

一种协作和中继混合的传感网寿命最大化路由算法*

张霞, 周刚, 于宏毅

(信息工程大学, 河南 郑州 450002)

通讯作者: 张霞, E-mail: zhangxiaatzz@hotmail.com

摘要: 周期性监控、多对一数据传输是无线传感网的典型场景之一, 其中存在固有的能耗不均问题, 即与 sink 节点距离不同的节点能耗差异大, 严重缩短了网络寿命. 提出了一种基于协作和中继混合传输模式的路由方法, 利用协作和中继在远、近距离传输时能耗的互补性, 通过调整节点采用中继模式传输的负载比例(称为中继率), 均衡节点间的能耗, 延长网络寿命. 定量地描述了节点能耗和中继率的关系, 将网络寿命最大化建模为关于中继率矢量的高阶非线性优化问题. 为了求解该问题, 深入分析了寿命最大化时节点间能耗的关系, 得到的结论是: 若以中继模式传输单比特的能耗小于 sink 一跳邻节点的协作模式能耗, 则寿命最大化时所有节点能耗相等; 否则, 寿命最大化时节点中仅满足协作模式能耗大于中继模式的部分节点能耗相等. 由此将多元非线性的网络寿命最大化问题转化为关于单变量的优化问题, 求得了最优中继率. 利用理论分析结果设计了分布式路由算法 DORRCR. 仿真结果表明, 该算法能够有效延长网络寿命, 显著提高全网的能耗均衡性.

关键词: 无线传感器网络; 网络寿命; 协作通信; 路由算法; 中继率

中图法分类号: TN911 文献标识码: A

中文引用格式: 张霞, 周刚, 于宏毅. 一种协作和中继混合的传感网寿命最大化路由算法. 软件学报, 2013, 24(12): 2859-2870. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4380.htm>

英文引用格式: Zhang X, Zhou G, Yu HY. Cooperative and forwarding hybrid routing algorithm for network lifetime maximization in wireless sensor network. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013, 24(12): 2859-2870 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4380.htm>

Cooperative and Forwarding Hybrid Routing Algorithm for Network Lifetime Maximization in Wireless Sensor Network

ZHANG Xia, ZHOU Gang, YU Hong-Yi

(Information and Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Corresponding author: ZHANG Xia, E-mail: zhangxiaatzz@hotmail.com

Abstract: Periodic monitoring and many-to-one data transmission is one of the representative scenarios in wireless sensor networks where inherent uneven energy consumption problem exists, that is nodes with different distances away from sink have different energy consumptions and it seriously reduces network lifetime. A routing algorithm is proposed based on cooperative and forwarding hybrid transmission modes, which utilizes the complementary characteristic in energy consumption of cooperative and forwarding transmission over long and short distance, and balances nodes' energy consumption through tuning the traffic ratio transmit by non-cooperative mode (referred to as relay ratio). Network lifetime maximization (NLM) is modeled as optimization of relay ratio vector, which is a high order non-linear optimization problem of multiple variables. To solve this problem, theoretical analysis is carried out on node energy consumption when network lifetime is maximized and an important conclusion is reached: if bit-energy-consumption of forwarding mode is lower than that of cooperative mode of sink's one-hop neighbor, all nodes have equal energy consumption when network lifetime is maximized; otherwise, only nodes whose bit-energy-consumption of cooperative mode is higher than that of forwarding mode have equal energy consumptions. As a result, NLM, a high order non-linear optimization problem, is simplified into an optimization about single

* 基金项目: 国家自然科学基金(60872043); 国家科技重大专项(2010ZX03006-002, 2011ZX03005-003)

收稿时间: 2012-02-06; 修改时间: 2012-09-12; 定稿时间: 2013-01-25

variable. A distributed optimal relay ratio based routing algorithm (DORRCR) is designed based on the theoretical analysis. Simulation shows that, DORRCR prolongs network lifetime greatly compared with pure cooperative and non-cooperative energy balance routing protocols and evidently balances energy balance over the whole network.

