

基于误码率的快速中继选择算法

孙琳,马社祥

(天津理工大学 计算机与通信工程学院,天津 300191)

(sunlin426@126.com)

摘要:针对协作网络中的中继选择算法的最优性与运算效率的矛盾问题,在放大转发(AF)协作网络中,提出一种基于误码率的快速中继选择算法。该算法先在等功率条件下,根据信道统计特性及系统误码率,引入一个等效信道增益参数,该参数反映了在协作通信过程中,源节点到中继节点以及中继节点到目的节点两个阶段的信道特性。然后将该参数降序排列,以当前信噪比(SNR)为门限,在等功率条件下选择中继节点集合,使系统的误码率最小。并结合次优功率分配,进一步降低系统的误码率。仿真结果表明,该算法能够取得和穷举算法相似的性能,但计算复杂度至少降低到穷举算法的1/20,且随着中继节点数的增加计算复杂度更进一步降低。同时,仿真结果还表明该中继选择算法的误码率性能优于所有中继节点参与转发(AP-AF)及预先选择一个最优中继节点转发数据(S-AF)算法。

关键词:协作分集;放大转发;中继选择;误码率;功率分配

中图分类号: TN929.5; TP393.03 **文献标志码:** A

Fast relay selection algorithm based on symbol error probability

SUN Lin, MA She-xiang

(School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China)

Abstract: Concerning the problem between the optimality and efficiency of the relay selection algorithm, an algorithm of the relay selection based on fast symbol error probability was proposed in Amplify-and-Forward (AF) cooperative networks. First, with the equal power allocation, and based on the statistic channel information and symbol error probability of the system, an equivalent channel gain was brought in. The parameter described the compositive channel character of two phases that were the source node to relay node as well as relay node to the destination in the cooperative process. Then with the descending order of the parameter, the Signal-to-Noise Ratio (SNR) could be taken as the threshold, and different relay node set was chosen to minimize the symbol error probability in case of equal power allocation. And combined with the near optimal power allocation, the proposed scheme further reduced the symbol error probability. As shown in the simulation results, the error probability performance of this relay selection scheme is similar to the optimal full-search scheme but the complexity is reduced to at least 1/20 of the latter one. And it also shows that the error probability of the proposed scheme is lower than the other schemes such as all participating amplify-and-forward (AP-AF) relay selection and pre-select single relay amplify-and-forward (S-AF) relay selection.

Key words: cooperative diversity; Amplify-and-Forward (AF); relay selection; symbol error probability; power allocation

0 引言

在实际的蜂窝移动通信系统中,移动终端由于受到体积、功耗和工艺等多方面的限制,不便于采用多天线技术。因此限制了多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)^[1]技术的应用。为了解决MIMO技术在移动终端的多天线制约问题,一种新的分集技术——协作分集^[2-3]技术被提出。它使得在多用户环境中,具有单根天线的移动台可以共享彼此的天线而产生一个虚拟MIMO系统。

协作分集的主要模式^[4]有:放大中继(Amplify-and-Forward, AF)模式、解码中继(Decode-and-Forward, DF)模式、编码协作(Coded Cooperation, CC)模式。无论采用哪种协作分集方法,源节点的潜在合作伙伴可能不止一个,如何从众多潜在中继节点中选择最佳中继,这就是中继选择的问题。Bletsas等人^[4]提出一种基于瞬时信道信息选择单个中继节

点进行转发的中继选择的方法;覃琴等人^[5]也给出了基于瞬时信道状态的中继选择算法;吴素文等人^[6]从中断概率的角度研究了统计信道下的中继选择算法;Zhao等人^[7]基于瞬时信道信息,并结合功率分配,提出了一种最优的中继选择方法。这些算法需要对信道的准确估计和即时反馈,增加了协作的开销。Ribeiro等人^[8]给出了在放大转发协作网络中的误码率分析;Zhang等人^[9]分析了在放大转发网络中的误码率及其功率分配。

本文从最小化误码率的角度出发,分析了在AF网络中,基于信道统计特性的中继选择方案,该方案使得系统的误码率最小。并将该方案与次优功率分配(Near optimal Power Allocation, NPA)^[10]相结合,能够进一步降低系统的误码率。

1 系统模型

考虑由一个源节点 s ,一个目的节点 d 和 N 个中继节点组

收稿日期:2010-09-06;修回日期:2010-10-29。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60872064)。

