

文章编号: 1001-9081(2013)08-2121-03

doi: 10.11772/j.issn.1001-9081.2013.08.2121

多跳协作分集系统的中断性能

唐菁敏*, 曹金石, 龙华, 张春平

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 昆明 650500)

(*通信作者电子邮箱 tang_min213@163.com)

摘要: 推导了在高信噪比条件下解码转发(DF)多跳分集网络的中断概率近似表达式和分集度; 针对解码转发多跳分集系统不能提供空间满分集这一缺点, 提出改进的选择性解码转发(SDF)算法, 当中继节点不能正确解码信息时, 将由源节点重新发送信息; 相应地推导了在高信噪比条件下SDF多跳分集系统中断概率表达式及分集度。通过理论分析及仿真结果表明, SDF能有效改善协作分集系统的传输性能, 且能获得空间满分集增益。

关键词: 协作分集; 解码转发; 选择性解码转发; 中断概率; 分集度

中图分类号: TN929.53 文献标志码:A

Outage performance of multi-hop cooperative diversity system

TANG Jingmin*, CAO Jinshi, LONG Hua, ZHANG Chunpin

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunan 650500, China)

Abstract: An approximate outage probability formulation and diversity order were derived for multi-hop diversity system employing Decode-and-Forward (DF) relaying in high Signal-to-Noise Ratio (SNR). And a modified multi-hop Selective Decode-and-Forward (SDF) protocol was proposed to overcome the limitation of space full diversity system unemploying DF relaying, the source node resended the information when the relay could not decode information correctly. An approximate outage probability formulation and diversity order were deduced for SDF protocol in high SNR. The theoretical analysis and simulation results show that the SDF protocol can improve transmission performance and achieve the full space diversity contrasted with DF protocol.

Key words: cooperative diversity; Decode-and-Forward (DF); Selective Decode-and-Forward (SDF); outage probability; diversity order

0 引言

由于无线信道易受衰落、噪声等因素的影响, 协作分集技术充分利用了无线通信的广播特性, 通过多个用户之间相互协作, 从而构成一个虚拟天线阵列来获取较高的空间分集增益^[1-5]。针对源端距离目的端距较远的情况, 采用单跳根本不能将源端信息正确地传输到目的端, 因此需要采用多跳进行信息传输, 以此扩大传输覆盖范围来解决上述问题, 这也是现今无线通信领域内的研究热点^[6-11]。文献[7]利用了无线信道的广播特性, 克服了串联模型和并联模型的缺点, 提出了一种协作分集系统模型。文献[8]提出了一种不依赖信道状态信息, 利用无线网络的广播特性, 使系统中的节点缓存其前面节点发送的信号, 并将接收到的信号进行最大比合并获得额外增益的多跳协作机制。文献[9]提出了一种改进的解码转发多跳中继系统, 克服了多跳信道的终端性能差而且节点接收设备上的多跳分集信道较为复杂的缺点。文献[10]提出在多跳分集中存在节点接收数目受限且高信噪比情况下多跳分集可实现协作分集以提高通信性能。文献[11]针对重叠共享(Underlay Sharing, US)方式下的多跳解码转发(Decode-and-Forward, DF)协作分集感知网络进行了性能分析, 在高信噪比条件下, 虽然多跳DF协作分集感知系统不能获得空间分集增益, 但随着跳数的增加, 感知系统中断性能有

所改善。针对传统DF方式的缺点, 文献[12-13]提出了改进的选择性解码转发(Selective Decode-and-Forward, SDF)协议, 能提高系统分集增益, 改善系统性能。

本文主要研究了多跳协作分集系统的传输性能。针对DF多跳分集系统不能获得空间分集增益的缺点, 提出改进的多跳SDF算法, 并推导了SDF认知系统中断概率表达式及分集增益。理论和仿真表明, SDF性能对比DF有了明显改善, 且SDF能获得空间满分集。

