



认知合作中继网络中的最优中继选择策略

刘银山^{1,2,3}, 钟晓峰^{1,2}, 王京^{1,2}

(1. 清华大学电子工程系 北京 100084; 2. 清华信息科学与技术国家实验室 北京 100084;
3. 空军大连通信士官学校 大连 116600)

摘要: 认知合作中继通信可以有效提升无线通信网络的性能和频谱效率。在中继节点较多的情况下, 最优中继选择是一个有待解决的问题, 它是中继探测成本与合作通信的分集增益之间的一个折中。基于有限情形的最优停时理论给出了最优中继选择策略, 进一步得到一个纯 SNR (signal-to-noise ratio, 信噪比) 阈值结构的策略。数字仿真结果验证了其有效性, 在待探测中继较多和每个中继探测成本较高情况下, 该最优中继选择策略以最少的探测次数获得最大的收益增益。

关键词: 中继选择; 最优停时理论; 合作通信; 认知无线电

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015228

Optimal Relay Selection Strategy in Cognitive Cooperative Relaying Network

Liu Yinshan^{1,2,3}, Zhong Xiaofeng^{1,2}, Wang Jing^{1,2}

(1. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology,
Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Dalian Airforce Communication NCO Academy, Dalian 116600, China)

Abstract: Cognitive cooperative relaying communication significantly improves the performance of wireless communication networks and spectral efficiency. Optimal relay selection problem, which characterize the desired tradeoff between the probing cost for establishing cooperative transmission and hence higher reward via cooperative diversity, is a hard issue when the number of relay nodes is large. Optimal relay selection strategy was established by using optimal stopping theory with a finite horizon. Furthermore, a pure SNR (signal-to-noise ratio) threshold structure was exhibited. Theoretical analysis and numerical results indicate that proposed optimal relay selection strategy is effective in reducing the number of probing candidate relays and improving the reward of source.

Key words: relay selection, optimal stopping theory, cooperative communication, cognitive radio

收稿日期: 2015-06-23; 修回日期: 2015-09-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 基金资助项目 (No. 2012CB316000), 国家科技重大专项基金资助项目 (No. 2015ZX03002010-002)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2012CB316000), The National Science and Technology Major Project (No. 2015ZX03002010-002)

论文引用格式: 刘银山, 钟晓峰, 王京. 认知合作中继网络中的最优中继选择策略. 电信科学, 2015228

Liu Y S, Zhong X F, Wang J. Optimal relay selection strategy in cognitive cooperative relaying network. Telecommunications Science, 2015228

1 引言

认知合作中继通信被看作有效提升无线通信网络性能的新技术。认知合作通信的基本前提是允许移动用户作为中继节点通过认知无线电通信技术帮助附近其他移动用户传输数据。中继技术具有提升系统吞吐量、拓展网络覆盖、增加链路速率和增强可靠性 4 个方面的特点。另外,多用户合作通信不需要像中继那样升级基础设施就可以部署实施。同时,认知无线电不但可以提升频谱利用率,而且不会给传统蜂窝网络带来频谱干扰。

最近,随着可以同时支持蜂窝通信和短距离通信的多种无线接入方式的高性能智能手机的普及,使得多用户合作通信在智能终端间易于实现。然而,设计一个低复杂度、分布式的合作通信机制仍然具有挑战性。首先,移动终端受限于有限的计算能力和不充足的电池电量;其次,分布式的多用户合作机制带来的信令开销会极大增加合作成本,从而抵消合作分集增益。特别是移动智能终端的大量增加,源节点探测周边所有的中继节点是不可能也是不现实的做法。此外,多用户合作通信在提升源节点速率的同时会对中继节点造成损害,因为这需要中继节点使用自己的电量传输源节点的数据,因此,多用户合作机制有必要通过金钱支付或者积分支付对中继节点的行为进行补偿和激励。所以,在基于认知无线电的合作中继网络中,源节点如何有效地以最低能量消耗选取一个合适的中继节点是本文的主要研究点,称为最优中继选择问题。