作者简介:孙琳(1986-),女,山东聊城人,硕士研究生,主要研究方向:无线协作通信;马社祥(1962-),男,甘肃庆阳人,副教授,博士,主要研究方向:图像处理、通信信号处理。

成的系统,如图1。所有节点均为单天线终端,满足半双工限制,即在同一频段不能同时收发。假设协作传输采用时分多址模式,即每个节点传输需要一个时隙。各条传输信道满足平坦衰落并统计独立。此外假设接收端能获得信道状态信息。

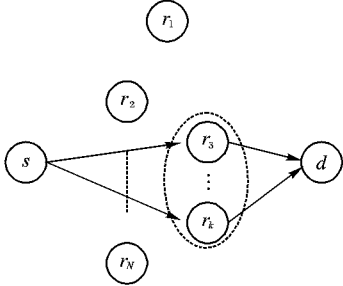


图1 系统模型

首先假设从 N 个中继节点中选择 M 个节点构成集合 Φ_M ,然后利用选择出来的节点进行中继。整个中继过程包括两个阶段:第一阶段,源节点发送信号,目的节点和 Φ_M 中的中继节点接收信号;第二阶段,每个被选中的中继节点分别在一个时隙中放大并转发自己接收到的信号给目的节点,目的节点采用最大比合并的方式,对两个阶段接收到的信号进行合并。

在第一阶段中,目的节点和中继节点 r_i 接收到的信号分别为:

$$\begin{aligned} y_{s,d} &= fx + n_{s,d} \\ y_{s,i} &= g_i x + n_{s,i}; i \in \Phi_M \end{aligned} \quad (1)$$

其中: x 为源发射的信号; f 和 g_i 分别表示源节点与目的节点和中继节点 r_i 之间的信道系数,服从零均值、方差为 σ_f^2 和 $\sigma_{g_i}^2$ 的复高斯分布; $n_{s,d}$ 和 $n_{s,i}$ 表示相应信道的加性高斯白噪声。

在第二阶段,目的节点接收到的来自中继节点 r_i 的信号为:

$$y_{i,d} = h_i A(g_i x + n_{s,i}) + n_{i,d} = h_i A g_i x + n_{R_i}; i \in \Phi_M \quad (2)$$

其中: $n_{R_i} = h_i A n_{s,i} + n_{i,d}$; A 是放大系数, $A = \sqrt{\frac{P_i}{P_s |g_i|^2 + N_0}}$; h_i 表示中继节点 r_i 与目的节点之间的信道系数,服从均值为零、方差为 $\sigma_{h_i}^2$ 的复高斯分布; $n_{i,d}$ 表示中继节点 r_i 与目的节点之间的信道的加性高斯白噪声。不失一般性,假设 $n_{s,d}$, $n_{s,i}$ 和 $n_{i,d}$ 均服从均值为零、方差为 N_0 的复高斯分布。 P_i 为中继节点的发射功率, P_s 为源节点的发射功率。

在放大转发协作网络中,接收端采用最大比合并得到的信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)为:

$$\gamma_d = \gamma_f + \sum_{i \in \Phi_M} \frac{\gamma_{g_i} \gamma_{h_i}}{\gamma_{g_i} + \gamma_{h_i} + 1} \quad (3)$$

其中 $\gamma_f = P_s |f|^2 / N_0$ 表示直传路径的信噪比, $\gamma_{g_i} = P_s |g_i|^2 / N_0$ 表示中继节点 r_i 的接收信噪比, $\gamma_{h_i} = P_i |h_i|^2 / N_0$ 表示目的节点接收的来自中继节点 r_i 的接收信噪比,其对应的概率密度函数分别表示为: $p_{\gamma_f}(\gamma_f)$ 、 $p_{\gamma_{g_i}}(\gamma_{g_i})$ 、 $p_{\gamma_{h_i}}(\gamma_{h_i})$ 及 $p_{\gamma_d}(\gamma_d)$ 。

在高信噪比下,可以忽略式(3)分母中的1,因此式(3)可以近似写成:

$$\gamma_d = \gamma_f + \sum_{i \in \Phi_M} \frac{\gamma_{g_i} \gamma_{h_i}}{\gamma_{g_i} + \gamma_{h_i}} \quad (4)$$

2 多协作网络的误码率分析

基于信噪比的误码率由公式 $P_e = Q(\sqrt{k\gamma_d})$ 给出^[8],其

中:常数 k 与调制方式有关,相移键控(Phase Shift Keying, PSK)下为2; $Q(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_x^\infty e^{-u^2/2} du$ ^[8]。

