

协同通信系统中一种新的分析吞吐量的方法

啜钢 裴静 刘洪来 唐兴伟

(北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 100876)

(泛网无线通信教育部重点实验室(北京邮电大学) 北京 100876)

摘要: 为了提高系统性能并最大限度降低算法复杂度, 该文提出了一种新的协同通信系统中吞吐量的更优近似分析方法——等效卡方分布法。通过与传统的等效高斯分布法相比, 该方法得出了更为精确的吞吐量的理论表达式, 并进一步研究信息速率和信噪比对吞吐量的影响, 给出了使吞吐量达到最大的最优 R 。理论分析和仿真结果表明, 等效卡方分布法可以更有效地运用到基于多协作中继的协同通信系统的分析研究中。

关键词: 协同通信; 吞吐量; 中断概率; 卡方分布法

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)06-1446-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00834

A Novel Method of Throughput Analysis in Cooperative Communication Systems

Chuai Gang Pei Jing Liu Hong-lai Tang Xing-wei

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

(Key Laboratory of Universal Wireless Communication (Beijing University of Posts and Telecommunications), Ministry of Education, Beijing 100876, China)

Abstract: In order to improve the system performance and reduce the algorithm complexity future, a new better approximate analysis method named equivalent chi-square distribution method is proposed in cooperative communication systems. More accurate theoretical expressions of throughput are derived compared with the traditional equivalent Gaussian distribution method, the effect of throughput on information rate and signal-to-noise ratio is studied, and the optimal information rate parameter R is also given. Analysis and simulation demonstrate that equivalent chi-square distribution method can be effectively applied to the research of cooperative communication systems with the collaborative multiple relays.

Key words: Cooperative communication; Throughput; Outage probability; Chi-square distribution method

1 引言

目前, 协作通信的研究受到了广泛关注^[1-3], 其中, 吞吐量是研究的热点之一。文献[4]在多跳模型下给出了吞吐量的定义, 文献[5]进而分析了信息速率对吞吐量影响, 文献[6,7]利用排队论对协同中继网络中的吞吐量进行讨论, 但他们并没有给出具体的最优表达式, 对进一步的分析造成困难。文献[8]给出了在 MIMO 模型下吞吐量的近似, 但其近似方案却要求很大的信噪比, 本文则在多协作中继多接收天线的两跳模型下, 给出了吞吐量在小信噪比情况下的最优理论近似分析。传统的提高吞吐量的方案一般从增加协议和算法的复杂度入手, 文献[9]通过改进的 ALOHA 协议提高协同系统的吞吐量, 文献[10]则在 MIMO 系统中加入预编码机制使吞吐

量提高, 但他们仅对吞吐量的最大值进行了粗略计算, 并没有考虑具体的参数对吞吐量的影响。本文在得出的吞吐量最优近似表达式的基础上, 改变信息速率 R 和信噪比 SNR 提高吞吐量, 并通过计算机数值计算给出使吞吐量最大的最优信息速率, 降低了分析的复杂度, 从而提高系统性能。

2 系统模型

考虑具有 1 个发送节点, 多个中继节点和 1 个目的节点的通信系统, 如图 1 所示。为了方便问题的研究, 假设发送节点和中继节点都为单天线, 而目的节点为多天线, 那么中继节点和目的节点之间可以形成一个虚拟 MIMO 系统, 其中 S 表示发送节点, D 表示目的节点, r_i 表示第 i 个中继节点。系统中的每一个用户都分配一个唯一的正交的多址接入信道, 采用 Decode-and-Forward(DF)中继模式, 并

