

# 基于功率最优化分配的选择性协作通信模式

张超, 廖晓光, 王卫东, 卫国

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 无线网络通信安徽省重点实验室, 安徽合肥 230027)

**摘要:** 对于资源受限的无线网络, 协作通信技术被认为是一种能够有效提高传输功率效率的空间分集技术. 为了解决协作通信会引入由于中继节点运行和中继处理带来的额外功率这一难题, 提出了一种功率效率最优的选择性协作通信模式, 既能满足通信链路的设计要求, 又只在必要的时候引入协作机制. 在误符号率受限和节点最大功率受限的条件下, 给出了源节点和中继节点最优的功率分配, 然后选择功率效率最大的传输模式. 计算机仿真说明, 提出的选择性协作通信模式比传统的协作通信模式具有更高的功率效率.

**关键词:** 协作通信; 功率效率; 中继选择

中图分类号: TN929.5 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2010.04.015

## Selective cooperative communication based on power optimal allocation

ZHANG Chao, LIAO Xiaoguang, WANG Weidong, WEI Guo

(Department of Electronic Engineering and Information Science, USTC, Hefei 230027, China)

**Abstract:** Cooperative communication is considered as a power-efficient technology for resource-constraint wireless networks. However, its gains often come at a price in terms of extra power consumption for relay running and relaying processing. A new selective cooperative scheme was proposed to satisfy an overall performance requirement so that cooperation is only invoked when necessary. Optimal power allocations under overall symbol-error-rate (SER) constraint and maximum power limit were derived for cooperative schemes. Taking into account extra power, the scheme with minimum overall power was adopted for a source-destination pair. Simulation results show that the proposed schemes are more power-efficient than the conventional cooperative scheme.

**Key words:** cooperative communication; power-efficiency; relay selecting

## 0 引言

对于资源受限的无线网络, 例如无线传感器网络, 如何使单位信息传输消耗的总能量最小是一个重要的设计考虑<sup>[1]</sup>. 协作通信作为一项能够有效对抗信道衰落和提高发射功率效率的新技术, 近年来

被大量地应用到资源受限的无线网络中. 它的基本思想是利用无线信道的广播特性, 每个节点不仅在传输自己信息的同时也可以帮助其协作伙伴节点传输信息. 文献[2]证明了选择一个最好的中继节点可以获得与多中继协作模式相同的分集阶数. 单个节点中继不需要多点协同, 因此其管理开销远小于多

收稿日期: 2008-05-06 修回日期: 2008-05-29

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)计划(2007CB310602)和 Intel 大学研究计划(4507334166)资助.

作者简介: 张超, 男, 1982年生, 博士生. 研究方向: 协作通信, 分布式空时系统. E-mail: lockhead@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 卫国, 博士/教授. E-mail: wei@ustc.edu.cn

中继协作模式<sup>[3]</sup>, 非常适于资源受限的无线网络.

如何充分利用单中继协作通信技术来提高资源受限网络的功率效率是目前的研究热点. 文献[4]基于瞬时信道信息提出了一种总能量最小的功率控制方法, 但是由于瞬时信道的不断变化, 中继的选择也将不断变化, 这样使系统额外能量开销较大. 对于双用户(two-user)协作系统, 文献[4]研究了最优的功率分配策略和伙伴选择算法, 并认为用户的发射功率是不受限制的, 而对于实际系统这样的假设是不合理的. 文献[5]提出了一种联合考虑剩余能量的中继节点选择算法. 需要注意的是文献[5]假设信道传输无错误或者使用理想的信道编码, 但是实际信道是可能存在剩余错误的, 因此使用信息错误概率作为功率分配的限制条件更为合理. 以上文献均认为协作通信总是比常规的直接通信具有较高的功率效率, 因此网络中的任何数据传输均需要进行协作传输.

由于中继节点在发射信号的同时需要维持系统的运行以及进行信息处理, 这样将给中继节点引入额外的协作功率开销<sup>[6]</sup>并且会降低协作通信系统的功率效率, 因此协作模式并不总是一定比常规通信的功率效率高. 考虑这样的事实, 本文在误符号率受限和节点最大功率受限的条件下, 给出了源节点和中继节点最优的功率分配, 然后提出了功率效率最优的选择性协作通信模式, 回答了“何时协作”和“与谁协作”的问题. 它具有以下三个特点: ①在功率最优化分配策略中, 同时考虑了资源受限网络中常见的最大功率限制和平均误符号率(SER)限制; ②考虑了中继节点额外协作功率对总功率效率的影响; ③不但提出了功率效率最优的模式, 考虑系统计算开销和性能的折衷, 同时提出了一种次优但具有较小计算复杂度的中继选择模式.