根据文献[8,11],在高信噪比的情况下,特别是,如果 $p_{\gamma_d}(\gamma_d)$ 的1阶到 $t-1$ 阶导数均为零,那么误码率的近似表达式如式(5):

$$P_e \rightarrow \frac{\prod_{i=1}^{t+1} (2i-1)}{2(t+1)k^{(t+1)}} \cdot \frac{1}{t!} \frac{\partial^t p_{\gamma_d}}{\partial \gamma_d^t}(0) \quad (5)$$

定理1^[8] 对于一个非负随机变量序列 $\{X\} = \{X_0, X_1, \dots, X_M\}$,它们的概率密度函数分别用 p_0, p_1, \dots, p_M 表示,当变量为零时,其概率密度函数值不为零,即 $p_0(0), p_1(0), \dots, p_M(0)$ 不为零。如果随机变量 V_M 满足:

$$V_M = \sum_{i=0}^M X_i \quad (6)$$

那么 V_M 的概率密度函数 p_{v_M} 的1阶到 $(M-1)$ 阶所有导数在零点时的值为零,而 M 阶导数:

$$\frac{\partial^M p_{v_M}}{\partial v^M}(0) = \prod_{i=0}^M p_i(0) \quad (7)$$

值得一提的是,这个结果适用于各种可能的分集策略,即使是在协作分集网络的范围之外,也是适用的。现在,把上述结论运用到多节点协作网络的信噪比中,则有:

$$\frac{\partial^M p_{\gamma_d}}{\partial \gamma_d^M}(0) = p_{\gamma_f}(0) \prod_{i=1}^M [p_{\gamma_{g_i}}(0) + p_{\gamma_{h_i}}(0)] \quad (8)$$

把式(8)代入式(6)中,得到多节点协作分集网络的误码率的渐近表达式:

$$P_e \approx \frac{C(M)}{k^{M+1}} p_{\gamma_f}(0) \prod_{i=1}^M [p_{\gamma_{g_i}}(0) + p_{\gamma_{h_i}}(0)] \quad (9)$$

其中 $C(M) = \frac{\prod_{i=1}^{M+1} (2i-1)}{2(M+1)!}$,是依赖于中继节点数 M 的一个常数,并随 M 的增加而增加。

在瑞利衰落信道下,误码率的近似表达式由文献[8]给出:

$$P_e(M) \approx \frac{C(M)}{k^{M+1}} \cdot \frac{1}{\gamma_f} \prod_{i \in \Phi_M} \left(\frac{1}{\gamma_{g_i}} + \frac{1}{\gamma_{h_i}} \right) \quad (10)$$

3 基于误码率的中继选择算法

传统的穷举算法(Full-search Algorithm)的基本思想是:首先对所有包含可能的 M 个中继节点的集合进行功率分配,并计算功率分配后的误码率;然后利用全局搜索的方法,找出误码率最小的集合,作为最优中继节点集合,在第二步中放大并转发数据。当系统中潜在的中继节点数目 N 很大时,穷举选择算法的复杂度很高,每次更新的计算量很大。为了减少每次选择的运算量,本文提出的改进算法先是在等功率条件下选择最优中继节点集合,然后在选择的中继节点和源节点之间进行次优功率分配。

首先从式(10)出发,定义中继节点 r_i 的等效信道增益(Equivalent Channel Gain, ECG):

$$\omega_k = \frac{1}{1/\sigma_{g_k}^2 + 1/\sigma_{h_k}^2} \quad (11)$$

令所有中继节点的 ω_k 按降序排列,即 $\omega_1 > \omega_2 > \dots >$

ω_N 。若选择的最优中继节点数目为 M , 则最优中继节点的集合为: $\Phi_M^{\text{opt}} = \{r_1, r_2, \dots, r_M\}$ 。设 $\gamma = 1/N_0$, 在等功率条件下, 即 $P_s = P_i = P$, 其平均误码率可以写为:

$$P_{e, \Phi_M^{\text{opt}}} = \frac{C(M)}{k^{M+1}} \frac{1}{(P\gamma)^{(M+1)}} \prod_{i=1}^M \left(\frac{1}{\sigma_{g_i'}^2} + \frac{1}{\sigma_{h_i'}^2} \right) \quad (12)$$

