

文章编号: 1000-582X(2013)02-109-06

# 译码转发协同通信网络自适应中继选择算法

康 虹<sup>1,2</sup>, 冯文江<sup>1</sup>, 贾年龙<sup>1</sup>, 孟器宇<sup>3</sup>

(1. 重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆电子工程职业学院, 重庆 400044;  
3. 中国人民解放军 66489 部队, 北京 100095)

**摘 要:** 为了优化译码转发协同通信网络的性能, 提出一种自适应中继选择算法(ARS), 并对系统中断概率和平均协同中继数进行分析。该算法在源节点到目的节点的直接传输失败时, 目的节点对译码集中的中继节点按信道质量进行降序排列, 依次选择序列中的中继节点参与协同, 直到目的节点的瞬时接收信噪比不低于预置信噪比门限。仿真结果表明, ARS 算法能够获得最优系统中断性能, 有效减少平均协同中继数, 从而提高带宽效率, 降低系统开销。

**关键词:** 协同通信; 译码转发; 中继选择; 中断概率

中图分类号: TN925

文献标志码: A

## Adaptive relay selection algorithm in decode-and-forward cooperative communication networks

KANG Hong<sup>1,2</sup>, FENG Wenjiang<sup>1</sup>, JIA Nianlong<sup>1</sup>, MENG Qiyu<sup>3</sup>

(1. College of Communications Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China  
2. Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China;  
3. Unit NO. 66489 of PLA, Beijing 100095, China)

**Abstract:** An adaptive relay selection algorithm(ARS) is proposed to optimize the performance of decode-and-forward cooperative communication networks, both system outage probability and average numbers of cooperative relays are analyzed. When the direct transmission between source and destination is fail, according to the channel quality, the destination orders relay nodes in the decode set, and the ordered relays are included in cooperation in turn until the instantaneous received SNR at destination is not smaller than the preset SNR threshold. Simulation results show that, the proposed algorithm can get optimal outage performance, decrease the average numbers of cooperative relays efficiently, to increase bandwidth efficiency and reduce system overhead.

**Key words:** cooperative communication; decode-and-forward(DF); relay selection; outage probability

协同通信通过彼此共享网络内不同终端节点的信道资源, 构成虚拟多天线阵而获得空间分集增益, 能够有效抵抗无线信道的衰落效应<sup>[1]</sup>。Sendonaris 最早提出用户协同的概念<sup>[1-2]</sup>, Laneman 等人研究了

瑞利衰落环境下各种基本的协同通信协议<sup>[3]</sup>。为进一步提高系统性能, 如何选择合适的中继节点参与协同是一个关键问题<sup>[4-11]</sup>。文献[4]提出了一种在满足一定中断概率条件下最小化系统发射总功率的

收稿日期: 2011-04-09

基金项目: 重庆市自然科学基金重点资助项目(CSTC2009BA2064)

作者简介: 冯文江(联系人), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事宽带无线接入技术、认知无线电、通信信号处理等方向研究, (E-mail)kltuerkh@126.com。

中继选择算法。文献[6]提出的固定优先级选择协议主要考虑了各个中继节点参与协同的公平性。文献[8]提出的DFP(decode-and-forward protocol)利用译码集中所有中继参与协同传输,能够获得最优的中断性能,但会导致系统的带宽效率低下,处理开销大。采用机会中继(opportunistic relaying, OR)<sup>[9-10]</sup>能有效提高带宽效率,且每次传输只选择一个最佳中继参与协同,虽然简化了协同过程,但会牺牲系统的中断性能,导致中断概率增大。文献[11]提出了一种基于广义选择合并(generalized selection combining, GSC)的多中继选择算法,始终选择固定数的最佳中继参与协同,不能合理利用系统资源。此外,目前许多文献都不管源节点到目的节点的直接传输结果如何,总是使用中继节点进行协同传输,这会导致频谱资源的浪费。为此,针对译码转发协同通信网络,基于增强中继协议<sup>[3]</sup>,提出一种自适应中继选择算法,在源节点到目的节点的直接传输失败时,目的节点对译码集中的中继节点按信道质量进行降序排列,依次选择序列中的中继节点参与协同,直到目的节点的瞬时接收信噪比不低于预置信噪比门限,能获得最优的系统中断性能,有效减少平均协同中继数,从而提高带宽效率,降低系统开销。