对最优中继选择问题的研究以往主要基于物理层参数的最优选择,包括最大接收 SNR (signal-to-noise ratio, 信噪比) 准则^[1]、最大源—中继和中继—终点的信道增益的调和平均数方法^[2]、效用最大化方法^[3]、发射功率最小化准则^[4]和博弈论的方法^[5]。这些方法需要获得所有中继节点的物理层参数。既然探测所有中继节点不可能,就需要对中继节点一个个探测,那就存在一个合作分集增益和探测个数之间的折中问题。该问题可以使用最优停时理论解决^[6]。最优停时理论被广泛用于分布式机会调度和机会接入。参考文献[7]基于最优停时理论在 Ad Hoc 网络中提出了分布式机会调度方法。参考文献[8]基于两层最优停时理论在无线中继网络提出了机会接入方法。参考文献[9]在合作中继网络中联合考虑了社交特性和物理层参数。不同的是,本文的研究是在认知合作中继网络中,考虑了对中继节点的金钱支付和物理层参数 SNR 以及探测成本对最优中继选择的复合作用。

本文基于有限情形的最优停时理论提出了最优中继选择策略。通过与对当前中继节点合作的性能增益和进一步探测其他节点的成本之间的折中,最优中继选择策略可以以最少的探测次数选到最好的中继节点。而且,该策略是一个纯 SNR 阈值结构的策略。理论分析和数字仿真结果验证了其在待探测中继较多和对每个中继节点探测成本较高情况下,以最小的探测次数获得最大的性能增益。

2 认知合作中继系统模型

2.1 认知合作网络架构

基于自组织的认知合作中继网络架构如图 1 所示,主要由 3 部分组成:一个主用户、一个源节点和拥有 M 个中继节点的次用户网络。其中,同时具有认知通信接入能力的中继节点接入传统蜂窝基站。次用户和主用户之间采用共存式频谱共享 (spectrum underlay) 模型。用 $P, S, R_i (i=1, 2, \dots, M)$ 分别表示主用户、源节点和中继节点。假设源节点 (移动设备) 由于与自己的接入基站的信道质量不高,寻找附近拥有较好基站接入链路的中继节点 (移动设备) 的帮助,从而接入网络传输数据。假设网络中所有节点间的信道为独立的慢变平衰落瑞利信道,用 h_{ij} 表示各节点之间的信道系数,其中 $(i, j) \in \{(S, P), (S, R_i), i=1, 2, \dots, M\}$ 。则信道增益 $|h_{ij}|^2$ 服从参数为 λ_{ij} 的负指数分布。为了不超过主用户可容忍的最大干扰门限功率 I_{th} , 又保证源节点获得最优的通信质量,发送功率 P_s 满足: $P_s |h_{sp}|^2 = I_{th}$ 。从而源节点 S 与中继节点 $R_i (i=1, 2, \dots, M)$ 传输过程中的信噪比为:

$$\gamma_k = \frac{I_{th} |h_{sr}|^2}{\sigma^2 |h_{sp}|^2} \quad (1)$$

其中, σ^2 为白噪声功率, 根据参考文献 [10], 令 $G = \frac{\lambda_{sr} I_{th}}{\sigma^2}$, 则 γ_k 的概率密度函数为:

$$f(\gamma_k) = \frac{\lambda_{sr} G}{(\lambda_{sr} \gamma_k + G)^2} \quad (2)$$

根据香农公式,对于单天线用户的信道容量为:

$$C(\gamma_k) = W \log(1 + \gamma_k) \quad (3)$$

其中, W 是带宽,不失一般性,假设为 1。同样的,假设源节点和中继节点间信道增益服从同一个负指数分布,即 $\lambda_{sr} = \lambda$ 。

另外,多用户合作机制有必要通过金钱支付或者积分支付对中继节点的服务进行补偿和激励,假设中继节点以 $\pi \in [0, 1]$ 元/bit 的归一化服务价格提供中继服务。 $\pi=0$ 意味着中继提供免费的中继服务,问题退化为不考虑服务补偿