从误码率的角度分析, 假设所有的中继节点的等效信道增益值 ω_i 按降序排列, 那么在 N 个中继节点中选择 M 个中继节点的最优值为:

$$M_{\text{opt}} = \arg \max_M \{ \gamma_{eq, M} < \gamma \} \quad (13)$$

其中:

$$\gamma_{eq, M} = f(M)/P\omega_M \quad (14)$$

$$f(M) = \frac{C(M)/k^{M+1}}{C(M-1)/k^M} = \frac{2M+1}{(M+1)k} \quad (15)$$

则最优中继节点集为:

$$\Phi_{\text{opt}} = \{r_1, r_2, \dots, r_{M_{\text{opt}}}\} \quad (16)$$

算法的具体步骤如下:

1) 估计当前信道状况, 计算各节点的等效信道增益 ω_i 并按降序排列;

2) 根据式(14) 求出 $\gamma_{eq, M}$;

3) 根据式(13), 找出 M_{opt} 的值, 这时最优中继节点集合 $\Phi_{\text{opt}} = \{r_1, r_2, \dots, r_{M_{\text{opt}}}\}$;

4) 对选中的中继节点及源节点进行次优功率分配, 即将总功率的 $1/2$ 分配给源节点, 剩下的 $1/2$ 平均分配给各中继节点, 并将功率分配的结果通知给源节点和中继节点。

穷举算法的计算复杂度包括 2^N 次误码率计算和从 2^N 个值中选择最小值, 以及 2^N 次功率分配, 随着 N 的增加, 运算量迅速增加; 而改进算法只需要计算 N 个中继节点的等效信道增益并降序排列和一次次优功率分配。相对于穷举算法, 改进算法大大降低了运算复杂度。

4 仿真结果及性能分析

对于本文提出的中继选择算法, 在没有进行功率分配时, 称之为等功率分配 (Equal Power Relay Selection, EPRS) 算法; 在进行了功率分配以后, 称之为改进次优功率分配 (Near optimal Power Relay Selection, NPRS) 算法。在 Pentium Dual-Core CPU 及 Matlab 7.0 环境下进行仿真。仿真中, 系统采用二相相移键控 (Binary Phase Shift Keying, BPSK) 调制, $k = 2$ 。

第一组仿真 比较在等功率条件下, 选择不同中继节点时的误码率。各节点信道的统计特性如下: $\sigma_{g_1}^2 = 1.0$, $\sigma_{g_2}^2 = 0.3$, $\sigma_{g_3}^2 = 0.1$, $\sigma_{h_1}^2 = 1.0$, $\sigma_{h_2}^2 = 0.3$, $\sigma_{h_3}^2 = 0.1$, $\sigma_f^2 = 0.5$ 。各节点的功率 $P = 1$ 。功率限制满足: $P_s + \sum_{i \in \Phi_M} P_i = P_T$, P_T 为总功率。本文所述的 γ 就是图中的“SNR”。仿真结果如图2所示。

图2中“1个节点”表示选择第1个中继节点, “2个节点”表示选择第1和第2个中继节点; “3个节点”表示选择3个中继节点。从图中可以看出, 当 SNR 小于 7.5 dB 时, 选择一个中继的平均误码率最小; 当 SNR 在 7.5 dB 至 12.5 dB 之间时, 选择两个中继节点可获得最小误码率; 而当 SNR 大于 12.5 dB 时, 选择3个中继。与其他可能的选择中继节点集合相比, EPRS 算法始终得到的是最小平均误码率。

第二组仿真 比较等功率条件下, 改进算法与所有中继节点放大转发和选择一个最优节点转发方案的平均误码率性能, 如图3。在所有中继节点参与放大转发方式下, $M = N$ 。预先选择一个最优中继节点转发数据时, $M = 1$, 选择的最优节点为 ω_k 最大的节点。在这一组仿真中, 考虑协作网络中有6个潜在的中继节点, 给出的信道统计特性为: $\sigma_{g_1}^2 = 1.0$, $\sigma_{g_2}^2 = 0.8$, $\sigma_{g_3}^2 = 0.6$, $\sigma_{g_4}^2 = 0.3$, $\sigma_{g_5}^2 = 0.2$, $\sigma_{g_6}^2 = 0.1$, $\sigma_{h_1}^2 = 1.0$, $\sigma_{h_2}^2 = 0.8$, $\sigma_{h_3}^2 = 0.6$, $\sigma_{h_4}^2 = 0.3$, $\sigma_{h_5}^2 = 0.2$, $\sigma_{h_6}^2 = 0.1$, $\sigma_f^2 = 0.5$, 各节点的功率 $P = 1$ 。从图3可以看出, 改进算法的平均误码率性能一直处于最优状态, 在低信噪比时, 其性能与预先选择一个最优中继节点转发数据 (pre-select Single relay Amplify-and-Forward, S-AF) 算法接近, 因为此时改进算法选择的中继节点数较少; 而在高信噪比时, 性能与所有中继节点参与转发 (All participate Amplify-and-Forward, AP-AF) 算法相接近, 因为当信噪比足够高时, 选择的中继节点数可以达到 N (在此仿真中为6)。由此也可以看出, 改进算法的分集增益阶数可以达到 $N + 1$ 。

