

无线网络中基于位置的能源高效协作路由算法

张晚生* 刘 凯

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘要: 为了降低无线网络中路由的整体发射功率, 该文提出了一种基于位置的能源高效协作路由(LBCR)算法。首先分析了协作链路在一定中断概率要求下的发射功率性能, 理论分析表明, 合适的协作节点可以降低协作链路的发射功率。在自适应转发分群路由(AFCR)算法的基础上, LBCR 算法利用节点位置信息为每跳选择合适的中继节点, 然后结合多跳协作策略, 建立从源节点到目的节点的协作路由。仿真结果表明, 与无协作的 APCR 算法和基于一跳协作的 MPCR 算法相比, LBCR 算法可以明显改善路由的整体发射功率。

关键词: 无线网络; 协作路由; 能源高效; 位置信息; 多跳协作

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)01-0063-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00425

Energy-efficient Location-based Cooperative Routing in Wireless Networks

Zhang Wan-sheng Liu Kai

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: An energy-efficient Location-Based Cooperative Routing (LBCR) algorithm is proposed to reduce the overall transmission power for routing in wireless networks. With theoretical analysis, appropriate relay node can reduce the transmission power of the cooperative link, given the outage probability of the link constrained at a certain target level. Based on the Adaptive Forwarding Cluster Routing (AFCR) algorithm, LBCR algorithm uses the location information of nodes to select appropriate relay node for each hop, and then combines multi-hop cooperation strategy to form the route from source node to destination node. Simulation results show that, compared with noncooperative routing algorithm and hop-by-hop cooperative routing algorithm, LBCR algorithm can obviously reduce the overall routing transmission power.

Key words: Wireless networks; Cooperative routing; Energy-efficient; Location information; Multi-hop cooperation

1 引言

降低网络的整体能量消耗是无线网络的研究热点。在降低网络能量消耗的技术中, 由于协作通信通过信道的空间分集抵消了信息在传播过程的衰减, 比传统的 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)更加灵活和容易实现而受到了越来越多的关注。

目前, 许多文献在网络层对协作通信的能量消耗方面进行了研究^[1-4]。文献[1]提出了一种集中式的功率分配方案。该方案中, 基站根据用户间的信道及传输速率信息, 为每个用户分配一个或多个中

继, 以降低整体的上传链路功率。文献[2]分析了两个节点集合间协作传输信息的功率消耗, 认为每跳中多个接收节点代替单个接收节点可以改善网络的能耗和吞吐量性能。文献[3]提出两种基于最短路径的协作路由算法: 最小功率协作路由(MPCR)算法和最短路径上的协作路由(CASNCP)算法。这两个路由算法都是在保证一定传输率的情况下选择使能量消耗最小的传输路径。MPSDF 算法^[4]在 MPCR 的基础上考虑了协作链路中节点发射功率不同情况下中断概率与发射功率的关系, 推导出在一定误码率要求下协作链路的最小发射功率公式。该算法在发送数据包之前, 发送节点首先广播 HELLO 数据包来测试发送节点到接收节点的信道质量, 当信道质量低于链路正确传输所要求的性能时, 发送节点将选择中继节点进行协作传输; 其后发送节点和所选择的中继节点根据协作链路中的 3 个节点之间距离调整各自的发射功率, 在保证一定误码率的前提

2011-05-05 收到, 2011-08-29 改回

国家创新研究群体科学基金(60921001), 国家自然科学基金(60933012), 国家科技重大专项(2009ZX03006-001-003), 北京航空航天大学“蓝天新星”计划项目(221235)和中央高校基本科研业务费专项资金(YWF-10-01-A16)资助课题

*通信作者: 张晚生 zhangws@ee.buaa.edu.cn

下降低路由的整体发射功率。

以上这些协作路由由算法中的每一跳中继节点只向本跳接收节点转发来自发送节点的信息(称这种传输策略为一跳协作策略)。文献[5]提出了多跳协作策略的基本概念:一跳中的中继节点可以向本跳和下一跳的接收节点同时转发来自发送节点的信息。由于可以在不占用额外信道资源的情况下传输信息,多跳协作与一跳协作相比,在减小传输延迟、降低功耗和合理使用带宽方面更加高效。