## 1 系统模型

译码转发协同通信网络模型如图1所示。假设系统中存在一个源节点 $s$ 、一个目的节点 $d$ 和 $M$ 个中继节点 $r_i(i=1,2,\dots,M)$ 。各节点以半双工方式工作, $s$ 和 $d$ 之间存在直接路径并可通过中继节点进行协同通信。

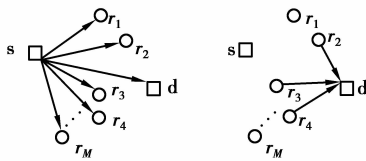


图1 译码转发协同通信网络模型

数据包的传输过程分为3个阶段,采用增强中继协议,根据目的节点的反馈信息来确定直接传输是否成功,中继是否需要转发信息。所有节点之间的信道均假定为相互独立的瑞利平坦慢衰落信道<sup>[12]</sup>,且在一个数据包内保持不变。

①直接传输阶段:源节点向目的节点发送数据包,目的节点接收后,如果译码成功,则发送ACK

帧,该数据包的传输过程立刻结束,无需进行中继选择和协同传输阶段;如果译码失败,则广播NACK帧。在目的节点接收信息的同时,各个中继节点也尝试接收源节点发出的信息。

②中继选择阶段:当中继节点收到目的节点发来的NACK帧时,便开始检查自身是否成功译码了源节点所发的数据包。成功获得源数据包的中继节点组成译码集 $D(m)$ 。位于译码集中的中继节点采用S-ALOHA机制向目的节点发送自己的成功译码应答信息。目的节点在 $D(m)$ 中选择 $N(1 \leq N \leq |D(m)|)$ 个中继节点参与协同转发并给这 $N$ 个中继分配时隙,然后将选择结果和相应分配的时隙通过低速率的信道反馈给被选择的中继。这里 $|D(m)|$ 表示译码集中元素个数。

③协同传输阶段:被选择的中继节点在时分正交子信道上将阶段①中接收到的源节点信息同时向目的节点进行转发,目的节点将阶段①和阶段③接收到的信息进行最大比合并(MRC)。

中继节点 $m$ 能够正确译码阶段①接收到的信息,需要源节点 $s$ 到 $m$ 的瞬时信噪比 $\gamma_{s,m}$ 大于预置信噪比门限 $\gamma_{th}$ ,则译码集 $D(m)$ 可表示为<sup>[13]</sup>

$$D(m) = \{m \in M; \gamma_{s,m} \geq \gamma_{th}\}, \quad (1)$$

所有满足式(1)的中继节点具有协同资格。

目的节点在阶段②接收到译码集中的中继节点的成功译码信息时,估计其到目的节点的瞬时信噪比,然后按瞬时信噪比的大小对译码集中的中继进行降序排列,并依次记为 $r_1, r_2, \dots, r_{|D(m)|}$ 。

当协同中继数为 $N$ 时,目的节点的瞬时接收信噪比为

$$\gamma_N = \gamma_{s,d} + \sum_{i=1}^N \gamma_{i,d}, \quad (2)$$

其中 $\gamma_{s,d}$ 和 $\gamma_{i,d}$ 分别是 $s$ 到 $d$ 和 $r_i$ 到 $d$ 的瞬时信噪比,且有 $\gamma_{1,d} \geq \gamma_{2,d} \geq \dots \geq \gamma_{|D(m)|,d}$ 。

对瑞利衰落信道, $\gamma_{s,m}$ 、 $\gamma_{s,d}$ 和 $\gamma_{i,d}$ 是相互独立的指数随机变量,其统计特性分别为 $\bar{\gamma}_{s,m} = E[\gamma_{s,m}]$ ,  $\bar{\gamma}_{s,d} = E[\gamma_{s,d}]$ ,  $\bar{\gamma}_{i,d} = E[\gamma_{i,d}]$ 。

## 2 算法描述

为了更合理地利用系统资源,提出一种自适应中继选择(adaptive relay selection, ARS)算法,采用增强中继协议,若源节点到目的节点的直接传输成功,则不需要任何中继节点进行重传;若直传失败,目的节点对译码集中的中继节点按信道质量降序排列,依次选择序列中的中继节点参与协同,直到