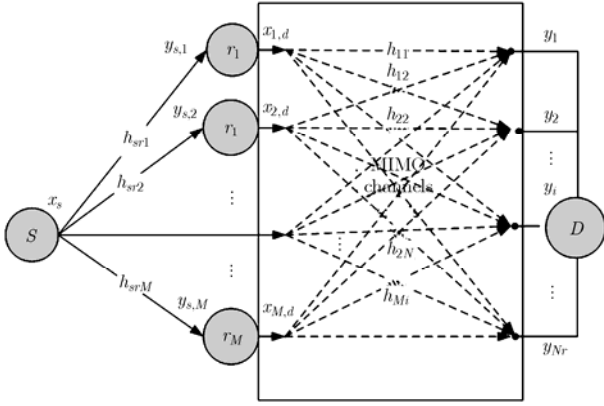


图1 协同通信系统模型

且所有的中继节点都是半双工工作模式。这个过程分为两个阶段，在第1阶段， S 通过广播信道广播信息，此时 r_i 只收不发，在第2阶段， S 和 r_i 向 D 发送信息，然后 D 将两个阶段接收到的信息进行结合再解码。本文把第1阶段叫做监听阶段(listening phase)，第2阶段叫做转发阶段/协作阶段(forward phase/cooperative phase)。

3 中继节点的选取

将源节点到第 i 个节点之间的中断概率 P_r 定义为信道容量 C_{s,r_i} 小于某一给定的速率 R 下的概率：

$$P_r \triangleq P(C_{s,r_i} < R) = P\left(\frac{1}{2} \log_2 (1 + \text{SNR} |h_{s,r_i}|^2) < R\right) \quad (1)$$

其中SNR为源节点的发射信噪比， h_{s,r_i} 为源节点到第 i 个中继节点的信道衰落系数。

在中继节点的选取上，本文采用信道功率的方法，即当中继节点的信道的功率增益 $|h_{s,r_i}|^2$ 达到一个门限值 $|h_{\text{th}}|^2$ 时，就把此节点作为发送节点的协作节点，那么每一个节点能够被选中作为中继节点的可能性为 $P\{|h_{s,r_i}|^2 > |h_{\text{th}}|^2\}$ ，由式(1)可知 $|h_{\text{th}}|^2 = (2^{2R} - 1) / \text{SNR}$ 。

假设 h_{s,r_i} 服从均值为0，实部和虚部方差均为 σ^2 的复高斯分布， $|h_{s,r_i}|$ 服从参数为 σ^2 的平坦瑞利分布，可得 $E(|h_{s,r_i}|) = \sqrt{\pi/2}\sigma$ ， $E(|h_{s,r_i}|^2) = 2\sigma^2$ ，则 $|h_{s,r_i}|^2$ 服从均值为 $2\sigma^2$ 的指数分布：

$$p(|h_{s,r_i}|^2) = \begin{cases} \frac{1}{|h_{s,r_i}|^2} e^{-\frac{|h_{s,r_i}|^2}{|h_{s,r_i}|^2}}, & |h_{s,r_i}|^2 > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\overline{|h_{s,r_i}|^2} = 2\sigma^2$ 表示 $|h_{s,r_i}|^2$ 的均值/期望。

用 $B(s)$ 表示由被选中的中继节点组成的协作域， $|B(s)|$ 表示 $B(s)$ 中中继节点的个数($|B(s)| \in \{0, 1, \dots, M\}$)，则有

$$\begin{aligned} P_r\{|B(s)|\} &= \sum_{j=0}^{|B(s)|} \left\{ \prod_{R_i \in B_j(s)} P_r\{|h_{s,r_i}|^2 \geq |h_{s,r_i}|_{\text{th}}^2\} \right. \\ &\quad \cdot \left. \prod_{R_i \notin B_j(s)} P_r\{|h_{s,r_i}|^2 < |h_{s,r_i}|_{\text{th}}^2\} \right\} \\ &= \sum_{j=0}^{|B(s)|} \left\{ \prod_{R_i \in B_j(s)} e^{-\frac{|h_{s,r_i}|_{\text{th}}^2}{|h_{s,r_i}|^2}} \prod_{R_i \notin B_j(s)} \left(1 - e^{-\frac{|h_{s,r_i}|_{\text{th}}^2}{|h_{s,r_i}|^2}}\right) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

4 吞吐量的理论近似

把图1的后半部分看成是一个MIMO系统，则系统容量可表示为

$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{2} \log_2 \left\{ \det \left(I_{N_r} + \frac{P}{N_t \sigma_w^2} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \right\} \\ &= \frac{1}{2} \log_2 \left\{ \det \left(I_{N_r} + \frac{\text{SNR}}{N_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 P 为发射功率， N_t 为源节点和中继节点的总个数($N_t = 1, \dots, M, M+1$)， $1/2$ 是因为节点处于半双工工作模式。为分析方便，设信号的每个分量是服从均值0的独立同分布的高斯随机变量，由于假设第1阶段和第2阶段的信道处于相关时间之内，所以将第1阶段源节点到中继节点的信道等效到第2阶段考虑。