Key words: wireless sensor networks; network lifetime; cooperative communication; routing algorithm; relay ratio

作为一种新型的信息采集手段,无线传感网(wireless sensor networks,简称 WSNs)在环境生态监控、精细农业、战场侦察等领域有巨大的应用潜力^[1].在 WSN 中,节点通常靠电池供电,单个节点能量受限,因此,提高能量有效性、延长网络寿命是 WSN 协议设计的重要原则之一^[2,3].网络寿命可以被定义为最先因能量耗尽而失效的传感器节点的生命期^[4].WSN 的应用场景很多,其中,所有节点以相同速率、周期地向唯一的数据汇聚节点(称为 sink)传输数据是一类典型场景^[5].这种场景下存在固有的能耗不均现象^[6]:如果节点采用较小发射功率、以多跳中继的方式传输数据,则距 sink 近的节点的中继负载重,能量消耗快;如果节点采用较大发射功率、以单跳的方式传输数据,则距 sink 远的节点传送单位数据的能耗高,能量消耗快.有研究者指出,在这种多对一场景中,网络死亡时可能有 90% 以上的能量未被利用^[7].可见,如何克服能耗不均、充分利用分布于网络各个区域的节点的能量,是延长 WSN 网络寿命的关键.

WSN 的能耗不均问题可以分成两类^[8]:如果将网络划分为以 sink 为中心、以单节点最大通信距离为半径的同心圆环,那么把同一环内、位置相近的节点之间的能耗差异称为横向不均;把距 sink 远近不同环的节点的能耗差异称为纵向不均.横向不均问题已经得到了较好的解决.文献[9]提出构造兼顾节点剩余能量和传输能耗的链路度量指标,把设计能耗均衡路由转化为最短路径问题.文献[8]利用退避机制令剩余能量较大者优先进行数据转发,平衡节点能耗.相比于横向不均,解决纵向不均问题更有挑战性.文献[10-12]研究了平面网络结构下的纵向能耗不均问题.文献[10]将路由协议与功率控制机制相结合,提出根据到 sink 的距离为每个节点确定最优发射功率及路由.文献[11]进一步提出节点应采用一组而非单一发射功率,并将寿命最大化问题转化为发射功率的优化问题,指出:随着传输距离增加,为了克服无线信道的衰落,节点发射功率急剧增加,因此,调整发射功率本质上以牺牲能量有效性为代价换取能耗均衡,对延长网络寿命的作用很小.文献[12]得到了与文献[11]类似的结论,并指出,当路径衰耗指数为 2 时,网络寿命最大化时纵向能耗不均不可避免.可见,在采用非协作传输时,难以有效实现纵向均衡,延长网络寿命.文献[13,14]分析了分簇 WSN 中的纵向能耗不均问题.文献[13]针对距离 sink 近的簇首中继负载重、能耗高的问题设计了不均匀分簇方法,根据到 sink 的距离设定簇的规模,使距 sink 较近的簇包含节点较少、距 sink 较远的簇包含节点较多,以补偿不同位置的节点之间簇内和簇间通信能耗,延长网络寿命.文献[14]在此基础上,设计了基于节点剩余能量的簇首选择方法,并在选择中继簇首时综合考虑节点剩余能量、簇内通信代价和簇间通信代价.

协作通信是近年来无线通信领域的研究热点之一,它是指多个节点协作地完成信息发射或接收的相关技术^[15,16].协作通信在能耗方面表现出与非协作通信不同的特性.以协作发射为例,在远距离传输时,协作模式下,多协作点产生的多条径在接收端合并,由于多条径具有独立性,协作能够比非协作更有效地对抗无线信道衰落,因此,协作模式的能耗远低于非协作;在近距离传输时,由于多个节点的参与而消耗了更多的电路能量,协作模式的能耗往往高于非协作^[17].在 WSN 中,采用协作/非协作混合传输模式,利用协作和非协作通信的互补性,将有可能更好地克服能耗不均问题,延长网络寿命.这成为本文研究的出发点.

利用协作通信解决 WSN 能耗均衡问题的研究可以分成两类:

- ① 以能耗均衡为目标的协作节点间功率分配;
- ② 通过混合使用协作、非协作传输模式延长网络寿命.

文献[17,18]属于第 1 类.文献[17]提出将协作通信和能量感知路由相结合,先找到最小能耗路径,然后在路径的每一跳以协作传输取代非协作传输,以能耗均衡为目标在协作节点中进行功率分配.文献[18]在放大转发协作通信模式下研究了类似问题.上述文献解决的是横向均衡问题.文献[19,20]的研究属于第 2 类,研究了节点数据产生速率确定和随机情况下的路由策略.文献[19,20]假定不存在阴影衰落和多径效应,而衰落信道在 WSN 应用环境中十分普遍,对网络寿命的影响较大^[21,22],上述研究的应用范围受到限制.