目的节点的瞬时接收信噪比  $\gamma_{\text{end}}$  不小于预置信噪比门限  $\gamma_{\text{th}}$ , 确保通信不中断。

ARS 算法流程描述如下

Step 1: 源节点  $s$  广播信息, 目的节点  $d$  估计  $\gamma_{s,d}$ , 并与  $\gamma_{\text{th}}$  比较, 若  $\gamma_{s,d} \geq \gamma_{\text{th}}$ , 转 Step 5;

Step 2: 若  $|D(m)| > 0$ , 目的节点  $d$  进行中继信道估计和中继排序, 初始化  $\gamma_{\text{end}} = \gamma_{s,d}$ ,  $N=0$ , 否则转 Step 5;

Step 3:  $N=N+1$ , 更新  $\gamma_{\text{end}} = \gamma_{\text{end}} + \gamma_{N,d}$ , 并与  $\gamma_{\text{th}}$  比较, 若  $\gamma_{\text{end}} \geq \gamma_{\text{th}}$ , 转 Step 5;

Step 4: 若  $N < |D(m)|$ , 转 Step 3;

Step 5: 结束。

当  $s$  到  $d$  的直接传输失败, 需要中继节点进行译码重传时, 最好的情况是  $N=1$ , 即从译码集  $D(m)$  中选择一个信道质量最好的最佳中继节点转发; 最差的情况是  $N=|D(m)|$ , 等价于要求译码集  $D(m)$  中的所有中继节点都要进行转发。尽管 ARS 算法在中继选择阶段引入了一定的时延, 但这对于非实时要求的通信系统是可以接受的。ARS 算法的主要优势在于根据实际信道状态自适应选择协同中继, 增加系统通信的可靠性, 有效降低平均协同中继数, 提高带宽效率, 降低系统开销, 能更加合理地利用系统资源。

### 3 性能分析

#### 3.1 中断概率

目的节点  $d$  的瞬时接收信噪比  $\gamma_{\text{end}}$  为

$$\gamma_{\text{end}} = \begin{cases} \gamma_{s,d}, \gamma_{s,d} \geq \gamma_{\text{th}}; \\ \gamma_1, \gamma_1 \geq \gamma_{\text{th}} \text{ and } \gamma_{s,d} < \gamma_{\text{th}}; \\ \gamma_N, \gamma_N \geq \gamma_{\text{th}} \text{ and } \gamma_{N-1} < \gamma_{\text{th}}; \\ \gamma_{|D(m)|}, \text{ otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

则系统中断事件为

$$[(\gamma_{s,d} \leq \gamma_{\text{th}}) \cap |D(m)| = 0] \cup [(\gamma_{s,d} \leq \gamma_{\text{th}}) \cap (\gamma_{s,d} + \sum_{i=1}^{|D(m)|} \gamma_{i,d} \leq \gamma_{\text{th}} | \gamma_{s,d} \leq \gamma_{\text{th}}) \cap |D(m)| \neq 0]. \quad (4)$$

由于

$$(\gamma_{s,d} + \sum_{i=1}^{|D(m)|} \gamma_{i,d} \leq \gamma_{\text{th}} | \gamma_{s,d} \leq \gamma_{\text{th}}) \subset (\gamma_{s,d} \leq \gamma_{\text{th}}).$$

此时, 系统中断概率为

$$P_{\text{outage}} = \Pr[\gamma_{s,d} \leq \gamma_{\text{th}}] \Pr[|D(m)| = 0] + \sum_{j=1}^M \Pr[|D(m)| = j] \times \Pr[(\gamma_{s,d} + \sum_{i=1}^j \gamma_{i,d}) \leq \gamma_{\text{th}}]. \quad (5)$$

其中,  $\Pr[\gamma_{s,d} \leq \gamma_{\text{th}}] = 1 - \exp[-\gamma_{\text{th}}/\bar{\gamma}_{s,d}]$ ,  $\Pr$

$$[|D(m)| = j, 0 \leq j \leq M] = \binom{M}{j} \left( \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_{s,r}}\right) \right)^j \times \left( 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_{s,r}}\right) \right)^{M-j},$$

$$\binom{M}{j} = \frac{M!}{j!(M-j)!}.$$

记随机变量  $X = \gamma_{s,d}$ ,  $Y = \sum_{i=1}^N \gamma_{i,d}$ ,  $Z = X + Y$ ,

其中  $\gamma_{1,d} \geq \Lambda \geq \gamma_{N,d} \geq \Lambda \geq \gamma_{j,d}$ , 则  $Z$  的累积分布函数为

$$F_{Z, N}(z) \triangleq \Pr[Z < z] = \int_0^z \int_0^{z-x} f_{x,y}(X, Y) dy dx = \int_0^z \frac{1}{\gamma_{s,d}} \exp\left(-\frac{x}{\gamma_{s,d}}\right) \int_0^{z-x} f_Y(y) dy dx = \int_0^z \frac{1}{\gamma_{s,d}} \exp\left(-\frac{x}{\gamma_{s,d}}\right) F_Y(z-x) dx. \quad (6)$$