吞吐量的定义^[4,5]为

$$\theta = (1 - P_r(C < R)) \cdot R \quad (5)$$

根据此定义，吞吐量是中断概率 P_r 和信息速率 R 的函数。再定义中断概率为 $P_r \triangleq P(C < R)$ ，则在一定的信息速率下，求出中断概率后可进一步得出吞吐量。

由于求解中断概率直接与系统的信道容量相关，为此先对图1的虚拟MIMO的信道容量进行分析，得到近似的容量等效，以此为基础得到近似的中断概率，进而求出所需的吞吐量分析式。

4.1 信道容量等效

(1)等效为高斯分布 由图1的虚拟MIMO可知，当发射天线数 $N_t \rightarrow \infty$ ，即发射天线数很大时，设信道是不相关的， $W = (1/N_t) \mathbf{H} \mathbf{H}^H$ ， λ_i 是 W 的第 i 个特征值， $m = E(\lambda_i)$ ， $\delta_i = \lambda_i - m$ ，则

$$\begin{aligned}
 C &= \log_2 \det \left(I_{N_r} + \frac{\text{SNR}}{N_t} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \\
 &= \sum_{i=1}^{N_r} \log_2 (1 + \text{SNR} \cdot \lambda_i) = N_r \log_2 (1 + \text{SNR} \cdot m) \\
 &\quad + \sum_{i=1}^{N_r} \log_2 \left(1 + \frac{\text{SNR} \cdot \delta_i}{1 + \text{SNR} \cdot m} \right) \\
 &= N_r \log_2 (1 + \text{SNR} \cdot m) + \frac{\text{SNR} \cdot \log_2 e}{1 + \text{SNR} \cdot m} \\
 &\quad \cdot \sum_{i=1}^{N_r} \delta_i + o \left(\sum_{i=1}^{N_r} \delta_i^2 \right) \tag{6}
 \end{aligned}$$

在 $N_t \rightarrow \infty$ 时, $o \left(\sum_{i=1}^{N_r} \delta_i^2 \right) \rightarrow 0$, 记 $v = D \left(\sum_{i=1}^{N_r} \delta_i \right)$,

由于 $\sum_{i=1}^{N_r} \delta_i = \sum_{i=1}^{N_r} (\lambda_i - m) = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_t} |h_{i,j}|^2 - N_r \cdot m$,

且 $|h_{i,j}|^2$ 是独立同分布的。根据中心极限定理, $\sum_{i=1}^{N_r} \delta_i$ 服从高斯分布, 从而有

$$C \sim N \left(N_r \cdot \log_2 (1 + \text{SNR} \cdot m), \left(\frac{\text{SNR} \cdot \log_2 e}{1 + \text{SNR} \cdot m} \right)^2 \cdot v \right)$$

进一步确定 $m, v, E \left(\sum_{i=1}^{N_r} \lambda_i \right) = N_r E(\lambda_i) = N_r m$,

而 $E \left(\sum_{i=1}^{N_r} \lambda_i \right) = \frac{1}{N_t} E(\text{tr}(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)), \text{tr}(\mathbf{H}\mathbf{H}^H) = \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_t} |h_{i,j}|^2 = \frac{1}{2} \cdot \chi_{2, N_r \cdot N_t}^2$, 那么 $E(\text{tr}(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)) = N_r \cdot N_t$, 故 $m=1$ 。

$$\begin{aligned}
 v &= D \left(\sum_{i=1}^{N_r} \delta_i \right) = D \left(\sum_{i=1}^{N_r} (\lambda_i - m) \right) \\
 &= D \left(\frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_t} |h_{i,j}|^2 - N_r \cdot m \right) \\
 &= \frac{1}{N_t^2} D \left(\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_t} |h_{i,j}|^2 \right) = \frac{1}{N_t^2} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_t} D \left(|h_{i,j}|^2 \right) \\
 &= \frac{1}{N_t^2} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_t} \left(E \left(|h_{i,j}|^4 \right) - \left(E \left(|h_{i,j}|^2 \right) \right)^2 \right) = \frac{N_r}{N_t}
 \end{aligned}$$