本文研究衰落信道下,协作和中继混合的 WSN 网络寿命最大化路由.首先,定量描述一定误码率下协作和非协作传输模式的能耗,为采用混合传输模式延长网络寿命提供理论依据.然后,阐述在混合模式下通过调整采用中继传输模式的比例(即中继率)、均衡节点能耗的思路,建立网络寿命和中继率关系的数学模型,通过分析网络寿命最大化时节点间能耗关系,求解最优中继率.最后,基于理论分析结果设计分布式的网络寿命最大化路由算法,并通过仿真评估其性能.

为了便于分析,首先介绍本文的基本假设.WSN 由 N 个节点组成,节点均匀、随机分布在半径为 R 的区域内, sink 位于网络中心.无线信道服从瑞利衰落,路径衰耗指数为 n ,噪声功率谱密度为 n_0 .所有节点同构,节点的初始能量为 e_0 .所有节点周期地向 sink 发送采集信息;发射功率可调,最大通信距离为 d_0 ;非协作模式采用二进制 DPSK 调制、差分相干解调;协作模式采用多输入单输出(multi-input-single-output,简称 MISO)协作发射技术,接收端信道估计理想、发射端信道信息未知;为满足通信可靠性要求,每次传输时,接收端误码率不高于 V .

1 协作与非协作传输的能耗模型

节点的能耗包括感知、计算和无线传输能耗等,其中,感知和计算能耗一般远远小于无线通信能耗^[23],因此,仅考虑无线传输能耗.文献[23]给出了非协作下无线传输能耗模型,然而其并未显式地体现误码率对能耗的影响.本节在给定误码率要求的条件下计算非协作和协作传输的能耗,然后对二者进行比较,为采用协作和非协作混合传输模式提供理论依据.

1.1 非协作模式的能耗模型

单比特无线传输的能耗包含发送和接收能耗两部分,分别记为 E_t 和 E_r .非协作模式下可以表示为

$$\left. \begin{aligned} E_t &= E_{e1} + E_a \\ E_r &= E_{e2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, E_{e1} 和 E_{e2} 分别是发、收电路能耗,与误码率等无关,通常取 $E_{e1}=E_{e2}=\varepsilon_e E_a$ 是功率放大器能耗,由误码率决定.下面分析误码率与 E_a 的关系,进而计算非协作模式的能耗.设发端的信号为 $s(t)=\omega\phi(t)$,其中, $\phi(t)$ 是承载信息的部分, $|\phi(t)|=1$, ω 是发端的功率放大系数.收端的信号为 $r(t)=\alpha e^{j\theta} \omega\phi(t) + \eta(t)$,其中 α 和 θ 分别表示幅度衰减系数和相位增量, $\eta(t)$ 是噪声. α 通常取 $d^{-n/2}$ (d 是传输距离, n 是路径衰耗指数).因此,接收端平均信噪比为公式(2),其中, B 是信号带宽.

$$\bar{\gamma} = d^{-n} \omega^2 / (n_0 B) \quad (2)$$

令瞬时信噪比为 γ ,其概率密度函数为 $p_{\bar{\gamma}}(\gamma) = \exp(-\gamma/\bar{\gamma})/\bar{\gamma}$.在 DPSK 调制、相干解调下,误码率和瞬时信噪比的关系为 $p_e = \exp(-\gamma)/2$ ^[24],因此,平均误码率为 $P_e = \int_0^{+\infty} p_{\bar{\gamma}}(\gamma) \exp(-\gamma)/2 d\gamma = (1 + \bar{\gamma})^{-1}/2$.为满足误码率要求,有 $\bar{\gamma} \geq (2V)^{-1} - 1$.根据公式(2)可得发端功率放大器的能耗为 $E_a = ((2V)^{-1} - 1)n_0 d^n$,于是在误码率要求 V 下,非协作模式的能耗为

$$E^{(n)} = 2\varepsilon_e + n_0 [(2V)^{-1} - 1] d^n \quad (3)$$

1.2 协作模式的能耗

协作发射一般包括两个步骤:协作发起者向参与者分发原始信息,即信息分发;所有节点协作地向接收节点发送信息,即协作发送.信息分发的过程是非协作的广播,其能耗类似于公式(3),区别在于这里有多多个接收者.假设 m 个节点参与协作,这些节点分布在以协作发起者为中心、 d_c 为半径的区域内.为使参与协作的节点接收原始信息时均能满足误码率要求 V ,源节点按与协作节点之间可能的最大距离(即协作范围 d_c)设定发送功率,则信息分发的能耗可以表示为公式(4).在 WSN 中,由于节点密度高、可在较小范围内找到足够多的协作节点,因此令路径衰减指数取 2.