式(6)中第二个等式成立是因为  $X$  和  $Y$  相互独立。

$Y$  的累积分布函数为<sup>[14]</sup>

$$F_Y(y) = \frac{j!}{(j-N)!N!} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{y}{\gamma_{r,d}}\right) \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\left(\frac{y}{\gamma_{r,d}}\right)^i}{i!} + \sum_{l=1}^{j-N} (-1)^{N+l-1} \frac{(j-N)!}{(j-N-l)!l!} \left(\frac{N}{l}\right)^{N-1} \times \left[ \left(1 + \frac{l}{N}\right)^{-1} \left[ 1 - \exp\left(-\left(1 + \frac{l}{N}\right)\frac{y}{\gamma_{r,d}}\right) \right] - \sum_{n=0}^{N-2} \left(-\frac{l}{N}\right)^n \left[ 1 - \exp\left(-\frac{y}{\gamma_{r,d}}\right) \sum_{i=0}^{n-1} \frac{\left(\frac{y}{\gamma_{r,d}}\right)^i}{i!} \right] \right] \right\}. \quad (7)$$

当  $N=j$  时, 有

$$F_Y(y) = 1 - \exp\left(-\frac{y}{\gamma_{r,d}}\right) \sum_{i=0}^{j-1} \frac{\left(\frac{y}{\gamma_{r,d}}\right)^i}{i!}. \quad (8)$$

将式(6)、(8)代入式(5)中, 获得系统中断概率为

$$P_{\text{outage}} = \left( 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_{s,d}}\right) \right) \left( 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_{s,r}}\right) \right)^M + \sum_{j=1}^M \binom{M}{j} \left( \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_{s,r}}\right) \right)^j \left( 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_{s,r}}\right) \right)^{M-j} F_{Z,j}(\gamma_{\text{th}}). \quad (9)$$

#### 3.2 平均协同中继数

协同中继节点数  $N(1 \leq N \leq |D(m)|)$  是随信道状态变化的离散随机变量,  $N < |D(m)|$  意味着系统能获得更高的带宽效率和更低的功率开销。然而,  $N$  越小, 目的节点瞬时接收信噪比也越小, 会导致中断概率上升。平均协同中继数是对系统节省的功率开销的一种量化<sup>[14]</sup>, 有

$$E[N] = \Pr[\gamma_{s,d} < \gamma_{th}] \times \sum_{j=1}^M \Pr[|D(m)| = j] \times \sum_{k=1}^j \Pr[N = k | |D(m)| = j] \times k. \quad (10)$$

当  $j=1$  时,  $\Pr[N=1 | |D(m)| = 1] = 1$ ;

当  $j \geq 2$  时,

$$\Pr[N = k | |D(m)| = j] = \begin{cases} \Pr(\gamma_1 \geq \gamma_{th}), k = 1; \\ \Pr([\gamma_k \geq \gamma_{th}] \cap [\gamma_{k-1} < \gamma_{th}]), k = 2, \dots, j-1; \\ \Pr(\gamma_{j-1} < \gamma_{th}), k = j. \end{cases} \quad (11)$$

依据文献[15]的分析,有

$$\begin{aligned} \Pr([\gamma_k \geq \gamma_{th}] \cap [\gamma_{k-1} < \gamma_{th}]) &= \\ \Pr([\gamma_{k-1} + \gamma_{k,d} \geq \gamma_{th}] \cap [\gamma_{k-1} < \gamma_{th}]) &= \\ F_{Z,k-1}(\gamma_{th}) - F_{Z,k}(\gamma_{th}), \end{aligned} \quad (12)$$

将其代入(11)中,可得

$$\Pr[N = k | |D(m)| = j] = \begin{cases} 1 - F_{Z,1}(\gamma_{th}), k = 1; \\ F_{Z,k-1}(\gamma_{th}) - F_{Z,k}(\gamma_{th}), k = 2, \dots, j-1; \\ F_{Z,j-1}(\gamma_{th}), k = j. \end{cases} \quad (13)$$