可知, 在发射天线很大的情况下, MIMO 的信道容量 C 服从高斯分布, 即

$$C \sim N \left(N_r \log_2 (1 + \text{SNR}), \frac{N_r \cdot \text{SNR}^2}{N_t \cdot (1 + \text{SNR})^2 \cdot (\ln 2)^2} \right) \tag{7}$$

结合文献[11], 本文给出了 4 种不同条件下, 将信道容量近似为高斯分布的结果, 如表 1 所示。以通式的形式给出这 4 种情况的吞吐量的表达式。

信道容量近似等效为高斯分布时, 令其均值为 μ_c , 方差为 σ_c^2 , 则信道容量的概率密度为 $p_c(x) =$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_c^2}} \exp \left(-\frac{(x - \mu_c)^2}{2\sigma_c^2} \right), \text{ 中断概率为}$$

$$P_r = P(C < R) = \int_{-\infty}^R p_c(x) dx = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_c^2}}$$

$$\cdot \int_R^{\infty} \exp \left(-\frac{(x - \mu_c)^2}{2\sigma_c^2} \right) dx = 1 - Q \left(\frac{R - \mu_c}{\sigma_c} \right)$$

$$= 1 - \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{R - \mu_c}{\sqrt{2}\sigma_c} \right) \tag{8}$$

表 1 4 种不同条件下信道容量近似为高斯分布的结果

发送天线数 (N_t)	接收天线数 (N_r)	信噪比 (SNR)	均值	方差
$N_t \rightarrow \infty$			$N_r \log_2 (1 + \text{SNR})$	$\frac{N_r \cdot \text{SNR}^2}{N_t \cdot (1 + \text{SNR})^2 \cdot (\ln 2)^2}$
	$N_r \rightarrow \infty$		$N_r \log_2 (1 + \text{SNR})$	$\frac{N_t}{N_r \cdot (\ln 2)^2}$
$N_t \rightarrow \infty$	$N_t \rightarrow \infty$	$\text{SNR} \rightarrow 0$	$\frac{N_r \cdot \text{SNR}}{\ln 2}$	$\frac{N_r \cdot (\text{SNR})^2}{N_t \cdot (\ln 2)^2}$
$N_t \rightarrow \infty$	$N_t \rightarrow \infty$	$\text{SNR} \rightarrow \infty$	$N_r \log_2 \left(\frac{\text{SNR}}{N_t} \right) + \frac{1}{\ln 2}$ $\left[-N_r \cdot \gamma + N_r \sum_{i=1}^{N_t-N_r} \frac{1}{i} + \sum_{i=1}^{N_t-1} \frac{i}{N_t-1} \right]$ $\gamma = 0.5772 \dots$	$\frac{1}{(\ln 2)^2} \cdot \left[-N_r \cdot \gamma + N_r \sum_{i=1}^{N_t-N_r} \frac{1}{i} + \sum_{i=1}^{N_t-1} \frac{i}{N_t-1} \right]$ $\gamma = 0.5772 \dots$

将图 1 的前后两部分结合起来分析, 则其整体的中断概率为

$$P_{rc} = \sum_{B(s)} P\{C < R | B(s)\} P\{B(s)\} \quad (9)$$

鉴于信道的模型都是平坦瑞利信道, 可以设节点数相同的情况下信道的中断概率是一样的。则式(9)可以改写为

$$\begin{aligned} P_{rc} &= \sum_{|B(s)|=0}^M P\{C < R | B(s)\} P\{|B(s)\} \\ &= \sum_{|B(s)|=0}^M C_M^{B(s)} \cdot \left\{ 1 - Q\left(\frac{R - \mu_c}{\sigma_c}\right) \right. \\ &\quad \cdot \left. \left[\prod_{R_i \subset B(s)} \exp\left(-\frac{|h_{s,r_i}|_{th}^2}{|h_{s,r_i}|^2}\right) \prod_{R_i \notin B(s)} \left(1 - \exp\left(-\frac{|h_{s,r_i}|_{th}^2}{|h_{s,r_i}|^2}\right)\right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)中的信道容量 C 是指在协作下的 MIMO 的信道容量, 而 R 为系统整体的信息速率 (bps/Hz),

$$C = \frac{1}{2} \log_2 \det \left(I_{N_r} + \frac{\text{SNR}}{N_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right), \quad \text{则 } \mu_c = \frac{1}{2} \mu_{\text{mimo}},$$

