

## 最大网络生存期的无线传感网协作路由算法<sup>\*</sup>

陈永锐<sup>+</sup>, 易卫东

(中国科学院 研究生院 信息科学与工程学院,北京 100049)

### Cooperative Routing Algorithm for Network Lifetime Maximization in Wireless Sensor Networks

CHEN Yong-Rui<sup>+</sup>, YI Wei-Dong

(School of Information Science and Engineering, Graduate University, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

+ Corresponding author: E-mail: chen\_yong\_rui@163.com, http://mail.163.com

Chen YR, Yi WD. Cooperative routing algorithm for network lifetime maximization in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2011,22(Suppl.1):122-130. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/11013.htm>

**Abstract:** This paper studies the cooperative routing algorithm for maximizing the network lifetime in sensor networks. The study assumes nodes in the network are able to perform cooperative transmission to achieve transmit diversity, and proposes a joint cooperative transmission and energy conserving routing algorithm to prolong the network lifetime. First, a lifetime maximization problem via cooperative nodes is considered and performance analysis for MPSK modulation is provided. With an objective to maximize the minimum device lifetime under a constraint on bit-error-rate performance, the optimization problem determines which nodes should cooperate and how much power should be allocated for cooperation. Since the formulated problem is NP hard, a distributed suboptimal algorithm is developed for multi-node scenarios. The study demonstrates through simulation that the proposed solution achieves more than twice the length of the network lifetime compared with non-cooperative routing, when it is used with FA algorithms.

**Key words:** network lifetime maximization; cooperative routing; wireless sensor network

**摘要:** 研究了无线传感器网络中如何最大化网络生存期的协作通信路由算法.假定网络中的节点都能进行协作通信以实现协作分集,提出了一种能够提高网络生存期的协作通信与路由联合算法.首先,考察了如何让协作通信的节点实现生存期最大化的问题,并给出了MPSK调制方式下的性能分析.根据最大化节点寿命的目标,以及达到传输误码率要求的约束条件,最优化问题决定了哪些节点应该进行协作通信,以及各自分配多大的功率.由于最优化问题是一个NP难的问题,提出了一种分布式的次优算法.仿真结果表明,协作通信不但能够减少节点的发射功率,而且能够使节点间的能量分布更加均匀.在一定的链路误码率约束条件下,与非协作路由的最大化网络生存期算法相比,采用协作通信的最大化网络生存期路由算法能够提高网络生存期2倍以上.

**关键词:** 最大化网络生存期;协作路由;无线传感器网络

\* 基金项目: 中国科学院百人计划(99M2008M02)

收稿时间: 2011-05-02; 定稿时间: 2011-07-29

无线传感器网络由许多个传感器节点组成,这些节点通常是由电池供电的,节点能源的更换与续充非常困难<sup>[1]</sup>.因此,增加节点寿命是保证传感器网络通过分布的节点进行数据采集工作,使之不间断持续进行的关键问题.在这方面,有很多工作致力于最大化网络中的节点的最小寿命,通常也被称为网络生存期.其中最经典的算法是最小传输能耗算法(MTE)<sup>[2]</sup>以及流增强算法(FA)<sup>[3]</sup>.MTE 算法寻找一条能够最小化总传输能耗的路由.FA 算法则以节点的剩余能量为权重计算总能耗.这样,FA 路由总是容易选择剩余能量较多以及传输能耗较低的节点,从而使整个网络的能量分布得到平衡,避免某些节点过快地消耗能量直到耗尽.文献[4]计算出了不同类型的无线网络的生存期的上限.文献[5,6]分别研究了如何在广播和多播网络中寻找一个能最大化网络生存期的广播(多播)树.文献[7]中提出了一种最大化网络生存期的跨层设计方法.这种方法针对最大化网络生存期问题,对路由、资源调度和功率控制进行了联合优化.

协作通信<sup>[8]</sup>作为一种能够在无线通信中对抗信道衰落的有效方法,成为近期研究的热点之一.协作通信是一种空间分集的方法,通过使多个节点共享彼此的天线,形成一个虚拟的分布式天线阵(virtual MIMO),从而实现空间分集的效果(如图 1 所示),能够为经历深度衰落的节点提供数据的可靠传输.在无线传感器网络中,由于节点受大小、功率和硬件复杂度的约束,因而无法采用 MIMO 技术.协作通信的出现为在无线传感器网络中实现空间分集以提高数据传输的可靠性提供了一种较好的方法.同时,由于协作通信能获得一定的空间分集增益,因而在保证可靠传输的前提下,协作通信能够节省无线传感器网络节点的传输功率,延长网络生存期.目前已经提出了多种协作通信协议,例如,放大中继和解码中继方式<sup>[9]</sup>,用户中继方式<sup>[10]</sup>和编码中继方式<sup>[11]</sup>等等.文献[11-13]对物理层的一些问题,例如不同协作系统中溢出概率(outage)以及符号错误率(SER)进行了分析.协作通信所涉及到的上层协议的一些问题则在文献[14-16]中得到了分析,例如资源调度<sup>[17]</sup>、MAC<sup>[18]</sup>、路由等.文献[15,16]中分别考察了协作路由以及跨层设计的问题.