$$E_1^{(c)} = m\varepsilon_e + n_0 [(2V)^{-1} - 1] d_c^2 \quad (4)$$

协作发送的方式很多,本文以相干协作发射为例讨论.相干协作发射是指参与协作的节点同步地广播相同

信息,多条径在接收端相干叠加^[17,25].

设发端第 i 个节点的信号为 $s_i(t)=\alpha_i\phi(t)$,收端的信号为 $r(t)=\sum_{i=1}^m\alpha_i\omega_i e^{j\theta}\phi(t)+\eta(t)$.其中, α_i,ω_i 分别为第 i 条径的幅度衰减和第 i 个节点的功放系数, θ 是相位增量,在相干协作下各条径具有相同的相位增量.由于协作节点之间的距离远小于到接收端的距离,可近似认为各条径的传输距离均为 d ,则 $\alpha_i=d^{-n/2}$.因此,收端信噪比为

$$\bar{\gamma} = \left(\sum_{i=1}^m \omega_i \right)^2 d^{-n} / n_0 B.$$

为了满足误码率要求,有 $\left(\sum_{i=1}^m \omega_i \right)^2 d^{-n} / n_0 B \geq (2V)^{-1} - 1$.整理可得

$$\sum_{i=1}^m \omega_i \geq (((2V)^{-1} - 1)n_0 B d^n)^{1/2} \tag{5}$$

协作发射的总功率应为满足公式(5)约束下的最小值,即

$$\text{Minimize} \sum_{i=1}^m \omega_i^2 \quad \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^m \omega_i \geq (((2V)^{-1} - 1)n_0 B d^n)^{1/2} \tag{6}$$

利用拉格朗日乘法求解公式(6)得到协作发射的最小能量为

$$E_2^{(c)} = (m+1)\epsilon_e + ((2V)^{-1} - 1)n_0 d^n / m \tag{7}$$

相应的 ω_i 为

$$\omega_i = (((2V)^{-1} - 1)n_0 R d^n)^{1/2} / m \tag{8}$$

将两个步骤的能耗相加,可以得到协作模式下满足误码率要求时的能耗

$$E^{(c)} = (2m+1)\epsilon_e + n_0 [(2V)^{-1} - 1]d_c^2 + ((2V)^{-1} - 1)n_0 d^n / m \tag{9}$$

图 1 比较了协作与非协作模式下传输单位比特数据的能耗,其中, a 和 b 分别是 V 取 $1e-3$ 和 $1e-5$ 的情况.

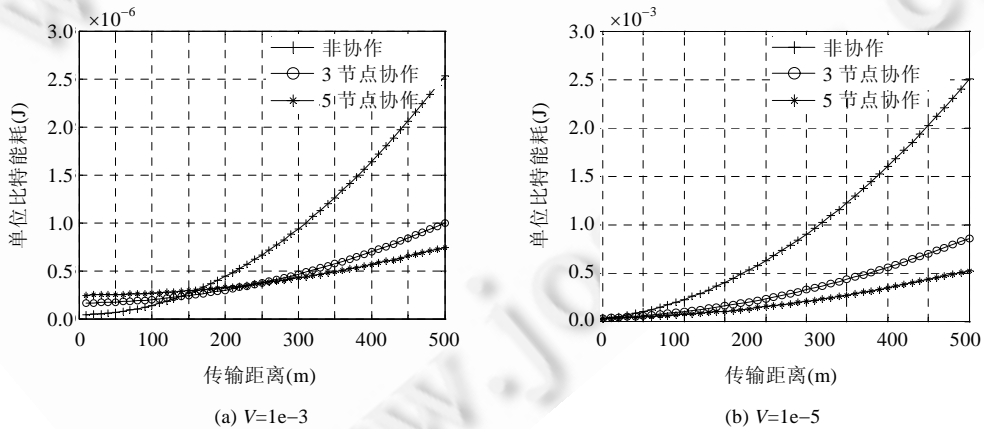


Fig.1 Bit_energy_consumption comparison of cooperative and non-cooperative transmission