进一步化简,平均协同中继数为

$$E[N] = \Pr[\gamma_{s,d} < \gamma_{th}] \times \sum_{j=1}^M \Pr[|D(m)| = j] \times (1 + \sum_{k=1}^{j-1} F_{Z,k}(\gamma_{th})). \quad (14)$$

## 4 仿真结果与分析

采用蒙特卡洛仿真验证 ARS 算法的理论分析,并与典型的中继选择算法进行比较。DFP 协议<sup>[8]</sup>利用译码集  $D(m)$  中所有中继节点转发;OR 算法<sup>[9]</sup>估计译码集  $D(m)$  中所有中继节点到目的节点的瞬时信噪比,选择信噪比最大的中继参与协同。GSC 算法<sup>[11]</sup>根据译码集  $D(m)$  中所有中继节点到目的节点的瞬时信噪比,对中继进行降序排列,始终选择前 4 个最佳中继参与协同。仿真中,假设  $\bar{\gamma}_{s,d} = \bar{\gamma}_{s,r} = \bar{\gamma}_{r,d} = \bar{\gamma}$ , 归一化平均信噪比为  $\gamma_{\text{norm}} = \frac{\bar{\gamma}}{\gamma_{th}}$ 。

图 2 和图 3 给出了 ARS 算法在中继节点总数分别为 4、8、12 时的系统中断概率和平均协同中继数的理论值和仿真值。由图可知,理论分析与仿真结果完全吻合,从而验证了理论分析的正确性。 $M$  越大,系统中断概率越小,平均协同中继数越多。另外,当信噪比较低时,译码集  $D(m)$  中的中继节点少,则具有协同资格的中继节点少,导致平均协同中

继数少;当信噪比较高时,随着信噪比增加,源节点和目的节点间的直接传输成功概率增大,需要中继节点协同转发的概率变小,也导致平均协同中继节点数变少。

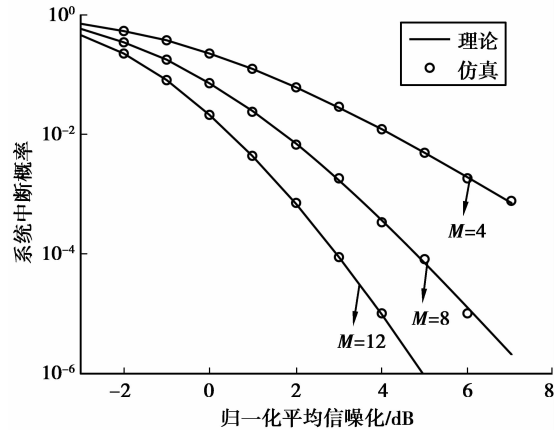


图 2 系统中断概率

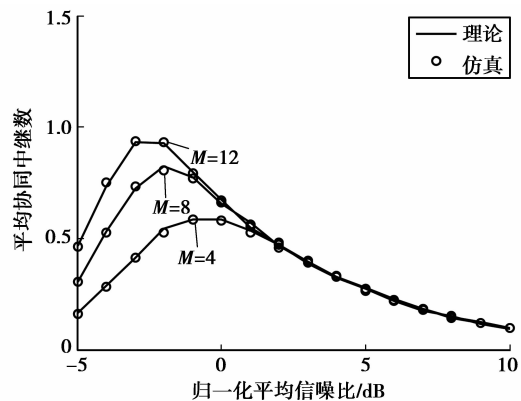


图 3 平均协同中继数

图 4 和图 5 分别给出了中继节点总数  $M=8$  时不同算法的系统中断概率和平均协同中继数的对比曲线。从图 4 中可以看到,在任意信噪比下,ARS 算法的系统中断概率是最小的,其中断概率曲线与 DFP 协议完全重合,则 ARS 算法的中断性能与 DFP 协议一样是最优的,与理论分析相符。而 OR 算法的系统中断概率最大,中断性能最差。当信噪比较低时,译码集  $D(m)$  中的中继节点少,GSC 算法的中断概率与 ARS 算法相同,但随着信噪比的增加,具有协同资格的中继节点增加,ARS 算法的中断概率也逐渐低于 GSC 算法。