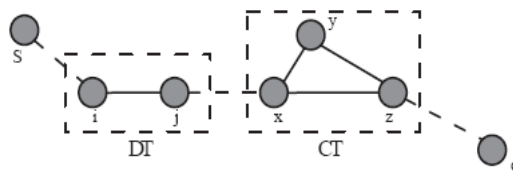


Fig.1 Cooperative block and non-cooperative block in the route

图 1 路由中的协作单元与非协作单元

近年来,协作通信被用来考察如何实现网络生存期的最大化.在文献[19]中,考察了放大中继协作在增加网络生存期方面的性能.在文献[20]中,协同波束形成方法与协作传输方法都被用于考察如何增加网络生存期.然而,这些分析都基于某些假设,例如中继节点均匀的分布在以  $R$  为半径的圆中.在文献[21]中,提出了一种协作通信的机制,这种机制结合了以最大化网络生存期为目的的功率分配和以节能为目的的路由算法.然而,由于算法是先形成最小能耗路由,再实施协作通信,因此,协作通信的潜力没有被充分地挖掘出来.因为最优的非协作路由不一定是最佳的协作路由,协作通信与路由没有进行联合优化.在文献[22]中,提出了一种基于 MPSK 调制的最大化网络生存期的次优算法.然而,这种算法过于复杂,无法在大规模网络中分布式实施.另外,在网络中,为了延长网络生存期,一些额外的中继节点需要被人为地放置在特定的地方.这些条件都限制了这种算法的应用.

在本文中,我们提出一种新方法增加网络的生存期,是通过采用协作通信和联合考虑路由和功率分配算法来实现的.这种方法基于解码中继(DF)协作方式,因为解码中继是一种比较适用于无线传感器网络的协作通信方法.我们首先提出了一个最优问题,目标是最大化网络中节点的最小寿命,约束条件是链路的误码率.然后给出了基于 MPSK 调制方式的网络生存期分析.由于最优化问题是 NP 难的,我们设计了一种可以分布式实施的次优算法.这种算法结合了最大化网络生存期路由和协作通信.与文献[21]相比,路由和协作通信是联合优化的.与文献[22]不同的是,我们不需要人为地增加一些中继节点,中继节点是从已有的节点中选择出来的.

本文第 1 节给出非协作网络和协作网络的系统模型.第 2 节提出最大化网络生存期的最优问题的表述.第 3

节提出一种多节点网络中的最大化网络生存期的次优算法.仿真结果在第4节展示.第5节给出结论.

## 1 系统模型

考虑一个无线多跳网络.该网络由许多随机分布的节点组成,每个节点都有一根全向天线,并且可以自动地调整节点的传输功率.一个图  $G(V,E)$  可以被用来描述这个网络.其中  $V$  是节点集,  $E$  是链路集.节点数目为  $|V|=N$ , 链路数目为  $|E|=M$ .假定信道是准静态瑞利信道,噪声为高斯白噪声.同样假定 MAC 层可以采用 TDMA,FDMA 或 CDMA 等复用方式,或者有很好的调度机制,保证多节点传输而不发生数据包的碰撞.

### 1.1 非协作通信网络分析

在一个非协作通信网络中,每一个节点都直接传输自己的信息给路由的下一跳节点(例如图1中的DT单元).设  $x_j$  表示节点  $j$  传输的一个符号,它从  $j$  传输到  $j$  的下一跳节点(用  $n_j$  表示),则在  $n_j$  端的接收信号可以表示为

$$y_{jn_j} = \sqrt{P_j} h_{jn_j} x_j + w_{jn_j} \quad (1)$$

其中,  $P_j$  表示  $j$  的传输功率,  $h_{jn_j}$  表示  $j$  到  $n_j$  的衰落系数,  $w_{jn_j}$  表示加性噪声.衰落系数  $h_{jn_j}$  的模型是一个复高斯随机变量,它的平均值为0,方差为  $\sigma_{jn_j}^2$ , 也即  $CN(0, \sigma_{jn_j}^2)$ .噪声为高斯白噪声,其分布是  $CN(0, N_0)$ .信道变量  $\sigma_{jn_j}^2$  可以表示成  $\sigma_{jn_j}^2 = \eta D_{jn_j}^{-\alpha}$ . 其中,  $D_{jn_j}$  表示  $j$  到  $n_j$  的距离;  $\alpha$  是路径损耗指数;  $\eta$  是一个常数,取决于信号传播环境.考察一个非编码系统,在 MPSK 调制方式下<sup>[18]</sup>,平均误码率的性能上限可以表示为