中继节点选择是设计协作路由过程中的一个重要研究方面。许多协作路由算法是根据信道质量来选择中继节点^[2-4]。在这类路由算法中,各节点间需要交互信息或者发送测试包来获得相应的信道信息,这增加了网络中的开销和数据碰撞概率,降低了网络的性能。随着全球定位系统(GPS)技术和网络区域算法的发展,网络中的节点可以轻易获得自身的位置信息,已经有许多地理由^[6,7]利用位置信息来选择路由节点。文献[6]首先从能量角度计算出最佳的下一跳节点位置,然后发送节点在其邻节点中选择距离最佳位置最近的节点作为下一跳节点。与文献[6]不同的是,文献[7]以最佳节点位置为圆心确定一个圆形转发区域,在转发域内选择下一跳节点,使参加选择的节点数目减少,因此提高了节点的选择效率。

本文在自适应转发分群路由(AFCD)算法^[9]的基础上,结合基于位置信息的节点选择和多跳协作思想,提出了基于位置的能量高效协作路由(LBCR)算法。该算法通过分析传输链路的功耗,在满足一定链路中断概率的要求下,利用节点的位置信息选择出使每跳的发射功率最小的中继节点,同时结合多跳协作策略,发掘多跳路由的协作优势,极大地降低了路由中节点的整体发射功率。

本文的安排如下,第2节介绍了网络模型,第3节对链路进行理论分析,推导出了直接传输链路和协作传输链路中发射功率的近似表达式,第4节提出LBCR算法,第5节对算法进行了仿真评估和比较,最后,第6节给出了结论。

2 网络模型

2.1 基本假设

网络中所有节点间的信道衰减特性相互统计独立且同分布。每个节点的发射功率可以进行调节,工作在半双工模式,即不允许发射与接收工作进行。数据的传输过程包含两种链路模型:直接传输链路和协作传输链路。

2.2 直接传输链路

发送节点 x 和接收节点 z 组成直接链路 (x, z) 。发送节点 x 和接收节点 z 之间的无线信道由增益因子 $\alpha_{x,z} = \sqrt{d_{x,z}^{-k}} h_{x,z}$ 描述,其中 $d_{x,z}$ 为两节点间的距离, k 为路径损耗指数(通常取 2-4), $h_{x,z}$ 为两节点间的信道系数。在瑞利衰减信道中,信道增益 $|h_{x,z}|^2$ 的概率密度函数为 $p(|h_{x,z}|^2) = \exp(-|h_{x,z}|^2)$ ^[9]。则在直接传输链路中,接收端 z 接收到的信号为

$$r_{x,z}^D = \sqrt{P_x^D} \alpha_{x,z} s + n_{x,z} \quad (1)$$

其中 P_x^D 为直接链路模型中节点 x 的发射功率, s 为发送信号, $n_{x,z}$ 为零均值方差为 N_0 的复加性白噪声。

2.3 协作传输链路

如图1所示,发送节点 x 、中继节点 y 和接收节点 z 组成了协作链路 (x, y, z) 。

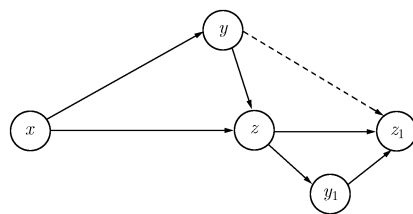


图1 协作传输链路

在协作传输中,信息的发送分为两个时隙进行:在第1时隙,发送节点 x 向中继节点 y 和接收节点 z 发送信号。在第2时隙,中继节点 y 把成功解码的数据包转发给接收节点 z 。

最后,接收节点 z 将两个时隙中接收到的信号通过最大比合并(Maximal Ratio Combining, MRC)技术结合起来,可得到信号为^[10]

$$r_{x,y,z}^C = (\alpha_{x,z})^* r_{x,z}^C + (\alpha_{y,z})^* r_{y,z}^C \quad (2)$$

其中 $r_{x,z}^C = \sqrt{P_x^C} \alpha_{x,z} s + n_{x,z}$ 和 $r_{y,z}^C = \sqrt{P_y^C} \alpha_{y,z} s + n_{y,z}$ 分别为接收节点 z 在第1和第2两个时隙内所接收到的信号。