$\sigma_c^2 = \frac{1}{4} \sigma_{\text{mimo}}^2$, 可知, 吞吐量为

$$\begin{aligned} \theta &= (1 - P_{rc}(C < R)) \cdot R = 1 - \sum_{|B(s)|=0}^M C_M^{B(s)} \\ &\quad \cdot \left\{ 1 - Q\left(\frac{R - \mu_c}{\sigma_c}\right) \cdot \left[\prod_{R_i \subset B(s)} Q \prod_{R_i \notin B(s)} (1 - Q) \right] \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $Q = e^{-\frac{|h_{s,r_i}|_{th}^2}{|h_{s,r_i}|^2}}$ 。

(2) 等效为卡方分布 信道容量等效为高斯分布时, 对天线数和信噪比的限制比较苛刻。为此本文讨论在低信噪比下将信道容量等效为卡方分布时中断概率^[12]。

$$\begin{aligned} C &= \log_2 \det \left(I_{N_r} + \frac{\text{SNR}}{N_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \\ &= \sum_{i=1}^{N_r} \log_2 \left(1 + \frac{\text{SNR}}{N_t} \lambda_i \right) \approx \sum_{i=1}^{N_r} \frac{\text{SNR}}{N_t} \cdot \lambda_i \cdot \log_2 e \\ &= \frac{\text{SNR}}{N_t \cdot \ln 2} \cdot \text{tr}(\mathbf{H} \mathbf{H}^H) = \frac{\text{SNR}}{N_t \cdot \ln 2} \cdot \left(\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_t} |h_{ij}|^2 \right) \end{aligned} \quad (12)$$

其中 λ_i 是矩阵 $\mathbf{H} \mathbf{H}^H$ 的特征值。由于 $h_{i,j} = N(0, 1/2) + \sqrt{-1} \cdot N(0, 1/2)$, 故有 $2|h_{i,j}|^2$ 服从 χ_2^2 (卡方) 分布, 则 $2C / \left(\frac{\text{SNR}}{N_t \cdot \ln 2} \right) = 2 \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_t} |h_{i,j}|^2$ 服从 $\chi_{2 \cdot N_r \cdot N_t}^2$ 分布。令

$Y = 2C / \left(\frac{\text{SNR}}{N_t \cdot \ln 2} \right)$, 则有

$$\begin{aligned} p_Y(y) &= \frac{1}{2^{(N_r \cdot N_t)} \Gamma(N_r \cdot N_t)} y^{(N_r \cdot N_t) - 1} e^{-y/2} \cdot y > 0 \\ P(C < R) &= P\left(Y < 2R / \left[\frac{\text{SNR}}{N_t \cdot \ln 2} \right]\right) \\ &= \int_0^{2R / \left[\frac{\text{SNR}}{N_t \cdot \ln 2} \right]} p_Y(y) dy = \int_0^{2R / \left[\frac{\text{SNR}}{N_t \cdot \ln 2} \right]} \frac{1}{2^{(N_r \cdot N_t)} \Gamma(N_r \cdot N_t)} \\ &\quad \cdot y^{(N_r \cdot N_t) - 1} e^{-y/2} dy = \Gamma\left[2R / \left[\frac{\text{SNR}}{N_t \cdot \ln 2} \right], N_r \cdot N_t\right] \end{aligned} \quad (13)$$

则信道容量等效为卡方分布时, 系统的吞吐量为

$$\begin{aligned} \theta &= (1 - P_{rc}) \cdot R = \left\{ 1 - \sum_{|B(s)|=0}^M C_M^{B(s)} \right. \\ &\quad \cdot \left. \left\{ \Gamma\left[4R / \left(\ln 2 \cdot (|B(s)| + 1) \right), N_r \cdot (|B(s)| + 1) \right] \right\} \right. \\ &\quad \cdot \left. \left\{ \prod_{R_i \subset B(s)} Q \prod_{R_i \notin B(s)} (1 - Q) \right\} \right\} \cdot R \end{aligned} \quad (14)$$