1 系统模型

如图1所示, 考虑一个K跳分集系统, 共有K-1个中继节点 $\{S_1, S_2, \dots, S_{K-1}\}$ 协助认知源节点 S_0 传输信息至目的节点 S_K , 且源节点、中继节点和目的节点都是半双工的, 即各节点不能同时发送和接收同一频率信息。假设整个系统所有的信道均为窄带频率非选择性的慢衰落信道, 信道衰落系数 $h_{n,l}$ 均服从均值为0, 方差为 $\lambda_{n,l}$ 的独立、循环对称的复高斯随机分布。将整个协同通信过程分成K个阶段完成, 所有的用户都通过正交信道来发送信息。在多跳通信系统中, 存在一个中心控制节点, 通过反馈信道可以将所有的信道信息都反馈给源节点和相应的中继节点。

在m阶段($m = 1, 2, \dots, K$), 由节点 S_{m-1} 发射信号 x_{m-1} , 而节点 S_m, S_{m+1}, \dots, S_K 的接收信号可表示为

收稿日期: 2013-03-05; 修回日期: 2013-05-08。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60872157); 云南省社会发展科技计划项目(2009CA027); 云南省科技厅应用基础研究计划项目(2009ZC016X, 2011FB035); 云南省人才培养项目(KKSY201203029)。

作者简介: 唐菁敏(1979-), 男, 湖南益阳人, 讲师, 博士, 主要研究方向: 协同通信、认知无线电; 曹金石(1987-), 男, 云南丽江人, 硕士研究生, 主要研究方向: 协同通信; 龙华(1963-), 女, 云南大理人, 教授, 主要研究方向: 无线传感网; 张春平(1988-), 男, 湖南益阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 认知无线电。

$$y_j^{(m-1)} = \sqrt{P_{m-1}} h_{m-1,j} x_{m-1} + n_{m-1,j}; j = m, m+1, \dots, K \quad (1)$$

其中: $y_j^{(m-1)}$ 表示在节点 S_j 接收到的来自于节点 S_{m-1} 的信号, P_{m-1} 表示节点 S_{m-1} 的发射功率, $h_{m-1,j}$ 表示节点 S_{m-1} 与 S_j 之间的信道衰落系数, x_{m-1} 表示节点 S_{m-1} 的发射信号, $n_{m-1,j}$ 为功率为 N_0 的加性高斯白噪声。节点 S_j 通过对之前 j 个阶段中由节点 S_0, S_1, \dots, S_{j-1} 传送过来的信号运用最大比合并方式进行处理。

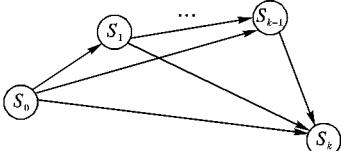


图 1 多跳协作分集系统模型

2 DF 多跳协作分集系统中断性能分析

节点 S_j 接收来自节点 S_k 信号的瞬时信噪比为

$$\gamma_{k,j} = \frac{P_k |h_{k,j}|^2}{\sigma_n^2} = \frac{\varepsilon_k P |h_{k,j}|^2}{\sigma_n^2}; k = 0, 1, \dots, j-1 \quad (2)$$

其中: P 为整个网络发射总功率, ε_k 为 S_k 发射功率占系统总发射功率的比重。节点 S_j 对不同阶段所接收到的信号采用最大比合并, 因此 S_j 接收到的瞬时信噪比可表示为

$$\gamma_j = \sum_{k=0}^{j-1} \gamma_{k,j} \quad (3)$$

节点 S_j 的最大平均互信息为

$$I_j = \frac{1}{K} \log(1 + \gamma_j) \quad (4)$$

中断事件发生在多跳路径中任何一个中继节点不能正确解码的情况下, 若设 $P_{out,j}$ 为节点 S_j 发生中断的概率, 则多跳分集系统总的中断概率为

$$P_{out,DF} = 1 - \prod_{j=1}^K (1 - P_{out,j}) \quad (5)$$

节点 S_j 的中断概率为

$$P_{out,j} = \Pr(I_j \leq R) = \Pr\left(\sum_{k=0}^{j-1} \gamma_{k,j} \leq 2^{KR} - 1\right) = \Pr\left(\sum_{k=0}^{j-1} g_{k,j} \leq \zeta\right) \quad (6)$$