从图 5 中可以看到,在任意信噪比下,ARS 算法的平均协同中继数明显少于 DFP 协议和 GSC 算法,意味着能够获得更高的带宽效率,更低的系统功率开销;在高信噪比时,与 OR 算法几乎完全重合,

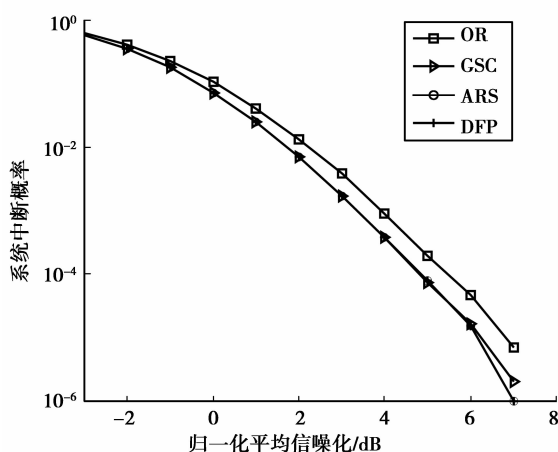


图 4 不同算法系统中断概率比较

此时,ARS 算法从译码集中选择一个信道质量最好的最佳中继参与协同,就能保证系统通信不中断。在归一化平均信噪比为 2dB 时,ARS 算法、GSC 算法和 DFP 协议的平均协同中继数分别为 0.4,1.6 和 2,与 GSC 算法和 DFP 协议相比,ARS 算法能节省 75% 和 80% 的功率开销。

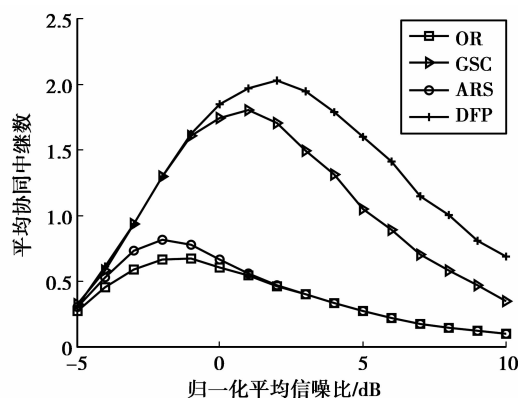


图 5 不同算法平均协同中继数比较

## 5 结 论

针对译码转发协同通信网络,基于信噪比门限提出了一种自适应中继选择(ARS)算法,分析了系统中断概率和平均协同中继数。尽管 ARS 算法在中继选择阶段引入了一定的时延,但这对无实时需求的通信系统是可以接受的。仿真结果表明,利用 ARS 算法根据实际的信道状态对中继节点进行自适应选择,在获得最优中断性能的同时,能有效减少平均协同中继数,提高系统带宽效率,降低系统功率开销,从而优化了系统的整体性能。

## 参考文献:

- [1] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User cooperation diversity. part I. system description [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1927-1938.
- [2] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User cooperation diversity. part II. implementation aspects and performance analysis [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1939-1948.
- [3] Laneman J N, Tse D N, Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [4] Chen M, Serbetli S, Yener A. Distributed power allocation strategies for parallel relay networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(2): 552-561.
- [5] Vardhe K G, Reynolds D, Woerner B D. Joint power allocation and relay selection for multiuser cooperative communication [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(4): 1255-1260.
- [6] Huang W J, Hong Y P, Kuo C C J. Lifetime maximization for amplify-and-forward cooperative networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(5): 1800-1805.
- [7] Zhang W S, Duan D L, Yang L Q. Relay selection from a battery energy efficiency perspective [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(6): 1525-1529.
- [8] Chen S P, Wang W B, Zhang X. Performance analysis of multiuser diversity in cooperative multi-relay networks under rayleigh-fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(7): 3415-3419.
- [9] Hwang K S, Ko Y C, Alouini M S. Performance analysis of incremental opportunistic relaying over identically and non-identically distributed cooperative paths [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(4): 1953-1961.
- [10] Wang H, Yang S Z, Lin J Z, et al. Single relay selection with feedback and power allocation in multisource multidestination cooperative networks [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(12): 997-1000.
- [11] Ikki S S, Ahmed M. H. Performance analysis of generalized selection combining for decode-and-forward cooperative-diversity networks [C]// Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Communications, June 14-18, 2009, Dresden, Germany. Piscataway: IEEE, 2009: 1-6.
- [12] 冯文江, 薛绒, 程中武. 功率分配对前向放大协作分集技术的影响 [J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2008,