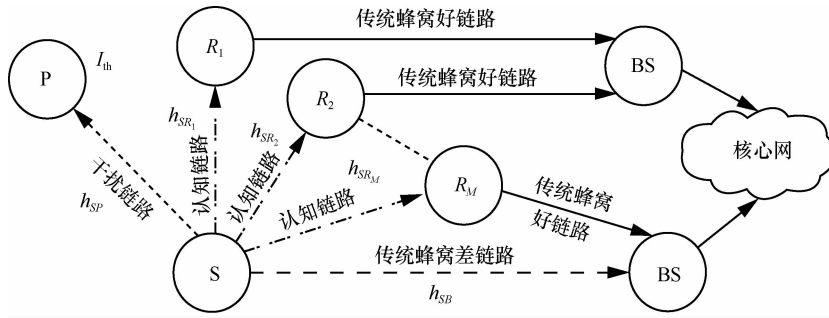


图1 认知合作中继网络架构

的情形。

2.2 认知合作中继协议

假设合作中继网络以时长为 T 的帧运行, 帧 T 由若干个探测时隙 τ 和传输持续时间 $T-k\tau$ 构成。假设 $\{R_1, R_2, \dots, R_M\}$ 是一个观察序列, 它是中继索引 $\{1, 2, \dots, M\}$ 的一个排列。源节点逐个对中继节点进行探测, 在某一个时隙 τ 内源节点向中继节点 R_k 发射探测信号 RTS 并接收来自中继节点 R_k 的 CTS, 从而获得与中继节点 R_k 的信道状态信息, 如果从该节点获得的收益满足某个准则, 则选取中继节点 R_k 作为合作中继节点, 并在剩下的时间 $T-k\tau$ 给中继节点 R_k 传送数据。显然, 探测时隙 τ 反映了探测一个中继节点要花费的时间成本, 进而也反映了能量消耗。探测的中继节点越多, 能量消耗越多, 剩余的传输时间越少, 但获得更高传输速度的可能也越大, 所以在这里存在二者的一个折中。

3 中继选择的最优选择策略

3.1 最优中继选择问题

为了便于选择最好的中继, 源节点需要逐个对中继节点进行探测, 据探测序列, 在第 k 轮探测中获得与中继节点 R_k 的探测信息: 信噪比 γ_k 。此时, 源节点如果选择当前中继节点 R_k , 会获得的瞬时传输速率 $C(\gamma_k)$ 和传输时间 $T-k\tau$, 所以传输的数据大小为 $(T-k\tau)C(\gamma_k)$ bit, 对应需要支付给中继节点 R_k 的费用为 $(T-k\tau)C(\gamma_k)\pi$ 。据此, 可以定义在时长为 T 的帧内源节点从中继节点获得的瞬时收益为:

$$y_k = \beta_k C(\gamma_k) (1 - \pi) \quad (4)$$

其中, $\beta_k \in (0, 1)$ 为折扣因子, $\beta_k = 1 - \frac{k\tau}{T}$ 。折扣因子 β_k 反映了探测 k 个中继节点的时间成本。 k 越大, β_k 越小。也就是说, 源节点探测的中继节点数越多, 获得的合作传输时间越少。然而, 由于合作分集增益, 瞬时传输速率为 $C(\gamma_k)$ 会越大。

另外, 源节点如果选择继续探测下一个中继节点, 会获得一个期望收益值。可见, 本文关键的问题是如何找到一个停时 k 从而获得一个最高的收益。该问题是一个序列决策问题, 可以使用最优停时理论解决^[6]。

有限情形的最优停时理论可以描述为如下 2 项^[6]:

- 一个同分布的随机序列 $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_M$;
- 和对应的一个实值收益序列 $y_1(\gamma_1), y_2(\gamma_1, \gamma_2), \dots, y_M(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_M)$ 。

一个决策者逐个观察随机序列 $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_M$, 当 $\Gamma_k = \gamma_k$ 一个变量被观察时, 决策者可以停止观察并获得收益 $y_k(\gamma_k)$, 或者继续观察下一个变量 Γ_{k+1} 。目标是选择一个停时 k 最大化收益。由于移动用户的快速移动和为了避免与其他源节点产生冲突, 这里只考虑不可召回模式, 即在一个帧内, 不允许回头去选择一个已经放弃的中继节点。