如果节点 z 的下一跳节点 z_1 也在节点 y 的传输范围之内,则在中继节点 y 向节点 z 转发数据的同时,节点 z_1 也将接收到来自 y 转发的信号(此时节点 y 进行多跳协作传输)。节点 z_1 从节点 y 处接收到的信号为

$$r_{y,z_1}^D = \sqrt{P_y^D} \alpha_{y,z_1} s + n_{y,z_1} \quad (3)$$

3 链路性能分析

3.1 直接传输链路

由式(1)可知,节点 z 所接收信息的等效瞬时信

噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)为

$$\text{SNR}_D = \frac{P_x^D}{N_0} |\alpha_{x,z}|^2 \quad (4)$$

其中 P_x^D/N_0 为无衰落时节点 z 所接收信息的信噪比。在此接收信噪比情况下, 链路(x, z)的互信息 $I_{x,z}$ 为

$$I_{x,z} = \log_2 \left(1 + \frac{P_x^D}{N_0} |\alpha_{x,z}|^2 \right) = \log_2 \left(1 + \frac{P_x^D}{N_0} \frac{|h_{x,z}|^2}{d_{x,z}^k} \right) \quad (5)$$

在带宽 B 一定的情况下, 假定系统以频谱效率为 η_0 bit/(s·Hz) 进行通信。当信道条件恶劣到使频谱效率小于 η_0 时, 则认为通信中断。因此, 链路(x, z)的中断事件为 $I_{x,z} \leq \eta_0$, 它的中断概率为^[11]

$$\begin{aligned} p_{O(x,z)} &= \Pr(I_{x,z} \leq \eta_0) = \Pr \left(\log_2 \left(1 + \frac{P_x^D}{N_0} \frac{|h_{x,z}|^2}{d_{x,z}^k} \right) \leq \eta_0 \right) \\ &= 1 - \exp \left(- \frac{(2^{\eta_0} - 1) N_0 d_{x,z}^k}{P_x^D} \right) = d_{x,z}^k \left(\frac{(2^{\eta_0} - 1) N_0}{P_x^D} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可知, 链路的中断概率 $p_{O(x,z)}$ 与节点的发射功率 P_x^D 成反比关系, 因此, 在满足设定的中断概率阈值 C (即 $p_{O(x,z)} \leq C$) 的前提下, 链路所需的最小发射功率为

$$P_x^D = \frac{(2^{\eta_0} - 1) N_0 d_{x,z}^k}{C} \quad (7)$$

3.2 一跳协作传输链路

如图 1 所示, 协作链路(x, y, z)包含链路(x, y), (x, z)和(y, z)。根据链路(x, y)中断与否, 节点 z 所接收到的信号分为以下两种情况:

(1)若链路(x, y)中断, 节点 z 只接收到第 1 时隙期间节点 x 广播的信号。

(2)若链路(x, y)连接, 节点 z 接收到第 1 时隙期间节点 x 广播的信号和第 2 时隙期间节点 y 发送的信号。

相应地, 链路(x, y, z)的互信息 $I_{x,y,z}$ 为

$$I_{x,y,z} = \begin{cases} \frac{1}{2} \log_2 (1 + (P_x/N_0) |\alpha_{x,z}|^2), & I_{x,y} \leq \eta_0 \\ \frac{1}{2} \log_2 (1 + (P_x/N_0) |\alpha_{x,z}|^2) \\ \quad + (P_y/N_0) |\alpha_{y,z}|^2, & I_{x,y} > \eta_0 \end{cases} \quad (8)$$

其中 $I_{x,y} = (1/2) \log_2 (1 + (P_x/N_0) |\alpha_{x,y}|^2)$, 为链路(x, y)的互信息(因为链路(x, y)的传输只发生在第 1 时隙, 所以其互信息为全时隙的一半^[12])。由式(8)可得链路(x, y, z)的中断概率为

$$\begin{aligned} p_{O(x,y,z)} &= \Pr(I_{x,y,z} \leq \eta_0) \\ &= \Pr((1/2) \log_2 (1 + (P_x/N_0) |\alpha_{x,z}|^2) \leq \eta_0) \times \Pr(I_{x,y} \leq \eta_0) + \Pr((1/2) \\ &\quad \cdot \log_2 (1 + (P_x/N_0) |\alpha_{x,z}|^2) + (P_y/N_0) \\ &\quad \cdot |\alpha_{y,z}|^2) \leq \eta_0) \times (1 - \Pr(I_{x,y} \leq \eta_0)) \end{aligned} \quad (9)$$