## 1 系统模型

考虑一个资源受限并且由中心节点控制的无线网络(图1),  $N$ 个节点随机的分布在以中心节点为圆心的圆形范围内. 所有节点均有数据发送给中心节点, 而且任何时刻只有一个节点作为源节点( $s$ ), 中心节点为目的节点( $d$ ), 剩余  $N-1$ 个节点作为可用中继节点. 所有的节点均装配有一个全向天线, 相同的收发机以及相同的最大发射功率限制  $P_{\max}$ . 要求系统误符号率(SER)小于某一固定值. 同时为了防止错误传递(error propagation), 该网络使用解码

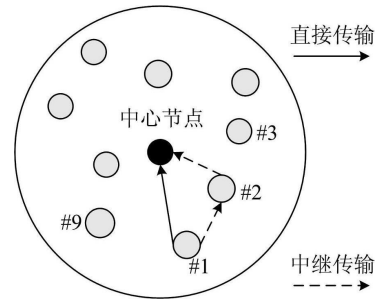


图1 一种中心控制的无线网络( $N=9$ )

Fig. 1 A realization of centralized wireless network

中继(decode-and-forward, DF)策略作为基本的协作模式. DF模式的过程可分为两步<sup>[2]</sup>: 第一步, 源节点广播其需要发送给中心节点的数据, 被选择出的中继节点同时也接收源节点的信息并尝试进行解码; 第二步, 如果中继节点成功解码则将该数据转发给中心节点以获取空间分集, 如果解码失败则丢弃该数据不进行转发. 不失一般性, 设数据帧持续时长为单位时间.

### 1.1 链路模型

在无线网络中, 从节点  $i$  到节点  $j$  的信道系数  $h_{ij}$  通常假设为一个服从零均值且方差为  $\xi_{ij}$  的复高斯分布的随机变量<sup>[7]</sup>, 并表示为  $h_{ij} \sim CN(0, \xi_{ij})$ . 这里信道方差  $\xi_{ij} = \lambda d_{ij}^{-\alpha}$ , 其中  $\lambda$  是一个取决于传播环境的常数,  $d_{ij}$  是节点  $i$  与节点  $j$  之间的距离,  $\alpha$  是路径衰减因子. 对于单中继协作系统里常见的三节点模型(three-node model), 标记源节点为  $s$ , 目的节点为  $d$ , 选出的中继节点为  $r$ , 因此相应的信道方差为  $\xi_{sr}, \xi_{rd}, \xi_{sd}$ .

在资源受限的无线网络里, 节点的位置信息经常作为已知信息提供给通信网络设计者<sup>[8]</sup>, 例如可以给每个节点安装GPS接收机或在通信前进行定位. 因此中心节点(信息收集节点)可以获得所有发送数据节点的位置信息. 对于此类网络, 例如传感器网络, 拓扑结构随时间变化较慢, 这样可以在中心节点计算各个节点间链路的方差集合  $\{\xi_{ij}\}$ . 即使拓扑结构发生变化, 中心节点也可以重新获取位置信息, 并计算相应的方差集合.

### 1.2 功率消耗模型

现在定义功率消耗模型. 为了比较非协作模式和DF协作模式下的系统总功率, 可以忽略两种模式下相同的功率消耗, 例如源节点运行功率. 因此非协作通信模式下的总功率为

$$P^D = P_0 \quad (1)$$

这里  $P_0$  是非协作模式下的源发射功率. 而对于 DF 协作模式, 三节点系统总功率模型为

$$P^C = P_1 + P_2 + P_{ex} \quad (2)$$

这里  $P_{ex}$  是由于中继运行和中继处理引入的额外协作功率, 它的数值大小可以在节点运行前使用功率测试仪器进行测量<sup>[1,6]</sup>. 由于  $P_{ex}$  与环境无关, 因此只需测量一次. 本文假设所有节点的额外功率均相同. 对于被选择出的中继节点  $r$  而言, 其消耗的功率为  $P_r = P_2 + P_{ex}$ . 因此有  $P_1 \leq P_{max}$  以及  $P_2 + P_{ex} \leq P_{max}$ . 为了使系统可以运行, 本文设  $P_{max} \gg P_{ex}$ . 如果节点  $j$  是被选择出的中继点, 那么表示此时的协作系统总功率为  $P_j^C$ .