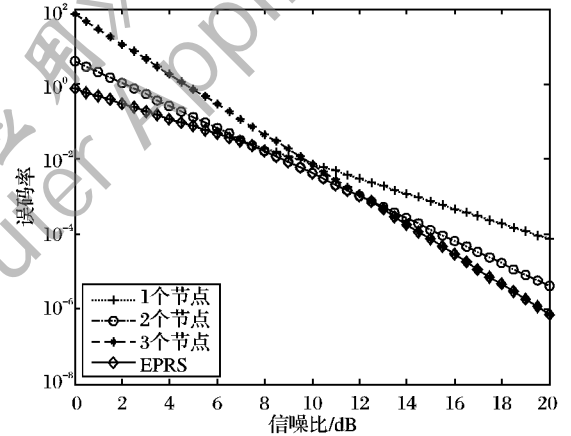


图2 3个中继节点网络中选择不同节点数与EPRS算法性能比较

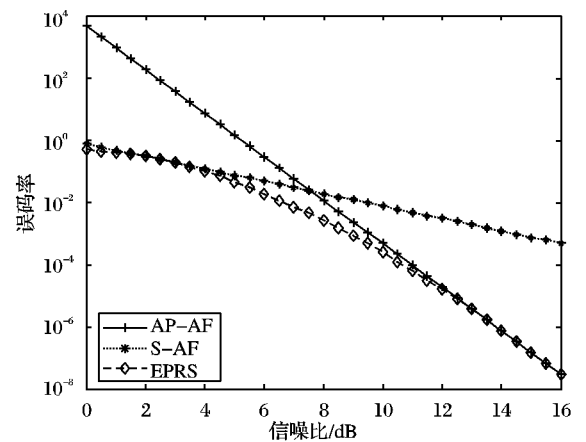


图3 EPRS算法与AP-AF及S-AF算法的性能比较

第三组仿真 比较等功率分配下 NPRS 算法、EPRS 算法及穷举算法 (Full-search Algorithm) 的平均误码率。各参数设置与第一组仿真相同, 仿真结果如图4所示。

从图4中可以看出, 改进算法与穷举选择算法性能相接近, 在平均误码率为 10^{-4} 时, NPRS 算法比 EPRS 算法有 0.5 dB 左右的性能提升, NPRS 算法与穷举算法相比只有 0.1 ~ 0.2 dB 的损失。由图4也可以看出, NPRS 算法的曲线在 12 ~ 13 dB 时有误码率的增加, 这是因为在等功率条件下

先选取了节点数为 3, 然后又进行功率分配; 而穷举算法直接在功率分配条件下选取最优节点数为 2, 虽然本文算法选取的节点并不是最优节点, 但却大大降低了算法复杂度。

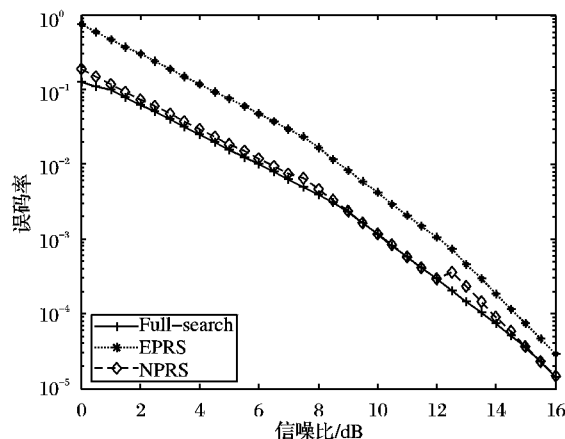


图 4 NPRS 算法与穷举算法及 EPRS 算法性能比较

表 1 本文算法与穷举算法的复杂度比较

N	穷举算法			本文算法		
	加法	乘法	比较	加法	乘法	比较
3	12	142	7	6	18	2
6	192	1786	63	11	31	4
8	1024	8962	255	15	43	6
10	5120	43002	1023	17	45	6