利用公式 $\exp(-x) \approx 1 - x$ (当 x 很小时), 可以将式(9)化简为

$$\begin{aligned} p_{O(x,y,z)} &= \left[d_{x,z}^k \frac{(2^{2\eta_0} - 1) N_0}{P_x} \right] \times \left[d_{x,y}^k \frac{(2^{2\eta_0} - 1) N_0}{P_x} \right] \\ &\quad + \left[\frac{1}{2} d_{x,z}^k d_{y,z}^k \frac{(2^{2\eta_0} - 1)^2 N_0^2}{P_x P_y} \right] \times 1 \\ &= d_{x,z}^k \left(d_{x,y}^k + \frac{P_x}{2P_y} d_{y,z}^k \right) \frac{(2^{2\eta_0} - 1)^2 N_0^2}{P_x^2} \end{aligned} \quad (10)$$

通过文献[4]中的推导方法, 我们可以推出, 在协作链路满足 $p_{O(x,y,z)} \leq C$ 的前提下, 使整体发射功率 $P_x + P_y$ 最小的 P_x 和 P_y 分别为

$$P_x = \frac{1}{d_{y,z}^k} \sqrt{\frac{m+1}{K}}, \quad P_y = \frac{1}{2m d_{x,y}^k} \sqrt{\frac{m+1}{K}} \quad (11)$$

其中 $m = (\gamma + \sqrt{\gamma^2 + 8\gamma})/2$, $\gamma = d_{y,z}^k/2d_{x,y}^k$, $K = C / (d_{x,z}^k d_{x,y}^k d_{y,z}^{2k} (2^{2\eta_0} - 1)^2 N_0^2)$ 。

3.3 多跳协作传输链路

在协作传输过程中, 若节点 z_1 在中继节点 y 的传输范围内(见图 1), 节点 z_1 也可以接收到 y 所转发的信号, 此时将进行多跳协作传输。假设节点 z 与之间的 z_1 传输有中继节点 y_1 参加, 则节点 z_1 接收信息失败的概率为

$$p_O = p_{O(y,z_1)} p_{O(z,y_1,z_1)} \quad (12)$$

其中 $p_{O(y,z_1)} = d_{y,z_1}^k ((2^{\eta_0} - 1) N_0 / P_y)$ 为直接传输链路(y, z_1)的中断概率, $p_{O(z,y_1,z_1)}$ 为协作链路(z, y_1, z_1)的中断概率。由式(12)可得 $p_{O(z,y_1,z_1)}$ 的表达式为

$$p_{O(z,y_1,z_1)} = \begin{cases} 1, & 0 \leq p_{O(y,z_1)} \leq C \\ \frac{p_O}{p_{O(y,z_1)}}, & C < p_{O(y,z_1)} \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

当 $0 \leq p_{O(y,z_1)} \leq C$ 时, 链路(y, z_1)的传输已满足设定的链路中断概率要求, 节点 z 将不需要再向 z_1 发送数据(可看作链路(z, y_1, z_1)的中断概率为 1), 因此可知, 多跳协作传输使信息的传输次数减少。当 $C < p_{O(y,z_1)} \leq 1$ 时, 节点 z 将继续通过协作链路(z, y_1, z_1)向节点 z_1 传输信息, 在确保 $p_O \leq C$ 的条件下, 使链路(z, y_1, z_1)的整体发射功率 $P_z + P_{y_1}$ 最小的 P_z 和

P_{y_1} 分别与式(11)中的 P_x 和 P_y 相似。唯一的不同点是

$$K = \frac{C'}{d_{x,z}^k d_{x,y}^k d_{y,z}^{2k} (2^{2\eta_0} - 1)^2 N_0^2} \quad (14)$$

其中 $C' = C/p_{O(y,z_1)}$ 。由式(14)可知, 由于上一跳中继节点 y 进行多跳协作传输, 链路 (z, y_1, z_1) 的中断概率阈值增大, 降低了它的节点发射功率要求。

综上所述, 多跳协作传输链路通过减少信息传输次数和降低节点发射功率要求这两种途径来降低链路的整体发射功率。

4 LBCR 算法

LBCR 算法是以自适应转发分群路由(AFCR)算法为基础, 结合基于位置信息的中继节点选择方法和多跳协作策略, 降低了传输过程中各节点的发射功率。

4.1 AFCR 算法

AFCR 算法采用基于最小节点 ID 的移动分群算法将无线网络中的所有节点分成若干个一跳分群。邻居节点之间通过交换局部路由信息来建立相邻群首之间的路由, 不相邻群首之间的路由则利用相邻群首之间的路由来建立, 最终将通过“源节点—群首—网关节点—...—群首—网关节点—群首—目的节点”的顺序进行路由。