## 2 最优的功率分配

为了使系统功率效率最大, 这就要求在保证系统通信质量的情况下使系统消耗的总功率最小. 本文考虑两个比较合理的限制条件, 一是节点最大可用功率限制  $P_{max}$ ; 另一个是保证端到端的误符号率不大于某一设计指标,  $SER \leq \epsilon$ . 为了获得功率效率最优的协作通信模式, 下文先给出非协作模式下的最优功率和协作模式下的最优功率分配.

### 2.1 非协作模式下的最优功率

考虑一个未编码的无线传输系统, 文献[9]给出了 MPSK 调制下的平均 SER 上限

$$SER \leq \frac{N_0}{4bP_0 \tilde{\alpha}_d} \quad (3)$$

其中,  $N_0$  是平均噪声功率;  $b = \sin^2(\pi/M)$ . 因此可以令  $\frac{N_0}{4bP_0 \tilde{\alpha}_d} = \epsilon$ . 那么对于非协作模式保证 SER 限制的最优功率为

$$P^D = P_0 = \frac{N_0}{4b\epsilon \tilde{\alpha}_d} \quad (4)$$

考虑一个特殊情况, 当  $P_{max} < P_0$  时, 此时在非协作模式下 SER 限制是无法得到保证的, 也就是说系统的瞬时 SER 可能会超过  $\epsilon$ . 因此为了尽可能的保证链路质量, 将使用  $P_{max}$  作为此时的发射功率.

### 2.2 协作模式下的最优功率分配

在 DF 协作模式下使用 MPSK 调制的平均 SER 上限由文献[9]给出

$$SER \leq \frac{A^2 N_0^2}{b^2 P_1^2 \tilde{\alpha}_d \tilde{\alpha}_r} + \frac{BN_0^2}{b^2 P_1 P_2 \tilde{\alpha}_d \tilde{\alpha}_r} \quad (5)$$

这里

$$A = \frac{M-1}{2M} + \frac{\sin(2\pi/M)}{4\pi}$$

$$B = \frac{3(M-1)}{8M} + \frac{\sin(2\pi/M)}{4\pi} - \frac{\sin(4\pi/M)}{32\pi}$$

观察式(2), 我们知道  $P_1$  和  $P_2$  是可优化变量, 因此最优的功率分配问题可以写为

$$\begin{aligned} & \min_{P_1, P_2} \{P_1 + P_2\} \\ \text{s. t. } & \begin{cases} \frac{A^2 N_0^2}{b^2 P_1^2 \tilde{\alpha}_d \tilde{\alpha}_r} + \frac{BN_0^2}{b^2 P_1 P_2 \tilde{\alpha}_d \tilde{\alpha}_r} = \epsilon; \\ 0 < P_1 \leq P_{max}; \\ 0 < P_2 \leq P_{max} - P_{ex} \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

注意这里有两个关于  $P_1$  和  $P_2$  的最大功率限制, 因此式(6)是一个不等式限制最优化问题. 以下分两步来计算其解, 首先考虑一个相应的等式限制最优化问题

$$\begin{aligned} & \min_{P_1, P_2} \{P_1^* + P_2^*\} \\ \text{s. t. } & \frac{A^2 N_0^2}{b^2 P_1^{*2} \tilde{\alpha}_d \tilde{\alpha}_r} + \frac{BN_0^2}{b^2 P_1^* P_2^* \tilde{\alpha}_d \tilde{\alpha}_r} = \epsilon \end{aligned} \quad (7)$$

使用拉格朗日乘数法<sup>[10]</sup>可以得到关于式(7)的最优解

$$\begin{cases} P_1^* = \sqrt{\frac{N_0^2 A^2 K \tilde{\alpha}_d + N_0^2 B \tilde{\alpha}_r}{K \epsilon b^2 \tilde{\alpha}_d \tilde{\alpha}_r}} \\ P_2^* = K P_1^* \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $K = \sqrt{(C+1)^2 - 1} - C$  并且  $C = B \tilde{\alpha}_d / 4A^2 \tilde{\alpha}_r$ . 考虑一个实际系统, 节点间的信道方差都是非零的有限值, 因此变量  $C$  也是一个有限值并且有  $0 < K < 1$ . 所以这里有  $P_1^* > P_2^*$ , 这是因为源节点需要有足够的功率使得中继节点可以成功的解码.

