H}_m = \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{U}^H \quad (7)$$

\mathbf{U} 为酉阵, \mathbf{D} 为奇异值构成的对角阵, 即 $\mathbf{D} = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, 0, \dots, 0\}_{N_R \times N_R}$.

由式(7)可知, 最大奇异阵对应的特征向量即为我们待求最佳的权矢量. 当为最大特征值对应的向量时, 其接收端的信噪比表示为:

$$\text{SNR}_{m,\max} = \sigma^{-2} (\mathbf{W}_m)_{opt}^H (\mathbf{H}_m)^H (\mathbf{H}_m) (\mathbf{W}_m)_{opt} \\ = \frac{\lambda_{m,\max} | [\mathbf{U}^H (\mathbf{W}_m)_{opt}] |^2}{\sigma^2} = \frac{\lambda_{m,\max}}{\sigma^2} \quad (8)$$

将单用户环境下基于波束成型的 MIMO 系统扩展到多用户环境中, 在 TDD 下行系统中, 对用户带宽实现自适应的调度, 能实现广播信道容量的极大提升; 或者在容量与误码率一定的条件下, 使总的发射功率最小化, 提升系统的有效性与可靠性.

在多用户系统中, 由于用户位置的随机性, 各个用户在所经历的信道可以视为独立的, 假设不考虑距离基站远近造成的平均功率的不同, 每个用户经历的信道应具有相同的统计特性. 因此对于不同的用户 m 相应的 $(\mathbf{H}_m)^H \mathbf{H}_m$ 的最大特征值也是独立同分布的. 选取其对应的 $(\mathbf{H}_m)^H \mathbf{H}_m$ 最大特征值最大的用户进行传输, 实际上就是从一组独立同分布的随机变量中选取其最大值.

4 性能分析

本部分将对以上提出的多用户波束成型分配准则带来的性能增益进行分析. 其中关键需要推导出信道矩阵 $(\mathbf{H}_m)^H \mathbf{H}_m$ 最大特征值 $\lambda_{m,\max}$ 的统计特性, 如概率密度函数和累计分布函数等, 然后根据排序统计 (order statistics), 求出进行自适应分配后接收信噪比的统计特性. 根据信道特性, 假设 $M_R \geq M_T$, 矩阵 $(\mathbf{H}_m)^H \mathbf{H}_m$ 服从 Wishart 分布.

假设不考虑距离基站远近所造成的平均功率的不同, 每个用户所经历的信道就具有相同的统计特性. 因此, 不失一般性, 论文只研究某个用户对应 Wishart 矩阵的最大特征值分布函数. 为了简便起见, 将信道矩阵 $(\mathbf{H}_m)^H \mathbf{H}_m$ 的第 i 个特征值简记为 λ_i , 将最大的特征值记为 λ_{\max} . 根据文献[7]可知, 未经排序的 Wishart 矩阵的特征值的联合概率密度 (PDF) 函数 $f_{\lambda}(\lambda_1 \dots \lambda_{M_t})$ 为

$$f_{\lambda}(\lambda_1 \dots \lambda_{M_t}) = \frac{[\prod_{i=1}^{M_t} \lambda_i]^{M_t - M_r} \exp(-\sum_{i=1}^{M_t} \lambda_i)}{M_t! [\prod_{i=1}^{M_t} (M_t - i)! (M_t - i)!]} \times [\prod_{1 \leq i < j \leq M_t} (\lambda_i - \lambda_j)^2] \\ \lambda_1 \dots \lambda_{M_t} \geq 0 \quad (9)$$

基于式(9)的联合概率密度函数, 可得出矩阵 $(\mathbf{H}_m)^H \mathbf{H}_m$ 的最大特征值 λ_{\max} 的分布函数:

$$F_{\lambda_{m,\max}}(t) = P(\lambda_{m,\max} \leq t) \\ = P(\lambda_1 \leq t, \lambda_2 \leq t, \dots, \lambda_{M_t} \leq t) \quad (10)$$