其中: $g_{k,j} = \varepsilon_k |h_{k,j}|^2$; $\zeta = (2^{KR} - 1)/\bar{\gamma}$, $\bar{\gamma} = P/\sigma_n^2$ 。

定理 1 在高信噪比 ($\gamma \rightarrow \infty$) 条件下, 多跳 DF 分集系统的中断概率

$$P_{out,DF} \cong \sum_{j=1}^K \frac{\zeta^j}{j!} \prod_{k=0}^{j-1} \frac{1}{\varepsilon_k \lambda_{k,j}} \quad (7)$$

定理 1 的证明可参考文献[11]。

根据式(7)可见, 当 $\zeta \rightarrow 0$ 时, 第一项 ($j = 1$) 占据主导地位, 求和公式中其他各项可以认为是 ζ 的高阶无穷小量, 因此 DF 多跳分集系统的分集度 $d = 1$ 。

3 改进的 SDF 中断性能分析

针对 DF 在中继不能正确解码就不能起到协同作用这一缺点, 提出了 SDF 协议^[12-13]: SDF 协议采用了设定门限来解决 DF 内在的问题, 若中继能够顺利解码, 就采用中继转发的方式进行通信, 否则采用源节点直接传输的方式。

若源到中继链路的信噪比超过了门限则成功解码源信号的可能性很大, 目的端最大比合并的信号的信噪比是从源端到中继接收信号的信噪比之和, SDF 的互信息量^[12] 表示如下:

$$I_{SDF} = \begin{cases} \frac{1}{2} \log(1 + 2SNR |\partial_{s,d}|^2), & |\partial_{s,r}|^2 < g(SNR) \\ \frac{1}{2} \log(1 + SNR [|\partial_{s,d}|^2 + |\partial_{r,d}|^2]), & |\partial_{s,r}|^2 \geq g(SNR) \end{cases} \quad (8)$$

其中: $SNR = P/\sigma_n^2$, $g(SNR) = [2^{2R} - 1]/SNR$ 。

根据式(8)中利用全概率公式, SDF 的中断概率为

$$\Pr[I_{SDF} < R] = \Pr[|\partial_{s,r}|^2 < g(SNR)] \\ \begin{cases} \Pr[2|\partial_{s,d}|^2 < g(SNR)] + \Pr[|\partial_{s,r}|^2 \geq g(SNR)] \\ \Pr[|\partial_{s,d}|^2 < g(SNR)] \end{cases} \quad (9)$$

在式(9)中源端可以获得分集阶数 2, SDF 在分集为 2 时可以使中断发生即源到中继信道或者源到目的端中断。

在多跳分集系统中, 在 SDF 方式下目的节点 S_k 的中断事件可等效为

$$\bigcup_{i=0}^{K-1} (\hat{I}_i \leq R) \quad (10)$$

其中 \hat{I}_i 表示有 i 个中继能正确解码信号时, 目的节点 S_k 所能得到的最大平均互信息, 即

$$\hat{I}_i = \frac{1}{K} \log \left[1 + (K-i)\gamma_{0,K} + \sum_{j \in \psi_i} \gamma_{j,K} \right] \quad (11)$$