式中 $Q = e^{-\frac{|h_{s,r_i}|_{th}^2}{|h_{s,r_i}|^2}}$ 。

4.2 仿真对比分析

为了验证上述几种理论近似的正确性, 给出相应的仿真分析。

图 2 为在信噪比为 5 dB 时上述 5 种吞吐量的理论分析的比较。此处的 Monte Carlo 仿真是基于本文系统模型, 仿真 10000 次, 每次随机生成不同的信道矩阵, 然后根据式(4)求出容量 C 与指定的速率 R 进行比较, 统计中断(即 $C < R$)发生的次数占总次数的比例, 可以得出中断概率, 然后求出吞吐量 Monte Carlo 仿真能够给出接近实际系统情况的曲线, 我们以此作为参照。可以看出在信息速率 R 较低时, 这几种情况都与 Monte Carlo 仿真曲线重合, 而随 R 的增大, 只有信道容量近似为卡方分布的吞吐量的曲线与 Monte Carlo 仿真曲线一直重合, 所以这种理论近似最接近实际情况, 为最优的近似方

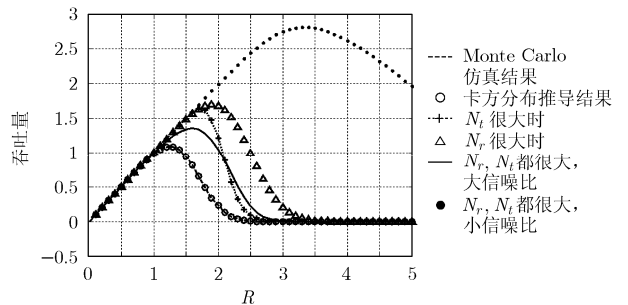


图 2 考虑中继选择的吞吐量的曲线

案。也可以从图 2 上看出，吞吐量随 R 的变化存在极大值，下面将对此进行讨论。

5 吞吐量的最优分析

在上述结论的基础上，利用信道容量等效为卡方分布时得出的吞吐量的理论近似，讨论影响吞吐量的因素，使吞吐量达到最大，从而提高系统性能。由式(14)可知，吞吐量 θ 与 R ，SNR 有关。

图 3 是根据式(14)得出的吞吐量与信噪比和信息速率的 3 维关系曲线。从图上可以看出吞吐量随信息速率和信噪比的变大呈增大的趋势。在信噪比较小，信息速率较大时，系统发生中断，此时吞吐量为 0，而且信噪比越大，越不容易发生中断。