利用式(9), 可以重写式(10)如下:

$$F_{\lambda_{m,\max}}(t) = \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t \frac{(\prod_{i=1}^M \lambda_i)^{|M_r-M_r|} \exp(-\sum_{i=1}^{M_r} \lambda_i)}{M_r! [\prod_{i=1}^M (M_r-i)! (M_i-i)!]} \times [\prod_{1 \leq i < j \leq M_r} (\lambda_i - \lambda_j)^2] d\lambda_1 \cdots d\lambda_m$$

$$\lambda_1 \cdots \lambda_m \geq 0 \quad (11)$$

类似文献[7],变换式(11),可得最大特征值的概率密度函数为:

$$f_{\lambda_{m,\max}}(t) = \frac{d}{dt} f_{\lambda_{m,\max}}(t) = \frac{1}{\prod_{i=1}^{M_r} (M_r-i)! (M_i-i)!} \frac{d}{dt} \det(S(t))$$

$$= \frac{1}{\prod_{i=1}^{M_r} (M_r-i)! (M_i-i)!} \sum_{i=1}^{M_r} e^{z_i} \sum_{m=M_r-M_i}^{(M_r+M_i)i-2i^2} c_{i,m} t^m$$

$$= \sum_{i=1}^{M_r} \sum_{m=M_r-M_i}^{(M_r+M_i)i-2i^2} d_{i,m} \frac{i^{m+1} t^m e^{-t}}{m!} \quad (12)$$

其中

$$d_{i,m} = \frac{m! c_{i,m}}{i^{m+1} [\prod_{i=1}^{M_r} (M_r-i)! (M_i-i)!]} \quad (13)$$

以上分别给出了 Wishart 矩阵 $(\mathbf{H}_m)^H \mathbf{H}_m$ 最大特征值的分布函数和概率密度函数,接下来将以此来定量地分析自适应分配所带来的性能增益,以及用户数对于性能改善的影响。

假设有 K 个随机变量 Y_1, \dots, Y_K ,将它们进行排序得到 $Y_1 < Y_2 < \dots < Y_K$,如果 Y_i 的概率密度函数和分布函数分别记为 $f(x)$ 和 $F(x)$,那么对于排序后的第 r 个随机变量 Y_r ,它的概率密度函数 f_{Y_r} 等于^[9]

$$f_{Y_r}(x) = \frac{K!}{(r-1)! (K-r)!} [F(x)]^{-1} [1-F(x)]^{K-r} f(x), r=1, \dots, K \quad (14)$$

特别地,当 $r=K$ 时,即考虑最大值时,有

$$f_{Y_K} = K[F(x)]^{K-1} f(x) \quad (15)$$

$$F_{Y_K}(x) = [F(x)]^K \quad (16)$$

将式(11)和式(12)代入式(15)和(16)中,即可得 M 用户对应 $(\mathbf{H}_m)^H \mathbf{H}_m$ 的最大特征值的最大值的概率密度函数 $f_{\lambda_{m,\max},M}(t)$ 和分布函数 $F_{\lambda_{m,\max},M}(t)$ 。那么接收端信噪比的分布函数 $F_{SNR_{m,\max},M}(t)$ 可以写为

$$F_{SNR_{m,\max},M}(t) = [f_{\lambda_{m,\max}}(\frac{N_0}{E_s} t)]^M \quad (17)$$

在随后的仿真实验中,将利用 Monte-Carlo 仿真曲线验证式(17)理论曲线的正确性。该奇异值的性能分析,将为后续的随机用户的资源公平性分配奠定基础。

5 仿真结果和分析

仿真采用 Cadence 公司的 SPW 专业平台,无线信道采用 IMT-2000 Vehicular A 六径瑞利衰落信道模型。首先,对比理论分析曲线与 Monte-carlo 仿真曲线在不同用户数(1,5,10和20用户)条件下的最大奇异值累积概率密度分布,为衡量用户数对于分配准则的影响。图1描述了自适应分配相对于静态方案(无分配调度)的性能增益,以及这个增益随着用户数的变化趋势。从图示可看出,根据式(17)所得理论分析曲线与40000次统计 Monte-carlo 的仿真曲线完美融合,验证了理论分析的正确性。