现在考虑最大功率限制问题, 本文使用图解法计算式(6)的解. 由于最大功率限制仅仅是对  $P_1$  和  $P_2$  的取值范围进行限制, 而等式限制问题(7)的解是满足 SER 限制时的最优功率分配. 由  $\frac{A^2 N_0^2}{b^2 P_1^2 \tilde{\alpha}_d \tilde{\alpha}_r} +$

$$\frac{BN_0^2}{b^2 P_1 P_2 \tilde{\alpha}_d \tilde{\alpha}_r} = \epsilon \text{ 解出}$$

$$P_2 = P_1 BN_0^2 \left[ \epsilon P_1^2 - \frac{A^2 N_0^2}{b^2 \tilde{\alpha}_d \tilde{\alpha}_r} \right]^{-1} \quad (9)$$

在  $P_1 > \sqrt{\frac{A^2 N_0^2}{b^2 \tilde{\alpha}_d \tilde{\alpha}_r}}$  时  $P_2$  是  $P_1$  单调减函数(见图2, 其单调性质证明较为简单这里省略), 由于各参数取值仅影响曲线形状不影响变化趋势和性质, 不失一般性这里取所有参数为1, 以下称该函数为约束曲线. 又因为  $P_1^* > \sqrt{\frac{A^2 N_0^2}{b^2 \tilde{\alpha}_d \tilde{\alpha}_r}}$ , 所以可以根据  $P_1^*$ ,  $P_2^*$ ,

$P_{max}$  以及  $P_{ex}$  的取值不同, 分以下四种情况讨论式

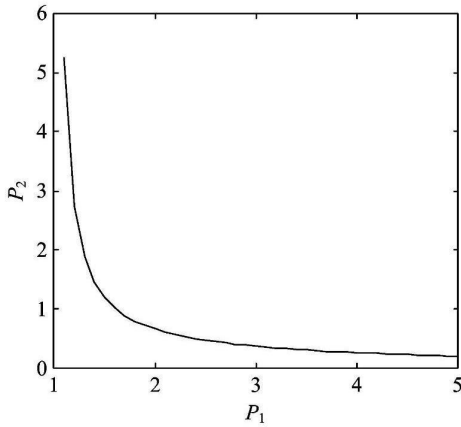


图 2  $P_1$  与  $P_2$  的约束关系

Fig. 2 Constraint relationship between  $P_1$  and  $P_2$

(6)的解.

情况 1  $P_1^* \leq P_{\max}$  并且  $P_2^* \leq P_{\max} - P_{\text{ex}}^C$

最优解  $P_1 = P_1^*$  和  $P_2 = P_2^* = K P_1^*$

证明 图 3 中与单调曲线相切的直线是由  $P_1 + P_2$  决定, 其直线方程为  $P_2 = -P_1 + Q$ , 所以这里就是寻找使得  $Q$  值最小且满足等式约束的点(也就是直线与约束曲线有交点). 从图 3 中可以看到, 解  $(P_1^*, P_2^*)$  是在无取值范围约束时使  $Q$  值最小的点, 也即是直线与约束曲线的切点, 同时还满足取值范围约束, 因此它是在情况 1 时式(6)的最优解.

从最优化理论的角度来看, 由于  $(P_1^*, P_2^*)$  满足 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件, 并且式(6)是一个凸规划问题, 所以  $(P_1^*, P_2^*)$  在此情况下一定是全局最优解<sup>[11]</sup>. 由于图解法足以证明最优解的真实性, 以下不再使用复杂的最优化理论进行证明.