$$BER_j \leq \frac{N_0}{4bP_j\sigma_{jn_j}^2 \log_2 M} \quad (2)$$

其中,

$$b = \sin^2(\pi/M) \quad (3)$$

如果系统要求节点  $j$  的误码率满足  $BER_j \leq \varepsilon$ , 其中  $\varepsilon$  代表最大可接受误码率,并假定它对所有节点都一致.相应地,非协作节点的最小传输功率可以表示为

$$P_j = \frac{N_0}{4b\varepsilon\sigma_{jn_j}^2 \log_2 M} \quad (4)$$

### 1.2 协作通信网络分析

考虑一个协作通信网络.在网络中,每一个节点既可以作为源节点传输自己的信息,又可以作为中继节点帮助其他节点传输信息(例如图1中的CT单元).协作通信的策略是解码中继方式.第1阶段,源节点  $x$  向其下一跳节点  $y$  和中继节点  $z$  发送信息.第2阶段,中继节点  $z$  解码从源节点  $x$  收到的信息,并且将能够正确解码的部分向下一跳节点  $y$  转发.

假定节点  $j$  为源节点,  $i$  为中继节点.节点  $j$  向下一跳节点  $n_j$  发送信息,  $n_j$  收到的信号表示为(1).中继节点  $i$  收到的信号可以表示为

$$y_{ji} = \sqrt{P_j} h_{ji} x_j + w_{ji} \quad (5)$$

其中,  $h_{ji}$  表示从  $j$  到  $i$  的信道系数,  $w_{ji}$  表示加性噪声.第2阶段,  $i$  向  $n_j$  转发从  $j$  收到的能够正确解码的信息.  $n_j$  收到的信号可以表示为<sup>[22]</sup>

$$y_{in_j} = \sqrt{\tilde{P}_{ij}} h_{in_j} x_j + w_{in_j} \quad (6)$$

其中,如果中继节点能够正确解码符号,则  $\tilde{P}_{ij} = P_{ij}$ ; 否则,  $\tilde{P}_{ij} = 0$ .  $h_{in_j}$  和  $w_{in_j}$  是高斯变量,分别用  $CN(0, \sigma_{in_j}^2)$  和  $CN(0, N_0)$  表示.此后,  $n_j$  将直接传输的信号和从中继节点转发的信号用最大合并比方法合并起来.假设  $x_j$  是单位能量的,于是 MPSK 调制方式下的平均误码率可以表示为<sup>[22]</sup>

$$BER_j = \frac{1}{\log_2 M} F \left( 1 + \frac{bP_j \sigma_{jn_j}^2}{N_0 \sin^2 \theta} \right) \cdot F \left( 1 + \frac{bP_j \sigma_{ji}^2}{N_0 \sin^2 \theta} \right) \times \left[ 1 - F \left( 1 + \frac{bP_j \sigma_{ji}^2}{N_0 \sin^2 \theta} \right) \right] \quad (7)$$

其中,  $F(x(\theta)) = \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi/M} [x(\theta)]^{-1} d\theta$ ,  $b$  的含义由式(3)表示. 假定所有信道链路都是已知的, 且  $\sigma_{jn_j}^2 \neq 0, \sigma_{ji}^2 \neq 0$ . 于是, 式(7)的误码率上限可以通过消除式(7)中的所有负的项得到. 因此我们得到:

$$BER_j \leq \frac{N_0^2}{b^2 \log_2 M} \cdot \frac{A^2 P_{ij} \sigma_{in_j}^2 + B P_j \sigma_{ji}^2}{P_j^2 P_{ij} \sigma_{jn_j}^2 \sigma_{ji}^2 \sigma_{in_j}^2} \quad (8)$$

其中,  $A \triangleq (M-1)/2M + \sin(2\pi/M)/(4\pi)$ ,  $B \triangleq 3(M-1)/(8M) + \sin(2\pi/M)/(4\pi) - \sin(4\pi/M)/(32\pi)$ .