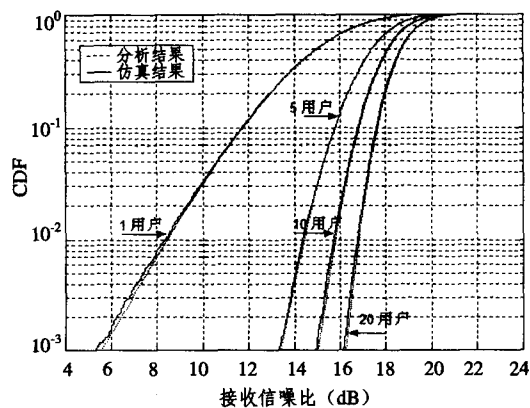


图1 不同用户数下累积概率密度分布

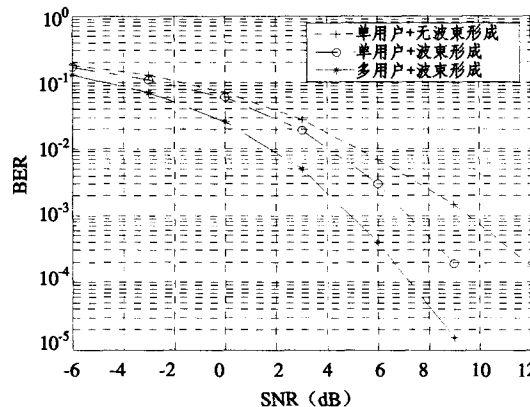


图2 自适应波束与多用户分集系统性能

另外,一个最明显的现象就是单用户和多用户情况下的性能相差很大,而这也正体现出了自适应分配相对于静态分配方案的增益。因为单个用户系统中不存在多用户分集,它与静态分配一样,都是在不考虑信道状况的条件下随机分配,因此二者的性能是相同的。当累积分布函数(CDF)为0.1时,5个用户系统相对于1个用户系统的性能增益大约是4dB。随着用户数的增加,自适应分配带来的性能改善也随之增大。

然后,为从误码率(BER)角度验证多用户分集给系统带来的增益,论文又分别仿真了无波束形成、有波束形成无用户调度、有波束形成且有用户调度的三种情况下的系统性能。试图全面地验证自适应算法带来的好处。仿真系统中包含8个用户,基站端和每个用户端均有2根天线,即 $M_T=M_R=2$,相应的性能曲线如图2所示,可看出多用户波束形成对性能改善相当明显,一方面得益于天线矢量阵列增益和最大比合并使接收信噪比最大化,另一方面得益于选择信道状况最好的用户进行传输,这是因为独立衰落的用户越多,在每个时刻就越有可能有用户处于其信道状况的峰值,通过自适应地分配资源能够带来的增益也就越大。二者的共同作用使得整个频带上的信道状况趋于平坦,因此系统性能获取显著的改善。

结束语 多用户分集本质上是一种利用“衰落”造成的“随机化”的技术。在所提方案中,通过对多个用户进行比较并选择,获取多用户分集;用户数越多,信道变化越随机,每个时刻就越有可能选择到一个接近其信道“峰值”状况的用户进行传输。通过阵列增益和空间分集消除这种随机性,使得信道的衰落趋于“平坦”。将阵列增益、空间分集和多用户分集

充分融合,从系统级的角度实现信道容量与传输性能的整体提升,对于理论分析与应用实践具有相当重要的理论价值。论文下一步将以此为基础,探讨业务公平性条件下 MIMO 信道复用容量增益与传输分集增益有效折衷策略,为无线网络信息论的进一步深入研究奠定新的基础。

参考文献

- [1] Telatar I E. Capacity of Multi-antenna Gaussian Channels(Telatar). pdf, European Transactions on Telecommunications [J], 1999, 10(6): 585-595
- [2] Zheng Lizhong , David N C Tse. Diversity and Multiplexing: A Fundamental Tradeoff in Multiple Antenna Channels. IEEE Trans. on Inform Theory,2003,49(5):1073-1096
- [3] Marzetta T, Hochwald B. Capacity of mobile multiple-antenna communication link in a Rayleigh flat-fading environment [J].

- IEEE Trans. on Information Theory, 1999, 45(1): 139-157
- [4] 王德胜,朱光喜,等. 相关衰落信道 MIMO STBC 空间分集增益与多用户自适应 OFDMA 研究. 通信学报,2006,27(3):99-104
- [5] Hamid Raeza Bahrami and Tho Le-Ngoc. MIMO Precoders Using Spatial and Path Correlations for Multipath Fading Channels// IEEE ICC 2007 Proceeding
- [6] Rappaport T S. Wireless Communications: Principles and Practice. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1996
- [7] Digne P A, Mallik R K, Jamuar S S. Analysis of transmit-receive diversity in Rayleigh fading. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(4): 694-703
- [8] Proakis J G. Digital Communications. 3rd edition. New York, McGraw-Hill, 1995
- [9] Hogg R V, Craig A T. Introduction to Mathematical Statistics. 5th edition. New York; Macmillan, 1995

(上接第 109 页)