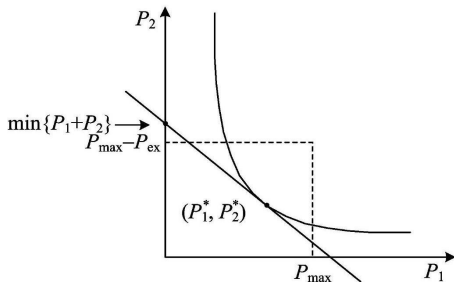


图 3 情况 1 的图解

Fig. 3 Illustration of case 1

情况 2  $P_1^* > P_{\max}$  并且  $0 < \frac{BN_0^2 \frac{\partial}{\partial P_{\max}}}{\epsilon b^2 P_{\max}^2 \frac{\partial}{\partial Q} \frac{\partial}{\partial Q} - A^2 N_0^2 \frac{\partial}{\partial Q}} \leq P_{\max} - P_{\text{ex}}^C$ .

最优解  $P_1 = P_{\max}$  和  $P_2 = \frac{BN_0^2 \frac{\partial}{\partial P_{\max}}}{\epsilon b^2 P_{\max}^2 \frac{\partial}{\partial Q} \frac{\partial}{\partial Q} - A^2 N_0^2 \frac{\partial}{\partial Q}}$

证明 图 4 中由于解  $(P_1^*, P_2^*)$  不在可行域内, 因此它不再是最优解, 但是约束函数的部分曲线仍落在可行域内, 根据约束函数的单调性从图中可知使得  $Q$  值最小的点是被可行域截断的约束曲线段上最靠近  $(P_1^*, P_2^*)$  的点. 因此该点有  $P_1 = P_{\max}$ , 并且将  $P_1$

代入式(9)便可得到  $P_2 = \frac{BN_0^2 \frac{\partial}{\partial P_{\max}}}{\epsilon b^2 P_{\max}^2 \frac{\partial}{\partial Q} \frac{\partial}{\partial Q} - A^2 N_0^2 \frac{\partial}{\partial Q}}$ .

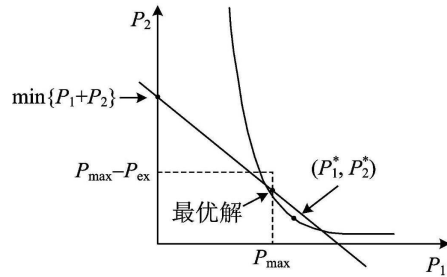


图 4 情况 2 的图解

Fig. 4 Illustration of case 2

情况 3  $P_2^* > P_{\max} - P_{\text{ex}}^C$  并且  $\frac{BN_0^2}{2\epsilon b^2 \frac{\partial}{\partial Q} \frac{\partial}{\partial Q} P_{\max}} \times$

$$\left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4\epsilon A^2 \frac{\partial}{\partial P_{\max}}}{B \frac{\partial}{\partial Q}}} \right) \leq P_{\max}$$

最优解  $P_1 = \frac{BN_0^2}{2\epsilon b^2 \frac{\partial}{\partial Q} \frac{\partial}{\partial Q} P_{\max}} \times$

$$\left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4\epsilon A^2 \frac{\partial}{\partial P_{\max}}}{B \frac{\partial}{\partial Q}}} \right) \text{ 和 } P_2 = P_{\max} - P_{\text{ex}}$$

证明 图 5 与图 4 是一个对偶的情况, 因此仍然是选择最接近  $(P_1^*, P_2^*)$  的点作为最优解. 具体细节不再赘述.

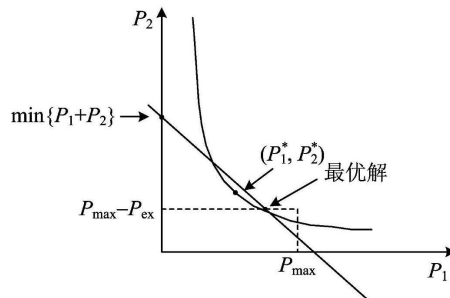


图 5 情况 3 的图解

Fig. 5 Illustration of case 3

情况 4 其他所有情况

由于此时没有任何可用功率范围内的点满足公式(9), 也即是说不存在可以使得系统一直满足 SER 限制的功率分配方案, 为了使协作系统尽可能地保证数据传输的可靠性, 此时只能使得  $P_1 = P_{\max}$  和  $P_2 = P_{\max} - P_{\text{ex}}^C$ . 值得注意的是以上的功率分配方