我们从式(8)可以看到, 协作传输可以获得2的分集因子. 因此, 要达到同样的误码率性能, 在协作分集的条件下, 源节点和中继节点所需的总发射功率要小于非协作通信所需的发射功率. 也就是说, 通过以适当的方式分配源节点功率和中继节点功率, 源节点的生存期将有较大的提高, 而中继节点的生存期将稍稍下降. 很容易看出, 如果我们用剩余能量相对较富余的节点作为中继节点来帮助剩余能量较少的节点传输信息, 那么网络的生存期将会得到提高.

## 2 问题的提出

首先我们来分析非协作网络中的节点的生存期. 设  $E_j$  为节点  $j$  的电池剩余能量,  $P_s$  为处理功率(包括解码信息的功率、收集数据的功率等). 设  $\lambda_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, N$  且  $i \neq j$ ) 为  $j$  向其下一跳节点  $n_j$  传输数据的速率. 于是,  $j$  的总功耗为  $\lambda_j P_s + \sum_{l=1}^N \lambda_{lj} P_j$ , 其中,  $\lambda_j P_s$  为  $j$  的处理功耗,  $\lambda_{lj} P_j$  表示  $j$  发送自己信息的功耗,  $\sum_{l=1, l \neq j}^N \lambda_{lj} P_j$  代表  $j$  作为路由节点为其他节点转发信息所耗费的能量. 从上一节我们可以推导出, 非协作网络中节点  $j$  的生存期为

$$T_j = \frac{E_j}{\lambda_j P_s + N_0 \sum_{l=1}^N (\lambda_{lj} / k \varepsilon \sigma_{jn_j}^2)} \quad (9)$$

其中,  $k = 4b \log_2 M$ . 由公式(9)可知, 每个节点的生存期取决于它的初始能量和节点位置. 初始能量少以及与下一跳节点距离较远的节点的生存期较小.

在协作网络中, 每个节点的总传输能耗是节点传输自己的信息的能耗以及帮助其他节点传输信息的能耗.  $P_r$  是每个中继节点的处理能耗, 即中继节点用来解码和转发信息的能耗. 因此, 对与协作网络中的中继节点  $i$  来说, 它的总能耗为

$$P_i \sum_{l=1}^N \lambda_{li} + \sum_{j=1, j \neq i}^N P_{ij} \left( \sum_{l=1}^N \lambda_{lj} \right) \quad (10)$$

其中,  $P_{ij}$  是  $i$  用来为  $j$  传输数据包的功耗. 因此, 任意节点  $i$  的总功耗为

$$\lambda_i P_s + \sum_{j=1, j \neq i}^N P_r \operatorname{sgn}(P_{ij}) \left( \sum_{l=1}^N \lambda_{lj} \right) \quad (11)$$

其中,  $\operatorname{sgn}(P_{ij})$  表示符号函数. 当  $P_{ij} > 0$  时为 1, 否则为 0. 因此, 可以得到  $i$  的生存期:

$$T_i = \frac{E_i}{\lambda_i P_s + P_r \sum_{l=1}^N \lambda_{li} + \sum_{j=1, j \neq i}^N (P_r \operatorname{sgn}(P_{ij}) + P_{ij}) \left( \sum_{l=1}^N \lambda_{lj} \right)} \quad (12)$$

其中,  $E_i$  为  $i$  的初始能量. 显然, 如果  $i$  作为中继节点帮助其他节点传输信息, 则  $i$  的生存期将会减少. 然而,  $i$  用于帮助  $j$  转发信息的能量  $P_{ij}$  越大, 则  $j$  的生存期越长. 因此, 最重要的是要设计好能量分配矩阵  $P$ , 以保证能够最大化最小的节点生存期.

以最大化最小节点生存期为目标, 以误码率为约束条件, 最优化问题可以被表示为

$$\max_P \min_i T_i(P) \quad \text{s.t.} \quad \begin{cases} BER_i \leq \varepsilon, & \forall i \\ 0 < P_i \leq P_{\max}, & \forall i \\ 0 < P_{ij} \leq P_{\max}, & \forall j \neq i \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $\varepsilon$  表示误码率要求. 在式(13)中, 第1项约束条件是要满足(7)所规定的误码率要求, 第2项约束条件是每个源节点的功率不能大于功率最大值  $P_{\max}$ , 第3项条件是每个中继节点的分配功率必须为非负数且不能大于  $P_{\max}$ . 由于最优化问题的分配与组合性质, 可选择的路由是节点数目的指数函数, 因此这个问题是一个 NP 难的问题.