3.2 最优中继选择策略

现在, 本策略使用有限情形的最优停时理论解决最优中继选择问题, 由于要探测的中继节点是有限 M 个, 所以直接使用逆向归纳法。具体如下: M 阶段必须作为一个停时, 从而得到 $M-1$ 阶段的最优停时规则, 进一步得到 $M-2$ 阶段的最优停时规则, 直到得到第 1 阶段的最优停时规则。令 $V_k^{(M)}(\gamma_1, \dots, \gamma_k)$ 为从 M 个目标中选择第 k 个得到的最大收益, 它可以由式 (5) 得到:

$$V_k^{(M)}(\gamma_1, \dots, \gamma_k) = \max\{y_k(\gamma_1, \dots, \gamma_k), \mathbb{E}x(V_{k+1}^{(M)}(\gamma_1, \dots, \gamma_k, \Gamma_{k+1}) | \Gamma_1 = \gamma_1, \dots, \Gamma_k = \gamma_k)\} \quad (5)$$

其中, $y_k(\gamma_1, \dots, \gamma_k)$ 表示源节点选择当前中继节点 R_k (即第 k 阶段) 的瞬时收益, $\mathbb{E}x(V_{k+1}^{(M)}(\gamma_1, \dots, \gamma_k, \Gamma_{k+1}) | \Gamma_1 = \gamma_1, \dots, \Gamma_k = \gamma_k)$ 表示源节点继续使用最优停时规则观察下一个中继节点获得的期望收益。显然, 当 $V_k^{(M)}(\gamma_1, \dots, \gamma_k) = y_k(\gamma_1, \dots, \gamma_k)$ 满足时, 选择中继节点 R_k 是最优的。另外, 由于随机变量 $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_M$ 是独立同分布的, 所以式 (5) 可以简化为:

$$V_k^{(M)}(\gamma_k) = \max\{y_k(\gamma_k), Ex(V_{k+1}^{(M)}(\Gamma_{k+1}))\} \quad (6)$$

令 $R_k^* = Ex(V_{k+1}^{(M)}(\Gamma_{k+1}))$, 实际就是第 k 阶段的收益阈值, 当第阶段瞬时收益 $y_k(\gamma_k)$ 超过阈值 R_k^* 时, 在第 k 阶段停下来选取 R_k 作为合作中继节点是最优的, 否则继续探测下一个节点是最优的。

使用逆向归纳法, 可以得到如下的最优停止策略, 即最优中继选择策略。

定理 1 源节点的最优中继选择策略是当前中继节点的收益满足条件:

$$k^* = \min\{k \geq 1: Y_k \geq R_k^*\} \quad (7)$$

其中, 收益阈值序列 $\{R_k^*\}_{k=1}^M$ 通过如下的递推关系得到:

$$R_k^* = \begin{cases} R_{k+1}^* \frac{\lambda \gamma_{k+1}^*}{G + \lambda \gamma_{k+1}^*} + (1 - \pi) \beta_{k+1} \left[\frac{G}{G - \lambda} \ln \left(\frac{G}{\lambda} + \gamma_{k+1}^* \right) \right] - \\ \left(\frac{\lambda \gamma_{k+1}^*}{G + \lambda \gamma_{k+1}^*} + \frac{\lambda}{G - \lambda} \right) \ln(1 + \lambda \gamma_{k+1}^*), \lambda \neq G \\ R_{k+1}^* \frac{\gamma_{k+1}^*}{1 + \gamma_{k+1}^*} + (1 - \pi) \beta_{k+1} \frac{1}{1 + \gamma_{k+1}^*} \ln[e(1 + \gamma_{k+1}^*)], \lambda = G \end{cases} \quad (8)$$

其中, γ_{k+1}^* 是第 $k+1$ 阶段 (即源节点与中继节点 R_{k+1}) 的信噪比阈值, 表达式为:

$$\gamma_{k+1}^* = \frac{R_{k+1}^*}{2^{(1-\pi)\beta_{k+1}}} - 1 \quad (9)$$

证明 由于源节点必须选择最后一个中继节点 R_M (即最后一个阶段 M), 而且瞬时收益 y_k 是非负的, 所以最后一个阶段的收益阈值是 0, 即 $R_M^* = 0$ 。然后把等式 (6) 带入 $R_k^* = Ex(V_{k+1}^{(M)}(\Gamma_{k+1}))$, 逐个递推计算阈值序列 $\{R_k^*\}_{k=1}^{M-1}$ 如下:

$$\begin{aligned} R_k^* &= Ex(V_{k+1}^{(M)}(\Gamma_{k+1})) = Ex\left[\max\{Y_{k+1}, R_{k+1}^*\}\right] \\ &= Ex\left[\max\{\beta_{k+1} C(\Gamma_{k+1})(1 - \pi), R_{k+1}^*\}\right] \\ &= \int_{\gamma_{k+1}^*}^{\infty} (1 - \pi) \beta_{k+1} \ln(1 + \gamma) f(\gamma) d\gamma + R_{k+1}^* \int_0^{\gamma_{k+1}^*} f(\gamma) d\gamma \end{aligned} \quad (10)$$