其中: ψ_i 表示有 i 个能正确解码信号的中继集合, $\gamma_{m,n}$ 为节点 S_m 接收到来自 S_n 信号的信噪比。根据式(10)和(11), K 跳 SDF 协作分集系统的中断概率可表示为

$$P_{out,SDF} = \sum_{i=0}^{K-1} \Pr(\hat{I}_i \leq R) = \sum_{i=0}^{K-1} \Pr((K-i)\gamma_{0,K} + \sum_{j \in \psi_i} \gamma_{j,K} \leq 2^{KR} - 1) = \sum_{i=0}^{K-1} \Pr((K-i)g_{0,K} + \sum_{j \in \psi_i} g_{j,K} \leq \zeta) \quad (12)$$

其中

$$\Pr((K-i)g_{0,K} + \sum_{j \in \psi_i} g_{j,K} \leq \zeta) = \sum_{\psi_i} \Pr((K-i)g_{0,K} + \sum_{j \in \psi_i} g_{j,K} \leq \zeta | \psi_i) \Pr(\psi_i) \quad (13)$$

其中: $\Pr(\psi_i)$ 表示中继集合为 ψ_i 时的概率, 求和公式中第一项为中继集合为 ψ_i 时的中断概率, 可表示为

$$\Pr((K-i)g_{0,K} + \sum_{j \in \psi_i} g_{j,K} \leq \zeta | \psi_i) = \frac{\zeta}{K-i} \int_0^1 \Pr\left(\sum_{j \in \psi_i} g_{j,K} \leq \zeta x | \psi_i\right) f_{g_{0,K}}\left(\frac{\zeta(1-x)}{K-i}\right) dx \quad (14)$$

其中 $x = 1 - (K-i)g_{0,K}/\zeta$ 。根据文献[11], 在高信噪比条件下,

$$\Pr\left(\sum_{j \in \psi_i} g_{j,K} \leq \zeta x | \psi_i\right) \cong \frac{(\zeta x)^i}{i!} \prod_{j \in \psi_i} \frac{1}{\varepsilon_j \lambda_{j,K}} \quad (15)$$

而

$$\lim_{\zeta \rightarrow 0} f_{g_{0,K}}\left(\frac{\zeta(1-x)}{K-i}\right) = \frac{1}{\varepsilon_0 \lambda_{0,K}} \quad (16)$$

将式(15)和(16)代入式(14), 可得在高信噪比条件下, 中继集合为 ψ_i 时的中断概率的近似表达式, 即

$$\Pr((K-i)X_{0,K} + \sum_{j \in \psi_i} X_{j,K} \leq \zeta | \psi_i) \cong \frac{\zeta^{i+1}}{\varepsilon_0 \lambda_{0,K} (K-i)(i+1)!} \prod_{j \in \psi_i} \frac{1}{\varepsilon_j \lambda_{j,K}} \quad (17)$$

下一步将计算中继集合为 ψ_i 时的概率 $\Pr(\psi_i)$ 。假设中继节点 S_k ($k = 1, 2, \dots, K-1$) 参与协作, 那么它必须要能对

前 k 阶段所接收到的信息正确解码,而能否正确解码信号主要取决于此中继节点与它之前的所有节点信道传输特性,则中继节点 S_k 能否参与协作的概率可表示为

$$\theta_{k,i} = \begin{cases} \Pr \left(\sum_{l=0}^{k-1} \xi_l g_{l,k} > \zeta \right), & S_k \in \psi_i \\ \Pr \left(\sum_{l=0}^{k-1} \xi_l g_{l,k} \leq \zeta \right), & S_k \notin \psi_i \end{cases} \quad (18)$$