案均是基于所涉及信道的方差,因此在中心节点知道网络中各节点位置信息的情况下,便可以计算出最优的功率分配方案。

### 3 选择性协作通信

#### 3.1 功率效率最优的选择性协作模式

计算出最优的功率分配方案后,便可对非协作模式和协作模式下的总功率进行比较,从而可以选择出一个功率效率最大的通信模式.利用资源受限无线网络中已知的节点位置信息或者平均信道信息,根据以上节点功率最优化分配,本文提出了一种功率效率最优的选择性协作通信模式,以下称为 PEsEc (power-efficient selective cooperating) 模式.为了便于表示,设  $N$  个节点从 1 标记到  $N$ . PEsEc 模式的主要思想是在满足 SER 限制( $\epsilon$ )和最大功率限制( $P_{\max}$ )下,选择一个使用最小总功率的传输模式,也就是选择一个最大功率效率的传输模式.同时,为了保证传输链路的可靠性,PEsEc 模式保证 SER 限制优先于总功率最小化,即优先选择满足 SER 限制的传输模式.在文献[2-3, 7]中均指出仅考虑传输功率时,协作通信的功率效率是优于非协作通信的,因此当二者均不能保证 SER 限制时,协作传输模式将会有比非协作模式下更好的传输质量.以节点  $i$  为源节点为例,PEsEc 模式描述如下:

(I) 根据式(4)计算  $P^D$ , 又根据式(2)和式(6)的解,计算协作总功率集  $\{P_j^C\} j \neq i, 1 \leq j \leq N$ .

(II) 选择节点  $r = \arg \min_{j \neq i} \{P_j^C\}$  并且记录下以节点  $r$  为中继节点的功率分配方案  $(P_1, P_2)_r$ .

(III) 如果  $P^D \leq P_{\max}$  并且  $P^D \leq P_r^C$ , 那么为节点  $i$  选择非协作模式,并分配其发射功率为  $P^D$ ; 否则,选择协作模式,将节点  $r$  作为中继节点,并应用最优分配功率方案  $(P_1, P_2)_r$ .

注意,应对每一个节点执行以上的计算步骤以得到功率效率最优的传输方案.一旦 PEsEc 模式计算出结果,每一个节点应执行选择结果.提出的 PEsEc 模式是基于平均信道信息的,所以仅在网络的拓扑结构发生较大变化的时候才需要再次执行上述计算过程,这对于静态网络和低移动性网络而言只引入很小的系统开销.并且还应注意 PEsEc 模式所需要的计算开销仅在数据传输之前进行,在数据传输过程中并不需要额外的系统开销.中心节点根据收集到的节点位置信息可计算出每个节点的最优传输模式,然后将 PEsEc 模式计算结果广播给各个

节点.

#### 3.2 低复杂度 PEsEc 模式

如果网络内部的节点数很大,中心节点可能难以负担起 PEsEc 模式带来的大计算量.为了缓解计算复杂度的问题,适当牺牲功率效率是值得的.为此,本文又提出一种低复杂度的 PEsEc 模式,以下称为 LC-PEsEc 模式(low-complexity PEsEc).

观察式(7)中的限制条件

$$\frac{A^2 N_0^2}{b^2 P_1^{*2} \tilde{\alpha}_t \tilde{\alpha}_r} + \frac{BN_0^2}{b^2 P_1^* P_2^* \tilde{\alpha}_t \tilde{\alpha}_d} = \epsilon,$$

容易知道理想的中继节点应该同时既接近源节点又要接近目的节点,也就是说应该在源节点与目的节点的连接线上.由此只要基于局部的相对位置信息选择最靠近源节点与目的节点连接线的节点作为中继点,这样避免了全局的搜索,大大地降低了中心节点的计算复杂度;同时,在性能上也能尽量地接近最优<sup>[11]</sup>.虽然 LC-PEsEc 模式会引起部分性能的损失,但是我们会在下一节的计算机仿真实验中说明这样的损失是可以接受的.

### 4 计算机仿真

本节通过计算机仿真来评估本文提出的功率效率选择性协作通信模式.对于一个资源受限的无线网络,本文采用网络平均功率效率增益来衡量 PEsEc 模式和 LC-PEsEc.网络平均功率效率增益在文献[6]中定义如下:

$$G_p = 10 \log_{10} \left( \sum_{i=1}^N P^D(i) \right) - 10 \log_{10} \left( \sum_{i \in R} P^C(i) + \sum_{i \in R} P^D(i) \right)$$

这里,  $R$  是采用 DF 协作模式的节点集合.由于该定义表达的是对非协作模式总功率的增益,因此只要  $G_p > 0$ ,就说明采用的传输模式比非协作模式功率效率高.