图 1 协作和非协作比特传输能耗的比较

在传输距离小时,非协作能耗低于协作;而随传输距离增加,非协作能耗的增长快,超过了协作模式.结合公式(3)和公式(9)不难发现,对任何模式,单位比特的能耗均由电路能耗和功率放大器能耗两部分构成;协作模式的功放能耗是非协作时的 $1/m$,而电路能耗是非协作时的 $2m+1$ 倍.当远距离传输、功放能耗在总能耗中占主要部分时,协作比非协作更节能,且随传输距离增加协作模式的优势越明显;而当近距离传输、电路能耗占主要部分时,非协作比协作更节能.

2 基于最优中继率的协作/中继混合路由

非协作传输在通信距离较大时能耗过高,单纯地调整发射功率虽然降低了靠近 sink 的节点负载,但是加速了距 sink 较远节点的死亡,因此并不能有效地延长网络寿命.而通过第 1 节的分析可知,协作传输在远距离传输时的能耗约为非协作的 $1/m$ (其中, m 是参与协作的节点数),比非协作的能量效率更高.如果在 WSN 中将协作与中继模式相结合,则可以利用二者在能耗方面的互补性:节点将部分负载通过多跳中继的方式向靠近 sink 的节点传输,将其余数据通过与邻近节点协作直接向 sink 传输,既避免了距 sink 近的节点负载过重,又避免了距 sink 远的节点直接传输时能耗过高,通过调整采用中继和协作方式传输的负载比例,可以克服或减轻到 sink 远近不同节点之间的能耗不均,达到延长网络寿命的目的.

因此,针对周期性监测、多对一的 WSN 中能耗不均问题,本文提出采用协作和中继混合的路由方法.其基本思想如图 2 所示.根据节点到 sink 距离的不同,把网络划分为 K 个宽度为 d_0 的环,按到 sink 距离由近及远称为第 1 环到第 K 环.节点以两种模式传输数据:向靠近 sink 的相邻环中的节点发送,称为中继;与相邻节点协作向 sink 发送,称为协作.为简化分析,假设中继模式下采用固定功率,传输距离为 d_0 ;协作模式下采用 m 个节点协作,数据被直接传送到 sink,第 i 环的节点以相同的概率选择中继方式.记第 i 环的中继率为 β_i ,令 $\mathbf{B}=[\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_K]$. $\beta_i=0$, 则第 i 环采用纯协作模式; $\beta_i=1$, 则第 i 环采用纯中继模式.

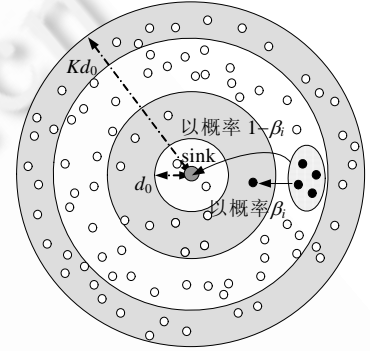


Fig.2 Cooperative and forwarding hybrid routing model

图 2 协作与中继混合路由模型

下面首先计算节点传输单位比特的能耗以及其负载,进而得到节点在一轮中的能耗.在此基础上,建立网络寿命的数学模型,然后通过求解该模型得到网络寿命最大化的路由方法.

2.1 基于中继率的网络寿命数学模型

在第 i 环上任取一个节点 v , 把它到 sink 的距离记为 x . x 是均匀分布在 $(i-1)d_0$ 和 id_0 之间的随机变量.根据公式(4)可以得到其采用中继模式传输单位比特的能耗,记为 e_f :

$$e_f = 2\varepsilon_e + n_0[(2V)^{-1} - 1]d_0^n \tag{10}$$

根据公式(9)可以计算其在协作模式下传输单位比特的能耗 $e_v^{(c)}$:

$$e_v^{(c)} = (2m+1)\varepsilon_e + n_0[(2V)^{-1} - 1]d_c^2 + ((2V)^{-1} - 1)n_0x^n/m \tag{11}$$

由于 v 的任意性,第 i 环上节点以协作模式传输单位比特的平均能耗(记为 $e_c(i)$)是 $e_v^{(c)}$ 的数学期望:

$$e_c(i) = E[e_v^{(c)}] = (2m+1)\varepsilon_e + n_0[(2V)^{-1} - 1]d_c^2 + ((2V)^{-1} - 1)n_0 \frac{2d_0^n(i^{n+2} - (i-1)^{n+2})}{(2i-1)(n+2)m} \tag{12}$$