其中: $\xi_l \in \{0,1\}$ ($l = 1, 2, \dots, k-1$)表示协作节点 S_l 当前状态。 $\xi_l = 1$ 表示节点 S_l 能正确解码信号,因此 S_l 能参与协作,并在第 $l+1$ 阶段 S_l 转发信号;而 $\xi_l = 0$ 表示 S_l 不能正确解码信号,则在第 $l+1$ 阶段 S_l 保持静默,而由源节点 S_0 继续传输信号。 $\xi_0 = k - \sum_{l=1}^{k-1} \xi_l$ 表示在前 k 阶段源节点直接发送信号的次数。在瑞利信道条件下,式(18)可变为

$$\theta_{k,i} = \begin{cases} 1 - \frac{\zeta^{\sum_{l=1}^{k-1} \xi_l + 1}}{\varepsilon_0 \lambda_{0,k} \xi_0 \left(\sum_{l=1}^{k-1} \xi_l + 1 \right)!} \prod_{l \in \psi_i} \frac{1}{\varepsilon_l \lambda_{l,k}}, & S_k \in \psi_i \\ \frac{\zeta^{\sum_{l=1}^{k-1} \xi_l + 1}}{\varepsilon_0 \lambda_{0,k} \xi_0 \left(\sum_{l=1}^{k-1} \xi_l + 1 \right)!} \prod_{l \in \psi_i} \frac{1}{\varepsilon_l \lambda_{l,k}}, & S_k \notin \psi_i \end{cases} \quad (19)$$

概率 $\Pr(\psi_i)$ 可表示为各个中继节点所处状态概率的乘积,即

$$\Pr(\psi_i) = \prod_{k=1}^{K-1} \theta_{k,i} \quad (20)$$

将式(17)和(20)代入式(12)和(13),可得如下结论:

在高信噪比($\gamma \rightarrow \infty$)条件下多跳中继系统的中断概率近似为

$$P_{\text{out,SDF}} \cong \sum_{i=0}^{K-1} \frac{\zeta^{i+1}}{\varepsilon_0 \lambda_{0,K} (K-i)(i+1)!} \sum_{\psi_i} \prod_{j \in \psi_i} \frac{1}{\varepsilon_j \lambda_{j,K}} \prod_{k=1}^{K-1} \theta_{k,i} \quad (21)$$

根据式(21),设多跳SDF认知系统中断概率 $P_{\text{out,SDF}}(\bar{\gamma}) \cong \sum_{i=0}^{K-1} P_{\text{out,SDF}}(\bar{\gamma}, i)$,其中:

$$P_{\text{out,SDF}}(\bar{\gamma}, i) = \frac{\zeta^{i+1}}{\varepsilon_0 \lambda_{0,K} (K-i)(i+1)!} \sum_{\psi_i} \prod_{j \in \psi_i} \frac{1}{\varepsilon_j \lambda_{j,K}} \prod_{k=1}^{K-1} \theta_{k,i} \quad (22)$$

当 $i = 0$ 时,集合 ψ_i 有且仅有1种组合方式,即所有中继均不参与协作,此时 $P_{\text{out,SDF}}(\bar{\gamma}, 0)$ 与 ζ^K 成正比;而当 $i \neq 0$ 时,集合 ψ_i 有 C_{K-1}^i 种组合方式, $P_{\text{out,SDF}}(\bar{\gamma}, i)$ 为 C_{K-1}^i 项函数之和,且各项函数都是 ζ 的高阶次(阶数大于 K)。然而当 $\bar{\gamma} \rightarrow \infty$ 时, $\zeta \rightarrow 0$,则在求和公式中 ζ 阶数最小的项将起主导作用,其他的各项可近似认为是变量 ζ 的高阶无穷小量,而根据式(22),可知 ζ 阶数最小的情况出现在所有中继都不能正确解码的情况下,此时所得到的中断概率近似表达式将与 ζ^K 成正比,因此可得出如下SDF协作分集系统的分集度:

$$d_{\text{SDF}} = -\lim_{\gamma \rightarrow \infty} \frac{\log P_{\text{out,SDF}}(\bar{\gamma})}{\log \gamma} = -\lim_{\gamma \rightarrow \infty} \frac{\log P_{\text{out,DF}}(\bar{\gamma}, 0)}{\log \gamma} = K \quad (23)$$