把 $f(\gamma)$ 带入式 (10) 使用分部积分法, 并分 $\lambda \neq G$ 和 $\lambda = G$ 分别计算可得式 (8), 证毕。

从定理中可以看到阈值序列 $\{R_k^*\}_{k=1}^M$ 随着观察序数是单调递减的。阈值 R_k^* 反映了源节点跳过中继节点 R_k 后而从后续节点中选择更好的中继节点的最大期望收益, 所以阈值 R_k^* 有两层意义, 其一是选择中继节点 R_k 的收益阈值; 其二是

从 k 个中继节点中做最优选择所获得的最大期望收益。

从定理 1 和式 (9) 中的信噪比阈值, 可以得到如下的推论。

推论 1 源节点的最优中继选择策略是与当前中继节点的信噪比满足条件:

$$k^* = \min\{k \geq 1: \Gamma_k \geq \gamma_k^*\} \quad (11)$$

其中, 信噪比阈值序列 $\{\gamma_k^*\}_{k=1}^M$ 由式 (9) 计算得到。

通过应用有限情形的最优停时理论, 得到的最优中继选择问题的最优选择策略, 是一个简单的阈值规则。最优中继选择问题的目标是以最少的探测次数获得最大的期望收益, 最优规则 k^* 决定了一个停时序列 K , 根据定理, 可以得到在源节点观察完一个中继节点 $K=k, k=1, 2, \dots, M$ 后

停下来的概率 $\phi_k = 1 - F_{Y_k}(R_k^*) = \frac{G}{G + \lambda \left(2^{\frac{R_k^*}{(1-\pi)\beta_k}} - 1 \right)}$, 其

中, $F_{Y_k}(\cdot)$ 是 Y_k 的累计分布函数。这样, 在每一个中继节点处的概率分布函数为:

$$\text{Prob}(K=k) = \left[\prod_{i=1}^{k-1} (1 - \phi_i) \right] \phi_k, k=1, 2, \dots, M-1$$

$$\text{Prob}(K=M) = 1 - \sum_{k=1}^{M-1} \text{Prob}(K=k) \quad (12)$$

所以, 由最优规则 k^* 决定的平均探测次数 (停时的期望) $Ex(K)$ 为:

$$Ex(K) = \sum_{k=1}^M k \cdot \text{Prob}(K=k) \quad (13)$$

4 数字仿真结果

本文通过数字仿真来评价提出的最优中继选择策略的性能。由于源节点不太可能大量探测中继节点, 所以设定中继节点的数量 $M=10$ 。探测时隙 τ 和帧长 T 之比 τ/T 分别为 0.01 或 0.03, 其他参数分别为 $\pi=0.4, G=\frac{\lambda \sigma^2 I_{th}}{\sigma^2}=5, \lambda=1$ 或 $\lambda=5$ 。

图 2 展示了本文提出的最优选择策略的信噪比阈值规则, 可以看到数值仿真结果与理论分析值很好地匹配在了一起, 而且信噪比阈值随着探测阶段 k 的增加而单调递减, 这是因为随着可供探测的中继数量减少, 预计得到的期望收益将减少, 相应的阈值也会下降。从图 2 还可以看出, 阈值主要由信道参数决定, 而探测时隙长度 τ 有少许影响。 λ 越大, 反映了平均信噪比越小, 信道状况越差, 所