这样,在协作/中继混合路由下,第 i 环节点发送 1 比特平均消耗的能量 e_i 可以表示为

$$e_i = e_f\beta_i + e_c(i)(1-\beta_i) \tag{13}$$

对第 i 环($i < K$)上的节点,其负载包括本节点采集的数据和为第 k 环($i < k \leq K$)节点转发的数据.由于所有节点在一轮内传输的数据量相同,在下面的分析中,不妨设每轮、每节点发送 1 比特.假设来自第 k 环的负载均匀地由第 i 环的每个节点承担(这可以通过横向能耗均衡策略实现^[8]),那么第 i 环上平均每个节点需要为第 k 环($k > i$)的节点转发的负载 $l_k(i)$ 为

$$l_k(i) = \frac{2k-1}{2i-1} \prod_{j=i+1}^k \beta_j, i=1, \dots, K-1 \tag{14}$$

因此,第 i 环内平均每节点的负载 $l(i)$ 为

$$l(i) = \begin{cases} \left(\sum_{k=i+1}^K \frac{2k-1}{2i-1} \prod_{j=i+1}^k \beta_j \right) + 1, & i = 1, \dots, K-1 \\ 1, & i = K \end{cases} \quad (15)$$

根据公式(13)和公式(15),可以得到第 i 环的节点一轮的平均能耗为

$$E_i(\beta_i) = \begin{cases} (e_f \beta_i + e_c(i)(1-\beta_i)) \left(\sum_{k=i+1}^K \frac{2k-1}{2i-1} \prod_{j=i+1}^k \beta_j \right) + ((e_f - \varepsilon_e) \beta_i + e_c(i)(1-\beta_i)), & i = 1, \dots, K-1 \\ (e_f - \varepsilon_e) \beta_i + e_c(i)(1-\beta_i), & i = K \end{cases} \quad (16)$$

由于 $e_f \gg \varepsilon_e$, 令 $e_f \approx e_f - \varepsilon_e$, 公式(16)简化为

$$E_i(\beta_i) = \begin{cases} (e_f \beta_i + e_c(i)(1-\beta_i)) \left(\left(\sum_{k=i+1}^K \frac{2k-1}{2i-1} \prod_{j=i+1}^k \beta_j \right) + 1 \right), & i = 1, \dots, K-1 \\ e_f \beta_i + e_c(i)(1-\beta_i), & i = K \end{cases} \quad (17)$$

结合公式(10)、公式(12)和公式(17)可以发现,在给定的误码率要求、能耗参数和路径损耗指数的条件下, E_i 仅与中继率有关.又由于网络寿命由所有节点中能耗最大的决定,即 $T_{net} = \min\{e_0/E_i, 1 \leq i \leq K\}$.因此,网络寿命最大化(network lifetime maximization,简称 NLM)问题可以建模为中继率矢量 \mathbf{B} 的最优化问题,如公式(18)所示.

$$\max T_{net} = \min_{i=1, \dots, K; \mathbf{B}} \max\{e_0/E_i\}, \text{ s.t. } 0 \leq \beta_i \leq 1 \quad (18)$$

2.2 网络寿命最大化时各环能耗关系及最优中继率

根据第 2.1 节, NLM 是关于 β_1, \dots, β_K 多元高阶非线性优化问题,直接求解十分困难.下面从物理意义上分析 \mathbf{B} 如何对各环的节点能耗和网络寿命产生影响,寻找求解该问题的方法.

若 $e_f < e_c(i)$,那么对第 i 环($i \geq 2$)增大 β_i 可降低 E_i ,而这样做的同时也增加了第 j 环($j < i$)的负载,从而增加了 E_j .这意味着, β_i 实质上起到调节 E_i 和 $E_j(j < i)$ 的作用.可以推断,当网络寿命最大化时,对第 j 环($j < i$)有 $E_i = E_j$;反之,若 $e_f > e_c(i)$,应取采用纯协作模式(即 $\beta_i = 0$),因为这样不仅能降低 E_i ,而且能减少第 j 环($j < i$)的负载,从而降低 E_j .此时, β_i 不具有调节 E_i 和 $E_j(j < i)$ 的作用,也即当网络寿命最大化时无法达到所有节点能耗相等.