### 3 无线传感器网络中的次优算法

最优问题是一个 NP 难的问题. 为了能够应用在资源受限的无线传感器网络中, 我们试图找到一种分布式的次优的方法. 在这里, 我们所找的方法是对非协作网络中的最大化网络生存期的路由算法——FA 算法(流增强算法)<sup>[4]</sup>进行改进, 使其应用在协作网络中, 从而达到与最优算法相近的性能, 但有较低的复杂度和可实现性. FA 算法对路由中每一跳的能耗加一个权重, 权重因子为发送节点的剩余能量. 我们考虑一条路由  $r = \{n_0, \dots, n_d\}$ , 其中,  $n_0$  是源节点,  $n_d$  是目的节点. 设在  $(n_i, n_j)$  上传输数据包的能量消耗为  $e(n_i, n_j)$ , FA 算法使用  $e(n_i, n_{i+1})^{x_1} \underline{E}_{n_i}^{-x_2} E_{n_i}^{x_3}$  作为第  $i$  跳  $(n_i, n_{i+1})$  的链路代价,  $E_{n_i}$  是节点  $n_i$  目前的剩余能量,  $\underline{E}_{n_i}$  是  $n_i$  的初始能量,  $x_1, x_2, x_3$  均是控制归一化剩余能量因子效果的参数. 因此, 路径总的加权能量消耗为  $P(r) = \sum_{i=0}^{d-1} e(n_i, n_{i+1})^{x_1} \underline{E}_{n_i}^{-x_2} E_{n_i}^{x_3}$ . 算法选择最小加权能耗的路径作为路由:

$$r_{FA}^* = \arg \min_{r \in R(n_0, n_d)} \sum_{i=0}^{d-1} e(n_i, n_{i+1})^{x_1} \underline{E}_{n_i}^{-x_2} E_{n_i}^{x_3} \quad (14)$$

其中,  $R(n_0, n_d)$  是  $n_0$  到  $n_d$  的所有路径集合. 当最小能耗路径上的节点能量降低时, 由于剩余能量因子的作用, 节点将选择其他路径作为路由, 从而避免了部分节点快速耗尽能量. 由于路径代价具有可加性, 满足最优化原理, 因此可以用 Bellman-Ford 算法的机制来实现, 可以分布式实施. 在这里, 默认  $(x_1, x_2, x_3) = (1, 5, 5)$ .

对于非协作网络, 如第2节所指出的, 链路上的能量损耗为

$$e(i, j) = \left( \frac{N_0}{4b\varepsilon\sigma_{ij}^2 \log_2 M} + P_s \right) T \quad (15)$$

其中,  $T$  是所传输的数据包的时间长度.

对于协作网络, 首先我们看一下两个节点的情形: 节点  $i$  帮助节点  $j$  传输信息. 在计算  $i$  和  $j$  各自的生存期之前, 我们首先应该合理地分配  $i$  和  $j$  的传输能量. 节点  $i$  和  $j$  的生存期分别为  $T_i = E_i / (\lambda_i(P_s + P_i) + \lambda_j(P_r + P_{ij}))$ , 以及  $T_j = E_j / (\lambda_j(P_s + P_j))$ .

对于给定的误码率要求, 增加  $i$  的功率将会减少  $i$  的寿命但增加  $j$  的寿命(因为  $j$  的功率可以减少). 另一方面, 增加  $j$  的功率将减少  $j$  的寿命但增加  $i$  的寿命. 因此, 为了最大化两个节点的最小生存期, 最好的方法是使  $i$  和  $j$  的寿命相同. 即  $T_i = T_j$ . 为了计算方便, 我们假定  $i$  只为  $j$  提供中继, 也就是说,  $\lambda_i = 0$ . 于是有:  $P_{ij} = \frac{E_i}{E_j} P_j + \Delta$ , 其中

$\Delta = \frac{E_i}{E_j} P_s - P_r$ . 如果误码率要求为  $BER \leq \varepsilon$ , 则根据误码率上限要求(7),  $P_j$  和  $P_{ij}$  需要满足:

$$\frac{N_0^2}{b^2 \log_2 M} \cdot \frac{A^2 P_{ij} \sigma_{in_j}^2 + B P_j \sigma_{ji}^2}{P_j^2 P_{ij} \sigma_{jn_j}^2 \sigma_{ji}^2 \sigma_{in_j}^2} = \varepsilon \quad (16)$$

因此, 源节点和中继节点的传输功率为

$$P_j = \left[ \frac{N_0^2}{b^2 \varepsilon \log_2 M} \cdot \frac{A^2 (E_i / E_j) \sigma_{in_j}^2 + B P_j \sigma_{ji}^2}{(E_i / E_j) \sigma_{jn_j}^2 \sigma_{ji}^2 \sigma_{in_j}^2} \right]^{1/2} \quad (17)$$

$$P_{ij} = \left[ \frac{N_0^2}{b^2 \varepsilon \log_2 M} \cdot \frac{A^2 (E_i / E_j) \sigma_{in_j}^2 + B P_j \sigma_{ji}^2}{(E_j / E_i) \sigma_{jn_j}^2 \sigma_{ji}^2 \sigma_{in_j}^2} \right]^{1/2} \quad (18)$$