4.2 中继节点选择

网络中各个节点通过 GPS 及各种定位算法可以获得本节点的地理位置。由式(11)可知, 中继节点与接收节点距离越小, 协作链路所需的发射功率就越小。因此, 为了使路由的整体发射功率最小, LBCR 算法需在路由的每跳上选择地理位置距离接收节点最近的节点(前提是节点可以正确接收发送节点发送的信号)作为本跳的中继节点。

中继节点的选择是通过 RTS/CTS 握手机制来实现的。为了减少参加中继选择的节点数目、降低不必要的能量消耗, 本文采用区域转发机制。如图2所示, 设定以 $x-z$ 为角平分线, 节点的最大传输距离为半径, 角度为 θ 的扇形区域为转发区域 E 。

发送节点 x 首先向邻节点广播包含自身和接收节点 z 的地理位置信息的 RTS 数据包。正确接收到 RTS 数据包的邻节点将根据包中相关节点的地理位置信息, 转发区域角度 θ 和节点最大传输距离来判断自己是否位于转发域内。如果在转发域内(称这种邻节点为候选中继节点, 它们组成候选中继节点集合 S), 则开始对本跳中继节点进行竞争, 否则直接丢弃数据包。候选中继节点 $i(i \in S)$ 根据自身和接收

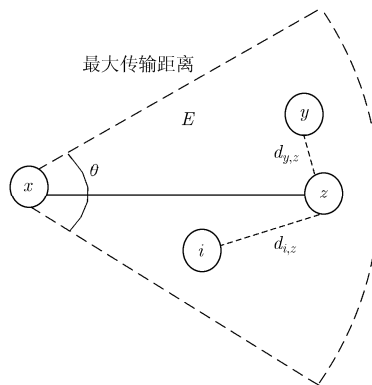


图2 转发区域

节点 z 的位置信息计算出回复 CTS 数据包之前的退避时间 $T_{\text{delay}}(i)$

$$T_{\text{delay}}(i) = [\omega(d_{i,z}/d_{x,z})^2 + (1-\omega)\text{rand}]T_0 \quad (15)$$

其中 $d_{x,z}$ 为节点 x 与节点 z 之间的距离, $d_{i,z}$ 为节点 i 与 z 之间的距离, rand 为 0~1 间的随机数, T_0 为节点 i 转发数据包前的最大等待时间, $0 \leq \omega \leq 1$ 为平衡因子。从式(15)的第 1 项可以看出, 候选中继节点距离接收节点 z 的距离越小, 它的退避时间越小。

在所有候选中继节点中, 节点 y 的退避时间第 1 个到达, 它将最先向 x 回复 CTS 数据包。其他候选中继节点在监听到此 CTS 数据包后退出竞争, 因而 y 竞争成功, 成为本跳的中继节点。如果发送节点 x 在广播 RTS 数据报后的一段时间 T_0 内仍没有收到候选中继节点回复的 CTS 数据包, 则判定转发域 E 内没有合适的中继节点, 链路 (x,z) 将进行直接传输。

4.3 LBCR 算法

当非协作路由 AFCR 建立之后, 路由的每一跳将执行 LBCR 算法, 以保证路径上所有链路均能满足限定的中断概率阈值 C 。具体的执行步骤如下:

(1)发送节点 x 发送数据包之前在候选中继节点集合 S 中选择本跳的中继节点 y 。如果中继节点集合 S 为空, 节点 x 采用直接传输方式向接收节点 z 发送数据。否则执行步骤(2)。

(2)发送节点 x 和中继 y 以协作传输方式向接收节点 z 发送数据。如果下一跳的接收节点 z_1 在中继节点 y 的传输范围内, 执行步骤(2)。否则执行步骤(1), 进行下一跳传输。