因为DF的性能很大程度是依赖于源—中继端信道的传输特性,SDF和DF相比,分集度高,性能更好,但是复杂度和

开销都有所提高。

4 仿真结果及分析

仿真条件设置如下:信源采用二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying,BPSK)调制,能正确解码信号所需的数据传输速率 $R = 1$ bit/s,各协作节点间的信道均为瑞利信道,信道衰落系数 h_i 的总方差 $\lambda = 5$,各信道相互独立,其衰落系数的方差依次为 $\lambda_{n,l} = \lambda / |n - 1|$ 。

图2给出了在不同平均信噪比条件下,且当 $\varepsilon_0 = \varepsilon_1 = 0.5$ 时,两跳SDF协作分集模型的中断概率性能仿真结果与理论结果的比较。由图2可见,推导的高信噪比条件下DF多跳分集网络的中断概率近似表达式在两跳模型中与仿真结果相近。将该仿真推广到三跳等功率协作分集系统后,且 $\varepsilon_0 = \varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 1/3$,其仿真结果如图3所示。由图3可见,在高信噪比条件下,理论曲线与仿真曲线相近且斜率一致,充分验证了所推导出的中断概率近似表达式在实际通信环境中信噪比达到一定值之后,完全可以对实际情况的中断概率进行估测。对图2及图3中的纵坐标取对数坐标后,可以发现两跳和三跳曲线的下降斜率为 $K/10$,从而验证了式(17)中SDF多跳协作分集系统的分集度为 K 的结论。

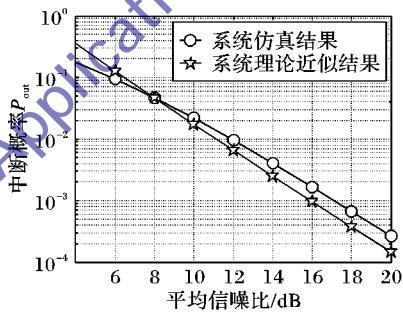


图2 两跳SDF分集系统中断性能

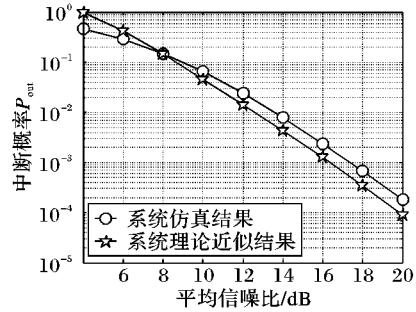


图3 三跳SDF分集系统中断性能

由图4可见,采用SDF方式的多跳协作分集系统中断性能比采用DF方式的有了很明显的改善。当系统中断概率为 10^{-1} 时,三跳SDF协作分集系统信噪比对比三跳DF大概有了7 dB的改善,而两跳SDF协作分集系统信噪比对比DF有了约4.5 dB的改善。