对于多节点情形, 为了方便, 我们仍然采用式(17)来计算源节点的传输功率, 并把这个算式用在 FA 算法中的链路代价的计算中. 因此, 对于链路  $(i, j)$  来说, 假定  $k$  是  $(i, j)$  的中继节点, 那么链路的能量消耗因子为

$$e(i, j) = \left[ \left( \frac{N_0^2}{b^2 \varepsilon \eta^2 \log_2 M} \cdot \frac{A^2 (E_k / E_i) d_{ik}^\alpha + B d_{jk}^\alpha}{(E_k / E_i) d_{ij}^{-\alpha}} \right)^{1/2} + P_s \right] T \quad (19)$$

节点  $i$  的期望生存期为

$$T_i = \frac{E_i}{T} \left[ \left( \frac{N_0^2}{b^2 \varepsilon \eta^2 \log_2 M} \cdot \frac{A^2 E_i^{-1} d_{ik}^\alpha + B E_k^{-1} d_{jk}^\alpha}{E_i^{-1} d_{ij}^{-\alpha}} \right)^{1/2} + P_s \right]^{-1} \quad (20)$$

对于中继选择来说,我们从式(20)可以看出,为了最大化生存期,源节点应该选择能使  $A^2 E_i^{-1} d_{ik}^\alpha + B E_k^{-1} d_{jk}^\alpha$  值最小的节点作为中继节点,同时根据(19)计算 FA 算法中的链路代价.因此协作网络中的 FA 算法(FA-Coop)描述如图 2 所示.算法复杂度为  $O(N^3)$ .

Initialization: $Cost(i) = 0, Parent(i) = i, e(i, j) = \frac{N_0 d_{ij}^\alpha}{4b\varepsilon\eta \log_2 M}$
Loop: <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Select the relay node for each link: <math>\hat{k} = \arg \min_{k \in N(i, j)} (A^2 d_{ik}^\alpha \frac{E_k}{E_i} + B d_{jk}^\alpha)</math></li> <li>2) Update the link cost: <math>e(i, j) = \left[ \frac{N_0^2}{b^2 \varepsilon \eta \log_2 M} \cdot \frac{(A^2 d_{ik}^\alpha \frac{E_k}{E_i} + B d_{jk}^\alpha)}{\frac{E_k}{E_i} d_{ij}^{-\alpha}} \right]^{1/2}</math></li> <li>3) Select the next hop node of the optimal route: <math>\hat{r} = \arg \min_{r \in R(i, d)} (Cost(r) + e(i, r)^{\alpha} \underline{E}_i^{-\alpha} E_i^{-\alpha})</math></li> <li>4) Broadcast the updated route cost: <math>Cost(i) = Cost(\hat{r}) + e(i, \hat{r})^{\alpha} \underline{E}_i^{-\alpha} E_i^{-\alpha}</math></li> <li>5) Allocate power: <math>P_i = e(i, r), P_{ik} = e(i, r) \frac{E_k}{E_i}</math></li> <li>6) In every update time: Goto 1)</li> </ol> End:

Fig.2 Description of FA-Coop algorithm

图 2 FA-Coop 算法描述

#### 4 仿真结果及其分析

我们采用 Matlab 仿真工具进行仿真.在以下仿真中,采用 BPSK 调制(MPSK 中的  $M=2$ ),传输损耗因子为  $\alpha=3$ ,天线因子为  $\eta=1$ ,误码率要求为  $\varepsilon=10^{-3}$ .每个源节点的处理功耗( $P_s$ )为节点传输功耗的 25%<sup>[23]</sup>.每个中继节点的处理功耗为源节点处理功耗的 50%.所有节点都使用相同的初始能量  $E_i=10^{-5}$ J.每一帧的持续时间为  $T=10$ ms.噪声功率谱为  $N_0=10^{-2}$ .节点在场景中是随机均匀分布的,目的节点在区域的正中央.

在图 3 中,我们考察的是在不同误码率要求下的网络生存期.在仿真中,100 个节点随机分布在  $100\text{m} \times 100\text{m}$  的方形区域内.在这些节点中,随机选取 30 个节点作为源节点发送数据.从图中我们可以看出,当误码率要求为  $10^{-7}$  时,协作网络和非协作网络的生存期都很小,这是因为每个节点都需要大量的传输功率来满足误码率的要求.当误码率要求放松时,网络生存期也随之增加,这是因为满足误码率要求的传输功率变小了.我们可以看到,采用 FA-Coop 算法的网络生存期要远大于采用 FA 算法的网络生存期.例如,当误码率要求为  $10^{-3}$  时,FA-Coop 算法的网络生存期是 FA 算法的网络生存期的  $4020/530=7.58$  倍.而当误码率要求为  $10^{-2}$  时,FA-Coop 对网络生存期的提升变小了.原因是在误码率为  $10^{-2}$  时,传输功率在总功率的比重变小了,更多的功率消耗在处理功率上.