(3)节点 z_1 将接收来自节点 y 发送的数据, 通过式(14)改变下一跳的链路中断概率阈值为 C' , 执行步骤(1)。

5 性能评估

5.1 仿真环境

在无线网络中, $N=100$ 个节点随机分布在面积为 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的方形区域, 天线类型为全向天线, 传输范围为 100 m , 复高斯白噪声的方差为 $N_0=-70\text{ dBm}$, 路径损耗指数 $k=2$, 频谱效率 $\eta_0=2\text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$, 信号带宽 $B=1\text{ MHz}$, 平衡因子 $\omega=0.9$, 转发区域角度 $\theta=60^\circ$, $T_0=200\text{ }\mu\text{s}$, 链路所要求的中断概率阈值 $C=0.05$ 。仿真中将随机选择源节点和目的节点, 然后建立路由, 取 1000 个不同网络的平均值作为最终的仿真结果。

5.2 不同节点密度对路由发射功率的影响

图 3 和图 4 描述了在不同节点密度下, 各种路由的整体发射功率比较。从图 3 中可以看出, 随着节点密度的增大, 节点间的距离减小, 路由每跳传输所需的节点发射功率减小, 使得 AFCR 算法的整体发射功率不断减小。而 LBCR 算法和 MPCR 算法在高节点密度的环境中可以更加容易选择到合适的中继节点, 所以当节点密度增大时, 它们的整体发射功率得到了明显改善。同时从图中还可以看出, 在不同节点密度的网络环境中, LBCR 算法的整体发射功率性能都优于 MPCR 算法。这是因为, 与 MPCR 算法相比, LBCR 算法在传输的过程中可以进行多跳协作传输, 由式(13)和式(14)可知, 通过减少信息传输次数和降低节点发射功率要求两种方式降低了链路的发射功率, 使它的整体发射功率小于 MPCR 算法; 另外, LBCR 算法还通过基于地理位置信息的中继节点选择策略优选出最优的中继节点, 进一步降低了整体发射功率。

5.3 不同跳数对发射功率的影响

图 5 表明了不同跳数情况下, 3 种路由的整体发射功率比较。从图中可以看出, 在路由的第 1 跳中, LBCR 和 MPCR 的整体发射功率相同, 且都小于 AFCR。从第 2 跳起, 随着传输跳数的增加, LBCR 的整体发射功率小于相同条件下的另外两种路由算

法。这是因为, 在路由的第 1 跳中, LBCR 只能进行一跳协作传输, 它的发射功率和 MPCR 相近。随着路由跳数的增大, 在基于位置信息所选择的中继节点的协助下, LBCR 算法进行多跳协作传输的次数增多, 多跳协作传输降低链路发射功率方面的优势开始显现, 使它的整体发射功率小于 MPCR 算法和 AFCR 算法。

5.4 不同链路中断概率阈值对发射功率的影响

图 6 表明了不同链路中断概率阈值下各种算法的整体发射功率比较。从图中可以看出, 随着所限定链路中断概率阈值的增大, 3 种路由算法的整体发射功率逐渐降低, 并且有协作的 LBCR 算法和 MPCR 算法的整体发射功率降低的速度小于无协作 AFCR 算法。由式(7)和式(11)可知, 这是由于直接传输链路和协作传输链路的节点发射功率分别与限定链路中断概率阈值 C 和 \sqrt{C} 成反比造成的。同样还可以看出, 随着 C 的增大, 直接链路中节点需较小的发射功率就可以满足链路的中断概率要求, 协作链路在降低节点发射功率方面的作用并不明显, 使得它们的整体发射功率差别逐渐减小。除了多跳协作策略外, LBCR 算法由于总是能利用位置信息选择到使整体发射功率最优的中继节点而继续保持较小的整体发射功率。

6 结论

为了改善无线网络中协作路由在满足一定链路中断概率条件下的发射功率性能, 本文提出了基于位置信息的能量高效协作路由(LBCR)算法。该算法利用节点位置信息为每跳选择合适的中继节点, 使协作链路的发射功率最小。同时, 当路由的下一跳节点也在本跳中继节点的传输范围内时, 本跳中继节点将采用多跳协作策略, 把信息同时转发给下一跳节点。多跳协作策略通过减少信息传输次数或者降低节点发射功率要求这两种途径降低了链路的发射功率, 进而降低了路由的整体发射功率。仿真结果表明, 与无协作路由 AFCR 算法和一跳协作路由