下面分别考虑两个参数对吞吐量的影响。

如前所述，一定信噪比下，吞吐量随 R 的变化

$$\begin{aligned}
 & \left[1 - \sum_{|B(s)|=0}^M C_M^{|B(s)|} \cdot \left\{ \Gamma \left(4R^* / \left(\frac{\text{SNR}}{|B(s)|+1} \cdot \log e \right), N_r \cdot (|B(s)|+1) \right) \right\} \left[\prod_{R_i \subset B(s)} e^{-\frac{2^{2R^*-1}}{2\sigma^2 \cdot \text{SNR}}} \prod_{R_i \notin B(s)} \left(1 - e^{-\frac{2^{2R^*-1}}{2\sigma^2 \cdot \text{SNR}}} \right) \right] \right] - R^* \\
 & \cdot \left[\sum_{|B(s)|=0}^M C_M^{|B(s)|} \prod_{R_i \subset B(s)} e^{-\frac{2^{2R^*-1}}{2\sigma^2 \cdot \text{SNR}}} \prod_{R_i \notin B(s)} \left(1 - e^{-\frac{2^{2R^*-1}}{2\sigma^2 \cdot \text{SNR}}} \right) \cdot \frac{4(|B(s)|+1)}{2^{\lfloor N_r \cdot (|B(s)|+1) \rfloor} \Gamma[N_r \cdot (|B(s)|+1)] \cdot \text{SNR} \cdot \log e} \right. \\
 & \cdot \left. \left(\frac{4R^* (|B(s)|+1)}{\text{SNR} \cdot \log e} \right)^{\lfloor N_r \cdot (|B(s)|+1) \rfloor - 1} \cdot e^{\frac{2R^* (|B(s)|+1)}{\text{SNR} \cdot \log e}} \right] + \sum_{|B(s)|=0}^M C_M^{|B(s)|} \Gamma \left(4R^* / \left(\frac{\text{SNR}}{|B(s)|+1} \cdot \log e \right), N_r \cdot (|B(s)|+1) \right) \\
 & \cdot \left[\left(-\frac{2^{2R^*} \cdot \ln 2}{\text{SNR}} \right) \cdot \prod_{R_i \subset B(s)} e^{-\frac{2^{2R^*-1}}{2\sigma^2 \cdot \text{SNR}}} \prod_{R_i \notin B(s)} \left(1 - e^{-\frac{2^{2R^*-1}}{2\sigma^2 \cdot \text{SNR}}} \right) \right]^{|B(s)|} \\
 & + \left[\left(\frac{2^{2R^*} \cdot \ln 2}{\text{SNR}} \right) \cdot \prod_{R_i \subset B(s)} e^{-\frac{2^{2R^*-1}}{2\sigma^2 \cdot \text{SNR}}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2^{2R^*-1}}{2\sigma^2 \cdot \text{SNR}}} \right)^{M-|B(s)|-1} \cdot e^{\frac{2R^*-1}{2\sigma^2 \cdot \text{SNR}}} \cdot \left. \right]^{|B(s)|} = 0 \tag{16}
 \end{aligned}$$

因为此超越方程无法表示出 R^* 的闭式，本文用计算机数值计算来进行分析。

图 4 为信噪比一定时，卡方分布推导的吞吐量随信息速率 R 的变化关系曲线。从图 4 可以看出，在一定的信噪比下，吞吐量随 R 的变化存在极大值。信噪比越大，极值点处的 R 值越大，达到的最大吞吐量也越大。可以参照图 4 得出的最优信息速率，调整实际系统的信息速率，使吞吐量达到最大，从而提高系统性能。由图 4 还可以看出随信噪比的变大，吞吐量有增大的趋势。