图 4 中考察的是两种算法在不同的网络密度下的生存期.网络在  $100\text{m}\times 100\text{m}$  的方形区域内随机分布 50~100 个节点.在仿真中,我们让网络的总流量保持一定,也就是说,单个源节点的传输速率与网络密度成正比.误码率要求为  $10^{-3}$ .从图中我们可以看出,在不同的节点密度下,FA-Coop 算法的生存期都要大于 FA 算法的生存期.同时,协作网络和非协作网络的生存期都随着网络密度的增加而增加,这是由于随着节点密度的增加,节点间的平均传输距离减少了,因而传输功率也减少了.另外,随着节点密度的增加,协作网络的生存期增加得更快,这是因为随着节点密度的增加,源节点找到一个位置较好且剩余能量较多的节点的几率也大大增加了.

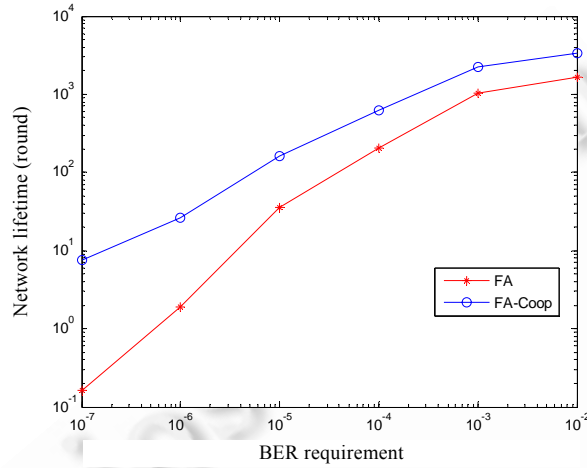


Fig.3 Comparison of network lifetime for FA and FA-Coop under different BER constraint

图 3 协作通信 FA 算法与非协作 FA 算法在不同误码率要求下的网络生存期对比

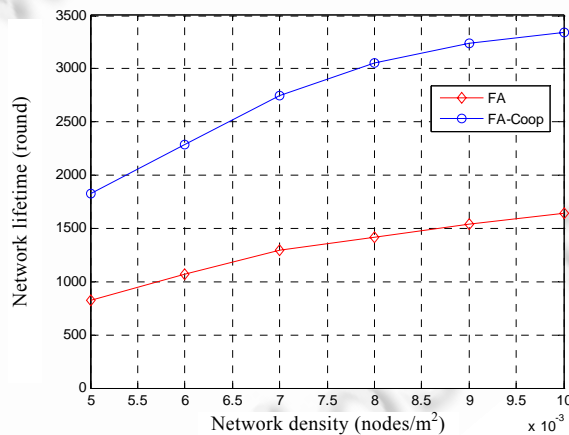


Fig.4 Comparison of network lifetime for FA and FA-Coop with different network size

图 4 协作通信 FA 算法与非协作 FA 算法在不同网络密度情况下的网络生存期对比

协作通信能增加网络生存期的原因有以下几个:首先,协作通信能减少单个节点的传输功耗,这是由于多个节点组成虚拟 MIMO,形成空间分集效果造成的;其次,对于一个特定的数据流,协作分集能使传输数据所需能耗分散在更多的节点上,因而能量在节点间分布更加均衡,传输数据;最后,对于负担较重的节点和能量即将耗尽的节点,协作通信能使数据流绕过这些节点,从而避免部分节点能量过快耗尽.

## 5 结束语

在本文中,我们提出了一种采用协作通信的最大化网络生存期的路由方法.通过引入解码中继协作通信方式,我们提出的算法综合考虑了路由、中继选择和功率分配方法来提高网络生存期.首先我们提出了如何在误码率约束条件下最大化协作通信网络的生存期的问题.由于是一个 NP 难的问题,因此我们在非协作网络的 FA 算法的基础上提出了一种次优的算法 FA-Coop.这种算法是通过计算协作节点的传输功率,并以节点剩余能量作为权重进行加权,得到一种可以分布式实施的启发式算法,具有较低的复杂度和可实施性.仿真结果表明,在误码率要求大于  $10^{-2}$  时,FA-Coop 算法的网络生存期是 FA 算法的 2 倍以上.并且随着误码率要求的增加和网络密度的加大,网络生存期的提升还会更大.协作通信不仅能够减少节点传输功率,而且也能使能量分布更加均匀,因此能够提高网络生存期.