计算机仿真采用的参数如表 1.其中主要参数均引用标注出的参考文献.除中心节点外,各个节点均匀地分布在以 50 m 为半径的圆内.以下实验如无特殊说明均遵照以上参数.为了平均无线网络拓扑结构的随机性,本文对  $10^6$  个随机拓扑结构的仿真结果进行了平均.

图 6 给出了当节点数目从 10 增加到 100 时各种模式平均功率增益变化.需要说明的是这里我们将 PEsEc 模式与常规的 DF 协作模式相比,并称 DF 协作为 OC (only cooperating) 模式.这里的 OC

表 1 仿真参数表  
Tab. 1 Simulation parameters

调制方式	BPSK
路径损耗因子 $\alpha$	3
$\lambda$	1
噪声功率 $N_0/dBm$	-80 <sup>[8]</sup>
最大功率 $P_{max}/mW$	0.3 <sup>[8]</sup>
额外功率 $P_{ex}/mW$	$1.875 \times 10^{-3}$ <sup>[1,6]</sup>
SER 限制 $\epsilon$	$10^{-3}$
网络半径/m	50

模式也是经过了最优功率分配,相应的 LC-OC 是采用了简化中继选择的 DF 协作模式.从图中可以看出,PESeC 模式比 OC 模式的平均功率效率增益高约 0.4 dB,也就是提高大约 10%.随着节点数目的增加,PESeC 和 OC 之间的功率效率差越来越大,这是因为在节点密度较高时,源节点具有较大的可能性选择一个处于最优位置的中继节点,而最优位置的中继节点可以使系统总功率达到最小.LC-PESeC 模式与 PESeC 模式的功率效率增益差大约为 0.3 dB(7%),但是仍然比 OC 模式高一些.此时 OC 模式需要全局搜索,而 LC-PESeC 仅需要局部搜索,因此计算量远小于 OC 模式.而在节点数目较大时,LC-PESeC 模式仍然比 LC-OC 模式的功率效率增益高 0.4dB.LC-PESeC 模式可以被用于高节点密度的无线网络里,以充分利用其较低的计算复杂度.

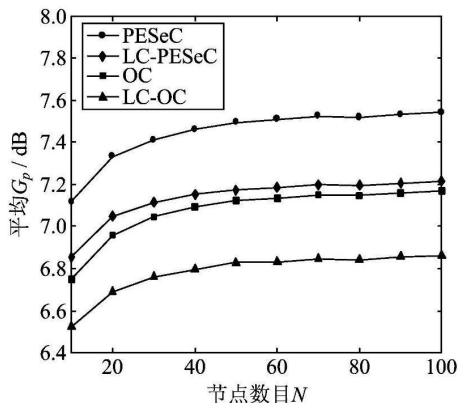


图 6 平均功率效率增益比较

Fig. 6 Average power efficiency gains vs number of nodes

图 7 显示了在节点数为 50 时,不同半径条件下平均功率效率增益的变化.随着半径的减小,PESeC 模式和 LC-PESeC 模式对 OC 模式的优势越来越大.这是因为小规模网络中路径损耗相对较小,额外协作功率占据了总功率较大的比例,所以协作模式

常常比非协作模式消耗更多的功率,因而选择性协作通信模式的优势更为突出.在半径较大时,PESeC 模式功率效率优势不太明显,而 LC-PESeC 模式甚至不如 OC 模式,而在半径较小时,PESeC 与 LC-PESeC 取得几乎相同的平均功率效率,所以在节点密度较高时 LC-PESeC 引起的性能损失是可以接受的.因此 PESeC 模式更适用于小规模资源受限的网络,而 LC-PESeC 模式适用于小规模高节点密度的无线网络.