- 31(5):524-527.  
FENG Wenjiang, XUE Rong, CHEN Zhongwu. Influence of power distribution on amplify-and-forward cooperative diversity protocol[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2008, 31(5): 524-527.
- [13] Chen H, Liu J, Zheng L N, et al. An improved selection cooperation scheme for decode-and-forward relaying[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(12):1143-1145.
- [14] Yang H C. New results on ordered statistics and analysis of minimum-selection generalized selection combining(GSC)[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(7):1876-1885.
- [15] Amarasuriya G, Ardakani M, Tellambura C. Adaptive multiple relay selection scheme for cooperative wireless networks[C]// Proceedings of the 2010 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, April 18-21, 2010, Sydney, NSW, Piscataway: IEEE, 2010: 1-6.
- (编辑 侯湘)
- 
- (上接第108页)
- [7] Ladommatos N, Balian R, Horocks R, et al. The effect of exhaust gas recirculation on combustion and NOx emissions in a high-speed direct-injection diesel engine [C]// Proceedings of the International Congress & Exposition, February 26, 1996, Detroit, Michigan, United States. [S. l.]: SAE Technical Papers, 1996: 10.4271/960840.
- [8] Egnell R. The influence of EGR on heat release rate and NO formation in a diesel engine[C]// Proceedings of the CEC/SAE Spring Fuel & Lubricants Meeting & Exposition, June 19, 2000, Paris, France. [S. l.]: SAE Technical Papers, 2000: 2000-01-1807.
- [9] 庄兵, 彭飞舟, 黄贤龙. 内燃机废气再循环(EGR)率评价方法分析[J]. 小型内燃机与摩托车, 2007, 36(4): 31-33.  
ZHANG Bing, PENG Feizhou, HUANG Xianlong[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2007, 36(4):31-33.
- [10] 姚喜贵, 张振东, 张忠孝, 等. 装备 EGR 系统柴油机的结构参数优化及排放性能试验研究[J]. 汽车技术, 2000(2):12-15.  
YAO Xigui, ZHANG Zhendong, ZHANG Zhongxiao, et al. Study on emission performance test and structure parameter optimization for diesel engine equipped with EGR system[J]. Automobile Technology, 2000(2):12-15.
- [11] Sato Y, Noda A, Sakamoto T. Combustion and NOx emission characteristics in a DI methanol engine using supercharging with EGR [C]// Proceedings of the International Spring Fuels & Lubricants Meeting & Exposition, May 5, 1997, Dearborn, Michigan, United States. [S. l.]: SAE Technical Papers, 1997: 10.4271/971647.
- [12] Yoshizawa K, Mori K, Matayoshi Y, et al. Development of an exhaust gas recirculation distribution prediction method using three-dimensional flow analysis and its application[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(4):1066-1074.
- [13] Dubreuil A, Foucher F, Mouna? m-Rousselle C, et al. HCCI combustion: effect of NO in EGR[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2879-2886.
- [14] Tomazic D, Pfeifer A. Cooled EGR: a must or an option for 2002 /04[C]// Proceedings of the SAE 2002 World Congress & Exhibition, March 4, 2002, Detroit, Michigan, United States. [S. l.]: SAE Technical Papers, 2002: 2002-01-0962.
- [15] Murayama T, Zheng M, Chikahisa T, et al. Simultaneous reductions of smoke and NOx from a DI diesel engine with EGR and dimethyl carbonate[J]. SAE Technical Paper, 1995: 952518.
- [16] 席端良, 方锡邦. 废气再循环在增压中冷柴油机上的试验研究[J]. 柴油机设计与制造, 2007, 15(2): 28-31, 56.  
XI Duanliang, FANG Xibang. Experimental study on application of EGR on TCI diesel engine[j]. Design & Manufacture of Diesel Engine, 2007, 15(2):28-31,56.
- [17] 杨雪茹, 梅德纯, 毕胜强. EGR 对增压柴油机排放特性的影响[J]. 拖拉机与农用运输车, 2008, 35(1):82-84.  
YANG Xueru, MEI Dechun, BI Shengqiang. Effects of EGR on turbocharged diesel engine emissions [J]. Tractor & Farm Transporter, 2008, 35(1):82-84.
- (编辑 张小强)