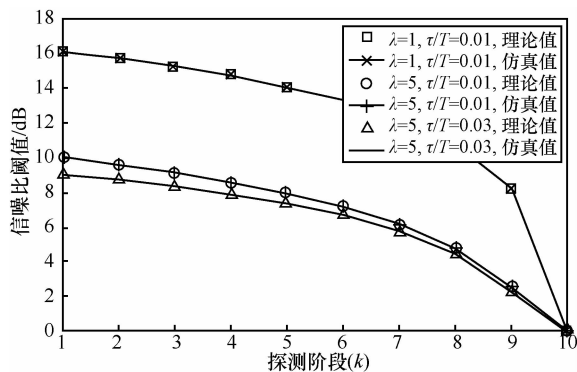


图2 最优中继选择策略的信噪比阈值

以阈值越小。探测时隙 τ 越大,探测成本较高,所以相应的阈值也会降低。

图3展示了源节点在不同的可供选择的中继个数下对应的期望收益。取定参数 $\lambda=1, \tau/T=0.01$,把提议的最优中继选择策略与最大收益准则进行了比较。从中可以看出,本文的方法差于从全部 M 个中继节点中选取最大收益的方法。为公平起见,与从前 $[E(K)]$ 中选取最大收益的情形进行了比较,最优中继选择策略优胜于该情形。从图5可以看到,本文的最优中继选择策略是3种方法中平均探测次数最少的。图4中,固定 $\lambda=1$,不变, τ/T 取为0.03,即增大单个中继探测成本。从图4中可以看出,最优中继选择策略是最优的,特别是当中继节点数 M 较大时,从全部 M 个中继节点中选取最大收益的方法由于整个探测成本 $M\tau$ 的增加,使得性能急剧退化。并且与从前 $[E(K)]$ 中选取最大收益的情形进行比较发现,性能差异也进一步扩大。

对于探测成本对最优中继选择策略的影响,从图3和图4的绝对收益数值可以看出,随着 τ 的增大,期望收

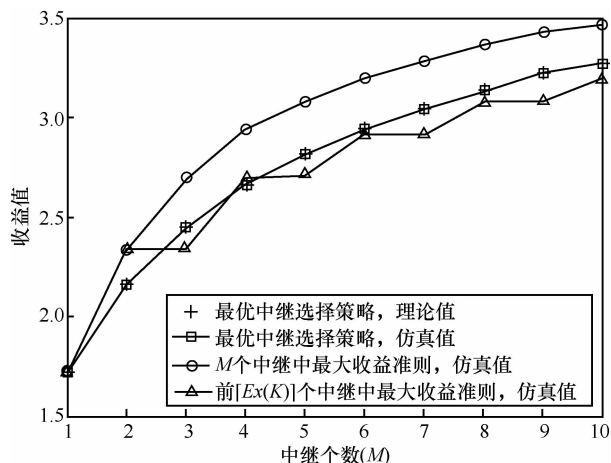
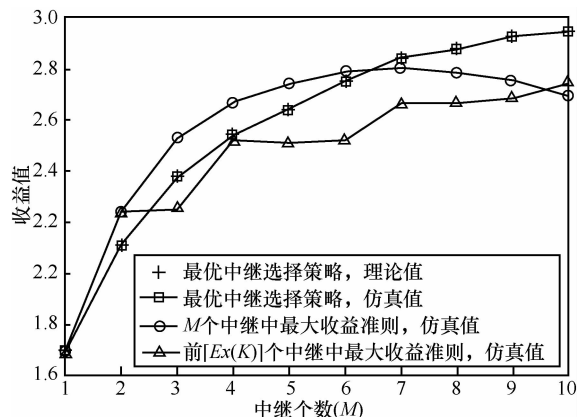