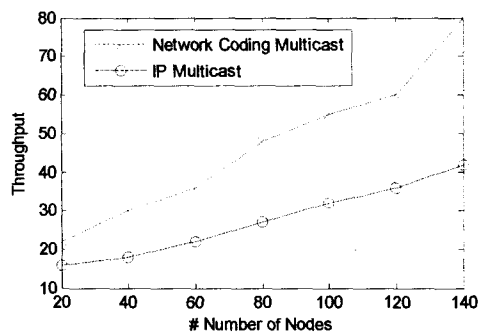


图 4 吞吐量与网络规模的关系, $r=20\%$, $c=3.5$

网络编码对组播吞吐量的提升与网络的规模有关。图 4 是分别对节点数为 20, 40, ..., 140 的网络进行的吞吐量的统计, 信宿节点的比例为 20%, 节点的平均度仍然为 3.5。可以看出, 网络规模越大, 网络编码对吞吐量的提升就表现得越明显。通过更大规模的实验证明, 网络编码能够适应大规模的组播传输。

图 5 表示了节点平均度为 4.5 的组播网络中网络吞吐量, 总节点数为 100。可以看出, 网络编码对组播吞吐量的提升的趋势受节点平均度的影响较小, 但是与图 3 相比, 节点平均度越大, 对于同样规模的组播网络, 吞吐量的提升程度会减少, 这是因为节点平均度越大, 网络越稠密, 可用的传输链路就越多, 采用传统的 IP 组播取得的实际最大流就越与组播理论容量接近。

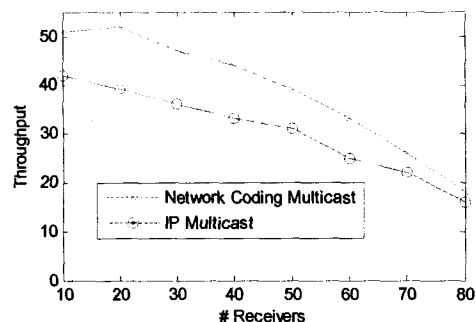


图 5 吞吐量与组播成员比例的关系, $n=100$, $c=4.5$

是信息传输领域的研究热点。实现网络编码组播, 必须建立传输路由和确定编码模式。由于网络编码的研究刚刚起步, 目前大多数的研究均集中在从理论上论证网络编码对网络性能的提升以及如何如何在节点上实施网络编码操作(即码构造算法)等方面, 而对于网络编码的路由问题, 则研究成果相对较少。但是, 建立传输路由是实施组播通信的前提。由于网络编码组播的本质特征与传统 IP 组播有重要的区别, 其路由构造方式并不相同。鉴于此, 本文通过分析网络编码组播的数学模型, 提出了一种基于最大流的网络编码组播的路由算法。如果网络编码组播的最大流为 h , 则通过该算法能够在信源与每个信宿之间建立包含 h 条边分离路径的路径簇。该算法结合典型的网络编码构造算法, 如随机网络编码, 能够构成完整的网络编码组播的解决方案。仿真实验表明, 与传统 IP 组播相比, 基于该算法的网络编码组播能够显著提升组播传输的性能。

参考文献

- [1] Ahlswede R, Cai Ning, Li S-Y R, et al. Network information flow. IEEE Trans. Inform. Theory, 2000, 46(4):1204-1216
- [2] Li S-Y R, Yeung R W. Linear network coding. IEEE Trans. Inform. Theory, 2000
- [3] Gkantsidis C, Miller J, Rodriguez P. Anatomy of a P2P Content Distribution System with Network Coding//Proc. of the 5th International Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS 2006). 2006
- [4] Park J S, Lun D S, Soldo F, et al. Performance of Network Coding in Ad Hoc Networks // Military Communications Conference. 2006
- [5] Koetter R, Medard M. Beyond Routing: An algebraic approach to network coding. In 2002 IEEE Infocom, 2002
- [6] Sanders P, Egner S, Tolhuizen L. Polynomial time algorithms for network information flow//Proc. 15th ACM Symposium on Parallel Algorithms and Architectures. 2003
- [7] Ho T, Leong B, Koetter R, et al. Byzantine modification detection in multicast networks using randomized network coding// IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT 2004). June 2004
- [8] Zosin L, Khuller S. On directed Steiner trees // 13th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA 2002). 2002: 59-63
- [9] 王树禾. 图论. 北京: 科学出版社, 2004
- [10] Yeung R W, Li S-Y R, Cai N, et al. Network Coding Theory. Now Publishers Inc., 2006
- [11] Waxman B M. Routing of multipoint connections. IEEE JSAC, 1988, 6(9):1617-1622

结束语 网络编码彻底改变了信息传输和处理的方式,