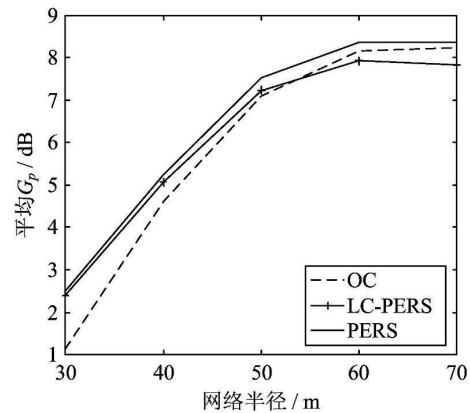


图 7 不同网络半径下的性能比较

Fig. 7 Performances with different network radii

## 5 结论

分析了协作通信中额外协作功率对系统功率效率的影响,本文提出了一种功率效率的选择性协作通信模式——PESeC 模式.在资源受限的无线网络中,PESeC 模式的功率分配可由已知网络节点位置信息的中心节点进行计算.而且该模式所需的计算过程仅在传输之前进行,一旦得出结果,除非网络拓扑结构发生重大变化,否则不再需要系统开销.为了进一步减小计算复杂度,本文又提出了一种次优的低复杂度 LC-PESeC 模式.从仿真实验可知在资源受限网络中,PESeC 能提供比常规协作通信更高的功率效率. PESeC 模式适用于小规模无线网络,而 LC-PESeC 模式适用于高节点密度的小规模网络.

### 参考文献(References)

- [1] Sadler B M. Fundamentals of energy-constrained sensor networks systems [J]. IEEE A & E Systems Magazine, 2005, 20(8): 17-35.
- [2] Zhao Y, Adve R, Lim T J. Improving amplify-and-

(下转第 430 页)

- [ 6 ] Gong D, Zhou Y, Li T. Cooperative interactive genetic algorithm based on user's preference [ J ]. International Journal of Information Technology, 2005, 11 ( 10 ): 1-10.
- [ 7 ] Miki M, Yamamoto Y, Wa-ke S, et al. Global Asynchronous distributed interactive genetic algorithm [ C ] // Proceedings of the 2006 IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 3 481-3 485.
- [ 8 ] Hao Guosheng, Gong Dunwei, Shi Youqun, et al. Relation algebra based genetic algorithm model and its applications [ J ]. Journal of Southeast University ( Natural Science Edition ), 2004, 34(Sup): 58-62. 郝国生, 巩敦卫, 史有群, 等. 基于关系代数的遗传算法模型及其应用 [ J ]. 东南大学学报(自然科学版), 2004, 34( 增刊 ): 58-62.

( 上接第 424 页 )

- forward relay networks: Optimal power allocation versus selection [ C ] // IEEE International Symposium of Information Theory, 2006: 7-18.
- [ 3 ] Zhou Zhong, Zhou Shengli, Cui Junhong, et al. Energy-efficient cooperative communication based on power control and selective single-relay in wireless sensor networks [ J ]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7: 3 066-3 078.
- [ 4 ] Mahinthan V, Cai L, Mark J W, et al. Partner selection based on optimal power allocation in cooperative-diversity systems [ J ]. IEEE Trans Vehicular Tech, 2008, 57( 1 ): 511-520.
- [ 5 ] Chen Yan, Yu Guangding, Qiu Peiliang, et al. Power-aware cooperative relay selection strategies in wireless ad hoc networks [ C ] // Proc of the 17th IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Conference, 2006.
- [ 6 ] Cui S, Gold Smith A J. Cross-layer optimization of sensor networks based on cooperative MIMO techniques with rate adaption [ C ] // Proc of IEEE 6th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communication, 2005: 960-964.
- [ 7 ] Laneman J N, Wornell G W. Distributed space-time coded strategies for exploiting cooperative diversity in wireless networks [ J ]. IEEE Trans Inform Theory, 2003, 49( 10 ): 2 415-2 525.
- [ 8 ] Himsoon T, Siriwongpairat W P, Han Z, et al. Lifetime maximization via cooperative nodes and relay deployment in wireless networks [ J ]. IEEE Journal of Select Area in Comm, 2007, 25( 2 ): 306-317.
- [ 9 ] Su Weifeng, Sadek A K, Liu K J R. SER performance analysis and optimum power allocation for Decoded-and-Forward cooperation strategy in wireless networks [ C ] // 2005 IEEE Wireless Communication and Network Conference, 2005: 984-989.
- [ 10 ] Fletcher R. Practical Methods of Optimization [ M ]. 2nd edition. New York: Wiley, 2000.
- [ 11 ] Zhang Chao, Wang Lei, Wang Weidong, et al. A simple distributed relay-assignment algorithm for multi-antenna relay networks [ C ] // 2008 the Third International Conference on Communications and Networks in China, 2008.