现在考虑一定的信息速率下，信噪比对吞吐量的具体影响。

图 5 根据式(14)给出了信息速率一定时，吞吐量与信噪比的关系曲线。从图上可以看出在不发生中断时，吞吐量随信噪比的变大逐渐增大，然后趋

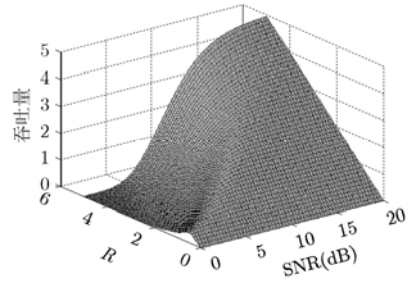


图 3 吞吐量与信息速率和信噪比的关系

存在极大值，使吞吐量最大的最优 R^* 为

$$R^* = \arg \max_R \{ \theta(R) \} \tag{15}$$

利用 $\frac{\partial \theta(R^*)}{\partial R^*} = 0$ ，求吞吐量最大处 R 的值，得

出公式(16)。

于饱和。信息速率越大，使吞吐量达到最大值时所需要的信噪比越高。

6 结束语

本文提出了一种协同通信系统中吞吐量的最优近似分析方案。并从理论分析和仿真验证两个方面

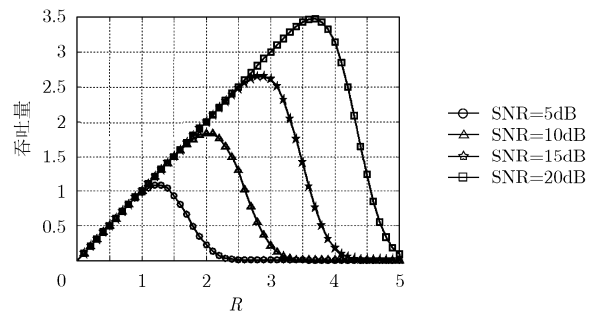


图 4 信噪比一定时吞吐量与信息速率的关系

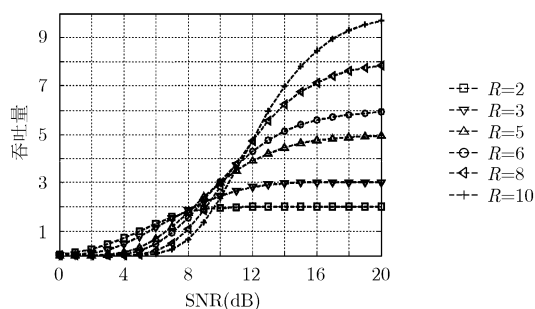


图5 信息速率一定时吞吐量与信噪比的关系

对其进行了分析, 结果表明等效卡方分布法可以更有效地运用到协同通信系统吞吐量的近似分析中。并在此基础上, 本文还通过计算机数值计算, 给出了一定信噪比下使吞吐量达到最大时的最优 R^* 。说明, 通过增大信噪比, 调节信息速率, 可使吞吐量达到最大, 进而提高系统性能。

参 考 文 献

- [1] Sendonaris A, Erkip E, and Aazhang B. User cooperation diversity part I: system description[J]. *IEEE Transaction on Communication*, 2003, 51(11): 1927-1938.
- [2] Wei Ning, Zhang Zhong-pei, and Li Shao-qian. Signal space diversity in decode-and-forward cooperative communication [C]. *Communications and Mobile Computing*, 2009. CMC '09. WRI International Conference, China, Jan. 2009: 127-130.
- [3] Zhang Qian, Jia Jun-cheng, and Zhang Jin. Cooperative relay to improve diversity in cognitive radio networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(2): 111-117.
- [4] Yu Meng, Li Jing(Tiffany), and Blum R S, Azadet Kameran. Toward maximizing throughput in wireless relay: A general user cooperation model[C]. *Information Sciences and Systems*, 2007. CISS '07. 41st Annual Conference, Johns Hopkins University, Department of Electrical Engineering, Baltimore, MD, USA, 2007, 09: 25-30.
- [5] Ahmed N and Aazhang B. Throughput gains using rate and power control in cooperative relay networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(4): 656-660.
- [6] Yeh E M and Berry R A. Throughput optimal control of cooperative relay networks[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(10): 3827-3833.
- [7] Yeh E and Berry R. Throughput optimal control of wireless networks with two-hop cooperative relaying[C]. *Information Theory 2007. ISIT 2007. IEEE International Symposium, France, June 2007: 351-355.*
- [8] Prasad N and Varanasi M K. Throughput analysis for MIMO systems in the high SNR regime, *Information Theory, 2006. IEEE International Symposium, ISIT 2006, Seattle, USA, July, 2006: 1954-1958.*
- [9] Gokturk M S, Ercetin O, and Gurbuz O. Throughput analysis of ALOHA with cooperative diversity[J]. *IEEE Communications Letters*, 2008, 12(6): 468-470.
- [10] Kenichi Kobayashi, Tomoaki Ohtsuki, and Toshinobu Kaneko. Throughput maximization transmission control scheme using precoding for MIMO systems[C]. *Communications, 2007. ICC'07. IEEE International Conference, Scotland, June 2007: 5098-5102.*
- [11] Hochwald B M, Marzetta T L, and Tarokh V. Multi-antenna channel-hardening and its implications for rate feedback and scheduling [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(9): 1893-1909.
- [12] 张路, 啜钢, 林立凡, 温小军. 多协作中继多接收天线下载码中继传输的功率分配. *北京邮电大学学报*, 2008, 31(6): 104-108.
Zhang Lu, Chuai Gang, Lin Li-fan, and Wen Xiao-jun. Power allocation for cooperative decode-and-forward transmission with multiple cooperative relays and multiple received antennas[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2008, 31(6): 104-108.

啜 钢: 男, 1959年生, 硕士生导师, 副教授, 研究方向为无线通信、协作通信.

裴 静: 女, 1988年生, 硕士, 研究方向为协作通信、无线资源管理.

刘洪来: 男, 1986年生, 硕士, 研究方向为无线通信、网络规划与优化.