### References:

- [1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramanian Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communication Magazine*, 2002,40: 102–114.
- [2] Toh CK. Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks. *IEEE Communications Magazine*, 2001,17:138–147.
- [3] Chang JH, Tassiulas L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2004,12: 609–619.
- [4] Zhang H, Hou J. On deriving the upper bound of lifetime for large sensor networks. In: *Proc. of the MobiHoc*. 2004. 121–132.
- [5] Floreen P, Kaski P, Kohonen J, Orponen P. Lifetime maximization for multicasting in energy-constrained wireless networks. *IEEE JSAC*, 2005,23:117–127.
- [6] Maric I, Yates RD. Cooperative multicast for maximum network lifetime. In: *Proc. of the Int'l Joint Conf. on Neural Networks*, Vol.21. 2002. 371–376.
- [7] Madan R, Cui S, Lall S, Goldsmith A. Cross-Layer design for lifetime maximization interference-limited wireless sensor networks. *IEEE Communications on Wireless Communications*, 2005,5:3142–3152.
- [8] Hong YW, Huang WJ, Chiu FH, Kuo CCJ. Cooperative communication in resource-constrained wireless networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007,2:47–57.
- [9] Laneman JN, Tse DNC, Wornell GW. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behaviour. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2004,50(12):3062–3080.
- [10] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User cooperation diversity—Part I. *IEEE Trans. on Communications*, 2003,51(11):1927–1948.
- [11] Hunter TE, Sanayei S, Nosratinia A. Outage analysis of coded cooperation. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2006,52(2): 375–391.
- [12] Su W, Sadek AK, Liu KJR. SER performance analysis and optimum power allocation for decode-and-forward cooperation protocol in wireless networks. In: *Proc. of the IEEE Conf. on Wireless Communication & Networking (WCNC)*, Vol.2. 2005. 984–989.
- [13] Sadek AK, Su W, Liu KJR. Multi-Node cooperative communications in wireless networks. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2007, 55(1):341–355.
- [14] Ibrahim AS, Sadek AK, Su W, Liu KJR. Relay selection in multi-node cooperative communications: When to cooperate and whom to cooperate with? In: *Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (Globecom 2006)*, Vol.7. 2006. 1–5.
- [15] Khandani AE, Modiano E, Zheng L, Abounadi J. Cooperative routing in wireless networks. In: Szymanski BK, Yener B, eds. *Advances in Pervasive Computing and Networking*. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [16] Ibrahim AS, Han Z, Liu KJR. Distributed energy-efficient cooperative routing in wireless networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2008,7(10):3930–3941.
- [17] Chen W, Letaief KB, Cao ZG. A unified cross-layer framework for resource allocation in cooperative networks. *IEEE Trans. on Wireless Communication*, 2008,7(8):3000–3009.
- [18] Zhai C, Liu J, Zheng L, Xu HJ. Lifetime maximization via a new cooperative MAC protocol in wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Conf. on Global Telecommunications (Globecom 2009)*, Vol.4. 2009. 1–5.



- [19] Huang WJ, Hong YW, Kuo CCJ. Lifetime maximization for amplify-and-forward cooperative networks. In: Proc. of the IEEE Conf. on Wireless Communication & Networking (WCNC), Vol.6. 2007. 815–819.
- [20] Han Z, Poor HV. Lifetime improvement in wireless sensor networks via collaborative beamforming and cooperative transmission. In: Proc. of the IEEE Conf. on Computer Communications (ICC), Vol.4. 2007. 2216–2220.
- [21] Pandana C, Siriwongpairat WP, Himsoon T, Liu KJR. Distributed cooperative routing algorithms for maximizing network lifetime. In: Proc. of the IEEE Conf. on Wireless Communication & Networking (WCNC), Vol.3. 2006. 451–456.
- [22] Himsoon T, Siriwongpairat WP, Han Z, Liu KJR. Lifetime maximization via cooperative nodes and relay deployment in wireless networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2007,25(2).
- [23] Sadek AK, Yu W, Liu KJR. On the energy efficiency of cooperative communications in wireless sensor networks. ACM Trans. on Sensor Networks, 2009,6(1).



陈永锐(1978—),男,湖南湘潭人,博士生,主要研究领域为无线传感器网络中的通信协议,数据的可靠传输.



易卫东(1959—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为无线传感器网络及其相关应用,MEMS 传感器,RF-MEMS,信号处理.