图3 源节点的期望收益

图4 源节点的期望收益, $\lambda=1, \tau/T=0.03$

益减少,说明高成本导致低收益。而且从图5中可以看出,为了平衡总的探测成本支出, τ 的增大会促使平均探测次数减少。

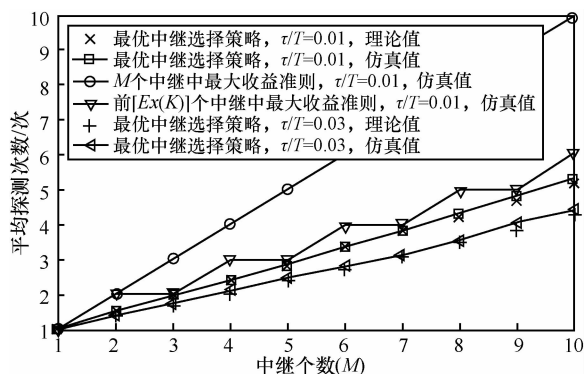


图5 平均探测次数

5 结束语

本文针对认知合作中继网络,基于最优停止理论,提出了最优中继选择策略。该策略可以以最少中继探测次数寻找到最好的合作中继节点帮助源节点传输数据。而且该策略是一个简单的信噪比阈值结构,在实际使用中容易执行,从而可以进一步节省移动终端的电池能量。数值仿真结果验证了理论分析结果,与最大收益准则相比较,在待探测中继较多和每个中继探测成本较高情况下,本文提出的最优中继选择策略是最优的,它以最少的探测次数获得最大的收益增益。

参考文献

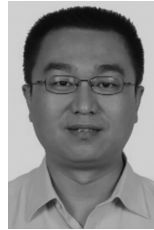
- Lin Z, Erkip E, Stefanov A. Cooperative regions and partner choice in coded cooperative systems. IEEE Transactions on Communications, 2006,54(7):1323~1334

- 2 Ibrahim A S, Sadek A K, Su W, *et al.* Cooperative communications with relay-selection: when to cooperate and whom to cooperate with. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(7):2814~2827
- 3 Chen Y, Cheng P, Qiu P, *et al.* Optimal partner selection strategies in wireless cooperative networks with fixed and variable transmit power. *Proceedings of 2007 Wireless Communications and Networking Conference*, Hong Kong, China, 2007: 4080~4084
- 4 Mahinthan V, Cai L, Mark J W, *et al.* Partner selection based on optimal power allocation in cooperative-diversity systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(1): 511~520
- 5 Wang B, Han Z, Liu K R. Distributed relay selection and power control for multiuser cooperative communication networks using buyer/seller game. *Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007)*, Anchorage, AK, USA, 2007:544~552
- 6 Ferguson T S. Optimal stopping and applications. <http://www.math.ucla.edu/~tom/Stopping/Contents.html>, 2012
- 7 Zheng D, Ge W, Zhang J. Distributed opportunistic scheduling for ad hoc networks with random access: an optimal stopping approach. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, 55(1): 205~222
- 8 Zhang Z, Jiang H. Distributed opportunistic channel access in wireless relay networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(9): 1675~1683
- 9 Zhang M, Chen X, Zhang J. Social-aware relay selection for cooperative networking: an optimal stopping approach. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC 2014)*, Sydney, Australia, 2014: 2257~2262
- 10 Guo Y, Kang G, Zhang N, *et al.* Outage performance of relay-assisted cognitive-radio system under spectrum-sharing constraints. *Electronics Letters*, 2010, 46(2):182~184

[作者简介]



刘银山,男,清华大学电子工程系博士生,空军大连通信士官学校无线电导航系讲师,主要研究方向为移动蜂窝网络技术、自组织与合作通信技术(激励机制设计、中继选择)、绿色通信、认知无线电技术和多网络共存技术等。



钟晓峰,男,博士,清华大学电子工程系副研究员,主要研究方向为无线网络技术,包括 4G/5G 移动通信系统、分布式无线通信系统、无线自组织与协作传输网络等。作为课题负责人承担“973”计划、国家科技重大专项等 7 项国家课题及相关部委课题等。在无线网络的传输、接入协议,业务特征等方面开展了深入的研究,提出了多个创新算法。已发表(录用)论文 40 余篇,申请专利 11 项。



王京,男,清华大学博士生导师,清华信息科学与技术国家实验室副主任,清华大学信息技术研究院无线与移动通信技术研究中心主任、微波与数字通信国家重点实验室副主任兼无线传输与个人通信研究室主任,中国第三代移动通信研究开发项目(C3G)总体组成员,第三代移动通信技术实验(3G-TEG)专家组专家,国家“十五”“863”计划“未来移动通信(FUTURE)”项目总体组专家,中国电子学会高级会员,中国通信学会无线及移动通信委员会委员;主要研究方向为无线移动通信和宽带无线传输技术,包括 B3G/4G 移动通信、WCDMA、TD-SCDMA 系统研究,调制解调技术、纠错编译码技术、移动通信抗衰落技术、MIMO 与时空联合数字信号处理技术、分布式无线通信系统等。