本文算法与穷举算法的复杂度比较见表 1。表 1 中的 N 代表系统中潜在的中继节点数。通过分析两种算法的运算次数, 可以从表 1 中看出, 随着 N 的增大, 穷举算法变得很复杂, 而 NPRS 算法的复杂度变化很小。可见, 本文提出的中继选择算法大大降低了算法的复杂度。

5 结语

协作分集能够有效对抗衰落, 增加信道容量, 提高数据传输的可靠性。中继选择是协作分集中一个热门的研究方向。本文从系统的平均误码率的角度, 提出了一种在放大转发协作网络中基于统计信道特性的快速中继选择方法。在 BPSK 调制下, 由该方法选出的中继节点集合较其他选择相同数目的中继节点集合得到的误码率小。分析和仿真结果表明, 该

算法的分集阶数最高能达到 $N+1$ (N 是中继节点的数目), 且算法复杂度大大降低了。

参考文献:

- [1] FOSCHINI G J, GANS M J. On the limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas [J]. *Wireless Personal Communication*, 1996, 6(2): 41–49.
- [2] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity – Part I: System description [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(11): 1927–1938.
- [3] 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.
- [4] BLETSAS A, KHISTI A, REED D P, et al. A simple cooperative diversity method based on network path selection [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(3): 659–672.
- [5] 覃琴, 曾志民, 张天魁. 协作分集中中继选择算法的研究 [J]. *电信科学*, 2009, 25(5): 56–61.
- [6] 吴素闻, 王振, 朱近康. 基于信道特性的中继选择协作通信方法研究 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2009, 39(11): 1136–1140.
- [7] ZHAO Y, ADVE R, LIM T J. Improving amplify-and-forward relay networks: Optimal power allocation versus selection [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(8): 3114–3123.
- [8] RIBEIRO A, CAI X, GIANNAKIS G B. Symbol error probabilities for general cooperative links [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(3): 1264–1273.
- [9] ZHANG N, GE J H, GONG F K. SEP analysis and optimal power allocation of multi-node amplify-and-forward cooperation systems [C]// *WiCOM'08: Proceedings of the 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. Dalian: [s. n.], 2008: 1–5.
- [10] HAMMERSTORM I, KUHN M, WITTNEBEN A. Impact of relay gain allocation on the performance of cooperation diversity networks [C]// *IEEE Conference on Vehicular Technology*. Los Angeles: [s. n.], 2004: 1815–1819.
- [11] WANG Z, GIANNAKIS G B. A simple and general parameterization quantifying performance in fading channels [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(8): 1389–1398.

(上接第 601 页)

4 结语

本文实现了对 AODV 协议的改进, 从理论分析和仿真结果表明, 协议的请求报文数量明显下降, 协议的性能有较大的提高。由于对报文回复方式的改进, 回复报文的数量有所增加。同时, 如果先前路径源节点的下一跳节点移动性很高, 可能会使再次发起的请求失效, 从而增加数据传输延时。但总的性能效果表明, 改进后的 DAODV 协议, 对 AODV 的控制报文有很好的抑制作用。

参考文献:

- [1] CORSON S, MACKER J. Mobile Ad Hoc Networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation considerations, Internet RFC2051 [S], 1999.
- [2] PERKINS C E, ROYER E M. Ad Hoc On-Demand Distance Vector

(AODV) routing, Internet experimental RFC3561 [S], 2003.

- [3] ZHAO QIANG, ZHU HONGBO. An optimized AODV protocol in mobile Ad Hoc network [C] // *Proceedings of the 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. Dalian, China: IEEE, 2008: 1–4.
- [4] JUNG S, HUNDEWALE N, ZELIKOVSKY A. Node caching enhancement of reactive Ad Hoc routing protocols [C] // *WCNC'05: Proceedings of 2005 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. New Orleans, USA: IEEE, 2005: 1970–1975.
- [5] LIU WANGGUI, QU ZHAOWEI. Scheme for on-demand route protocol in Ad-Hoc networks [J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2008, 15(1): 41–45.
- [6] NS-2 simulation [EB/OL]. [2010-05-01]. <http://www.isi.edu/nsnam/>.