在 WSN 中, e_f 是常数, $e_c(i)$ 随 i 的增加而增加,这说明 e_f 和 $e_c(i)$ 大小关系是不确定的.下面需要分成 $e_f < e_c(1)$, $e_c(i) < e_f < e_c(i+1)$ 和 $e_f > e_c(K)$ 这 3 种情形加以讨论.在此之前,先证明对网络寿命最大化时各环能耗关系的推断.

引理 1. 若 $e_f < e_c(i)$,则对第 i 环和第 $i+1$ 环有如下结论:

- ① 当 $E_i > E_{i+1}$ 时, $\beta_{i+1} > 0$;
- ② 当 $E_i < E_{i+1}$ 时, $\beta_{i+1} < 1$.

证明:用反证法证明引理中的结论①.根据定义, $0 \leq \beta_{i+1} \leq 1$.假设 $\beta_{i+1} = 0$,则由公式(15), $l_{i+1} > l_i = 1$.

又由于 $e_c(i+1) > e_c(i) > e_f$ 而 $E_{i+1} = e_c(i+1)l_{i+1}$, $E_i = [e_f \beta_i + e_c(i)(1-\beta_i)]l_i < e_c(i)l_i$.因此, $E_{i+1} > E_i$,与假设不符,结论成立.

结论②的证明与此类似,故略去. □

引理 2. 若 $e_f < e_c(i)$,则网络寿命最大化时,有 $E_1 \leq \dots \leq E_{K-1} \leq E_K$ 成立.

证明:用反证法.假设当网络寿命最大化时存在 $i(1 \leq i \leq K-1)$,使得 $E_i > E_{i+1}$,且 $E_i = \max\{E_k, 1 \leq k \leq K\}$,则根据引理 1, $\beta_{i+1} > 0$.由此,减小 β_{i+1} 可减小 l_i ,从而减小 E_i .这意味着可以进一步延长网络寿命,与假设不符.由于 i 的任意性,命题得证. □

定理 1. 若 $e_f < e_c(i)$,达到 T_{net} 最大化时, $E_i = E_{i+1} = \dots = E_K$.

证明:根据引理 2,在题设条件下有 $E_1 \leq \dots \leq E_{K-1} \leq E_K$.下面用反证法证明对任意的 $j(1 \leq j \leq K-1)$, $E_j < E_{j+1}$ 不成立.假设 $E_j < E_{j+1}$,且 $E_j = \max\{E_k, 1 \leq k \leq K\}$.根据引理 1 的结论②,有 $\beta_j < 1$.那么增大 β_j ,则降低 E_j ,从而延长网络寿命,这与假设此时达到 T_{net} 最大化不符.由于 j 的任意性,命题得证. □

定理 1 意味着,在协作和中继混合模式下:

- 如果 $e_f < e_c(1)$,那么网络寿命达到最大时,所有节点能耗相等;

- 如果 $e_c(i) < e_f < e_c(i+1)$, 则网络寿命达到最大时从第 i 环到最外环的节点能耗相等。

这为求解网络寿命最大化时的中继率提供了帮助。

2.2.1 $e_f < e_c(1) < \dots < e_c(K)$ 的情形

根据定理 1, 网络寿命最大化时有 $E_1 = E_2 = \dots = E_K$ 。又由于第 1 环选择何种方式传输并不影响其他环的能耗, 应该选最节能的传输方式, 即在 $e_f < e_c(1)$ 时 $\beta_1 = 1$ 。由此得到关于 β_2, \dots, β_K 的方程组如下:

$$\begin{cases} \left(\sum_{k=i+1}^K \frac{2k-1}{2i-1} \prod_{j=i+1}^k \beta_j + 1 \right) (\beta_i e_f + (1-\beta_i) e_c(i)) = \beta_K e_f + (1-\beta_K) e_c(K), & i=2, \dots, K-1 \\ \left(\sum_{k=2}^K (2k-1) \prod_{j=2}^k \beta_j + 1 \right) e_f = \beta_K e_f + (1-\beta_K) e_c(K) \end{cases} \quad (19)$$

整理公式(19), 可以将 $\beta_2, \beta_3, \dots, \beta_{K-1}$ 表示为 β_K 的函数, 进而把求解多元、高阶非线性优化问题转化为一个一元方程的求解问题。又由于 $0 \leq \beta_K \leq 1$, 可以采用搜索的办法方便的得到最优解。