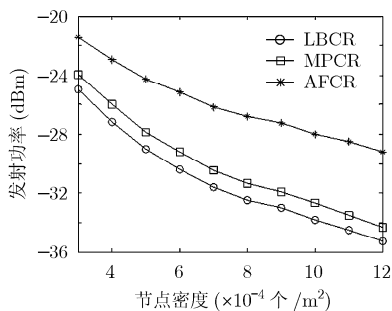


图 3 不同节点密度下的发射功率比较

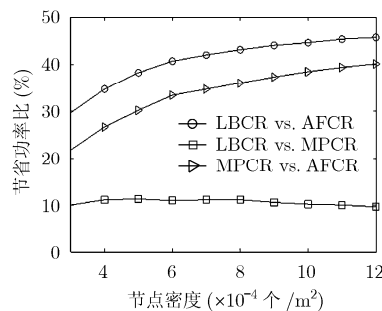


图 4 不同节点密度下的节省功率比

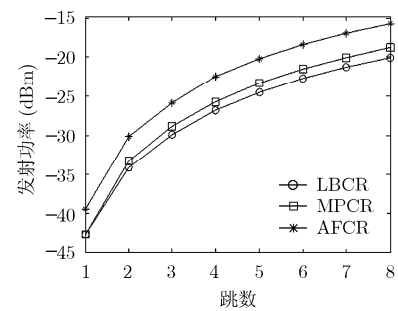


图 5 不同跳数下的发射功率比较

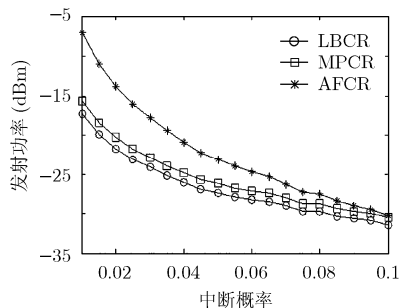


图 6 不同链路中断概率阈值下的发射功率比较

MPCR 算法相比, LBCR 算法可以明显改善路由的整体发射功率。

参考文献

- [1] Vardhe K, Reynolds D, and Woerner B D. Joint power allocation and relay selection for multiuser cooperative communication [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(4): 1255-1260.
 - [2] Dehghan M, Ghaderi M, and Goecke D L. On the performance of cooperative routing in wireless networks [C]. *IEEE International Conference on Computer Communications*, San Diego, USA, 2010: 1-5.
 - [3] Ibrahim A S, Han Z, and Liu K J R. Distributed energy-efficient cooperative routing in wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(10): 3930-3941.
 - [4] Sheng Z, Ding Z, and Leung K K. Distributed and power efficient routing in wireless cooperative networks [C]. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Dresden, Germany, 2009: 1-5.
 - [5] Adam H, Bettstetter C, and Senouci S M. Multi-Hop-aware cooperative relaying [C]. *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'09)*, Barcelona, Spain, 2009: 1-5.
 - [6] Feng W J and Elmirghani M H. Energy-efficient geographic routing in 2-D Ad-hoc wireless networks [C]. *International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies (NGMAST'09)*, Cardiff, Wales, UK, 2009: 383-388.
 - [7] Zhang H and Shen H. Energy-efficient beaconless geographic routing in wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2010, 21(6): 881-896.
 - [8] 王力, 刘凯, 刘亭. 移动 Ad hoc 网络中的自适应转发分群路由协议[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(8): 990-995.
Wang Li, Liu Kai, and Liu Ting. An adaptive forwarding cluster routing protocol for large scale wireless mobile Ad hoc networks [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(8): 990-995.
 - [9] Proakis J G. *Digital Communications* [M]. New York: McGraw-Hill, 2001: 205-207.
 - [10] 徐峰, 岳殿武, 严秋娜. 基于机会中继和最大比合并下的协作通信系统[J]. *通信学报*, 2009, 30(12): 36-44.
Xu Feng, Yue Dian-wu, and Yan Qiu-na. Opportunistic relaying and MRC combining-based cooperative communication systems [J]. *Journal of Communication*, 2009, 30(12): 36-44.
 - [11] Laneman J N, Tse D N C, and Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(12): 3062-3080.
 - [12] Sheng Z, Leung K, and Ding Z. Cooperative wireless networks: from radio to network protocol designs [J]. *IEEE Communication Magazine*, 2011, 49(5): 64-69.
- 张晚生: 男, 1984 年生, 硕士生, 研究方向为无线网络中的协作路由协议。
- 刘凯: 男, 1973 年生, 副教授, 研究方向为移动通信网、卫星通信网络和协作通信网络等。