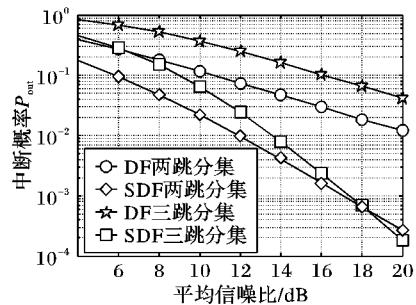


图4 DF和SDF中断性能比较

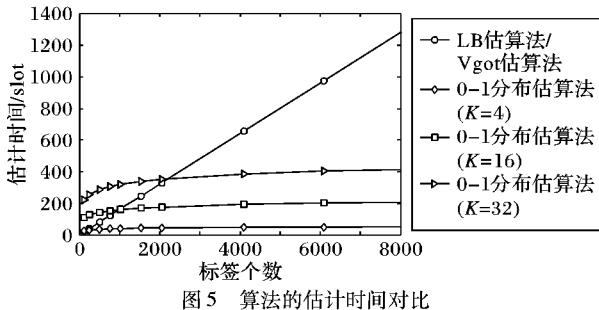


图5 算法的估计时间对比

4 结语

本文提出的基于0-1分布特性的标签估计算法的估计时间为 $O(K \text{lb}(n))$ 。在大规模RFID系统中,与之前的Vgot等估计算法相比,其估计时间明显减少,同时估计误差相对稳定。仿真结果表明,当 $K = 32$ 时,估计误差约为13%,低于文献[8]中得出的32个hash函数LoF的理论误差13.9%。由于本文的估计算法基于文献[9]中的基本硬件结构,不需要对现有的标签做特殊的修改就能实现相对精确的估计,其在实现上优于LoF,更适用于普通的低成本无源标签。对于多阅读器的情况,本文算法依然适用,在此不作讨论。

参考文献:

- [1] QIAN C, NGAN H, LIU Y H. Cardinality estimation for large-scale RFID systems [C]// PERCOM '08: Proceedings of the 2008 Sixth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 30–39.
- [2] 王雪,钱志鸿,胡正超,等.基于二叉树的RFID防碰撞算法的研究[J].通信学报,2010,31(6): 49–57.
- [3] 孙文胜,胡玲敏.基于后退式搜索的自适应多叉树防碰撞算法[J].计算机应用,2011,31(8): 2052–2055.
- [4] EOM J - B , LEE T - J . Accurate tag estimation for dynamic framed-slotted ALOHA in RFID systems [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(1): 10 – 12.

(上接第2123页)

5 结语

由于多跳DF方式中只要有一个中继不能正确解码将导致整个链路系统性能下降,且不能获得分集增益。针对这一缺点,推导了多跳SDF分集系统在高信噪比条件下中断概率近似表达式。通过仿真对比,发现采用SDF方式能获得空间满分集度,系统性能比DF有了很大的提升。

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] LIN Y, HASNA M O, ALOUNI M-S. Average outage duration of multihop communication systems with regenerative relays[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(4): 1366–1371.
- [3] SEDDIK K G, SADEK A K, SU W F, et al. Outage analysis of multi-node amplify-and-forward relay networks [C]// WCNC 2006: Proceedings of IEEE 2006 Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE, 2006, 2: 1184–1188.
- [4] 唐菁敏,罗涛,乐光新.基于中继选择的认知系统性能[J].北京邮电大学学报,2011,34(3): 44–47.
- [5] 唐菁敏,罗涛,乐光新.感知系统中最优感测时间和功率分配[J].北京邮电大学学报,2011,34(4): 89–92.
- [6] LEE I-H, KIM D. Spatial channel reuse in multi-hop decode-and-forward relaying systems in high path loss environments [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(7): 990–993.

- [7] BOYER J, FALCONER D D, YANIKOMEROGLU H. Multihop diversity in wireless relaying channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(10): 1820–1830.
- [8] 李云,张正华,赵为粮.无线网络中的多跳协作机制[J].计算机应用研究,2012,29(1): 234–236.
- [9] 杨洁,芮雄丽,曹雪虹.改进的解码转发多跳中继系统及最优功率分配[J].计算机工程,2013,39(3): 82–86.
- [10] 陈兴阳,张林,山秀明,等.节点接收数目受限的多跳分集方法[J].清华大学学报:自然科学版,2010,50(10): 1684–1689.
- [11] 唐菁敏,罗涛,龙华,等.重叠共享方式下多跳协作分集感知系统性能[J].北京邮电大学学报,2012, 35(2): 37–40.
- [12] LANEMAN J N, TSE G N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062–3080.
- [13] FARHADI G, BEAULIEU N C. Fixed relaying versus selective relaying in multi-hop diversity transmission system [J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(3): 956–965.
- [14] SU W, SADEK A K, LIU K J R. SER performance analysis and optimum power allocation for decode-and-forward cooperation protocol in wireless networks [C]// Proceedings of 2005 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE, 2005, 2: 984–989.
- [15] LANEMAN J N, WORNELL G W. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(10): 2414–2425.