2.2.2 $e_c(1) < \dots < e_c(i) < e_f < e_c(i+1) < \dots < e_c(K)$ 的情形

定理 2. 如果 $e_c(i) \leq e_f$, 那么在网络寿命达到最大化时 $\beta_i = 0$, 即第 i 环采用纯协作模式。

证明: 对第 i 环内的节点, 采用纯协作模式不会增加其他环内节点的负载, 即不会增加其他环节点的能耗; 同时, 由于 $e_c(i) \leq e_f$, 采用纯协作将降低本节点的能耗。因此, 命题得证。□

根据定理 2, 寿命最大时, 第 1 环到第 i 环应采用纯协作模式, 即 $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_i = 0$ 。由此, $l(1) = l(2) = \dots = l(i-1) = 1$, 而第 i 环负载 $l(i) = l(i+1) \beta_{i+1} + 1 \geq 1$, 又由于 $\{e_c(i)\}$ 是关于 i 单调递增的, 因此寿命最大时, $E_1 < E_2 < \dots < E_i$ 。另一方面, 根据定理 1, 寿命最大时有 $E_{i+1} = E_{i+2} = \dots = E_K$, 然而无法确定 E_i 和 E_K 的关系。这样, 中继率最优化可以转化为关于单变量的优化问题: 寻找 β_K , 在满足 $E_{i+1} = E_{i+2} = \dots = E_K$ 的条件下, 最小化 E_K 和 E_i 中的最大值, 见公式(20)。

$$\left. \begin{array}{l} \text{Minimize } \max\{E_K, E_i\} \\ \text{s.t. } \quad E_j = E_K, \quad j = i+1, \dots, K-1 \\ \quad \quad E_K = e_f \beta_K + e_c(K)(1-\beta_K) \\ \quad \quad E_i = e_c(i) l(i) \\ \quad \quad 0 < \beta_k < 1, \quad k = 1, \dots, K \\ \quad \quad l(i) = f(\beta_K) \end{array} \right\} \quad (20)$$

由于 β_K 分布于 $[0, 1]$, 可通过搜索得到 β_K , 然后, 基于 $E_{i+1} = E_{i+2} = \dots = E_K$ 求解 β_{i+1} 到 β_{K-1} 。

2.2.3 $e_f > e_c(K)$ 的情形

根据定理 2, 在 $e_f \geq e_c(K)$ 的条件下, 所有节点都应选择纯协作模式, 距离 sink 越远能耗越大, 网络寿命就是第 K 环的寿命, 网络达到寿命最大化时各环的能耗不相等, 混合传输模式退化为纯协作, 即

$$\beta_i = 0, \quad i = 1, \dots, K, \quad E_i = e_c(i), \quad i = 1, \dots, K \quad (21)$$

综上, 本文得到网络能耗均衡、寿命最大化以及传输模式的一些结论:

- ① 在中继模式能耗小于所有环的协作模式能耗时, 所有节点应采用协作和中继的混合模式; 网络寿命最大化时, 可将所有能量资源用尽, 即网络达到绝对纵向均衡;
- ② 当中继能耗介于第 i 环和第 $i+1$ 环协作能耗之间时, 第 $i+1$ 到第 K 环应选择混合模式, 第 1 环到第 i 环采用纯协作模式; 网络死亡时第 $i+1$ 环到第 K 环能耗用尽, 而其余环有剩余能量, 距 sink 越近剩余能量比例越高, 此时, 网络仅达到部分的纵向均衡。

3 分布式路由算法 DORRCR

本节利用理论分析结果设计分布式路由算法——基于最优中继率的分布式路由(distributed optimal relay ratio based cooperative and forward routing, 简称 DORRCR)。该算法将网络运行时间划分为组网期和工作期。在组网期, sink 计算最优中继率并向网络中的节点发布, 节点以分布式方式计算中继路径和组成协作组; 在工作期, 节点根据选定的工作模式和参数向 sink 传输数据。DORRCR 具有分布式的特点; 控制消息为 $O(N)$, 因此控制复杂

度低;算法不需要地理位置信息的辅助,降低了节点成本,也避免了由定位误差引入性能下降.

3.1 组网期

3.1.1 组网消息的分发

网络部署后,sink 根据网络范围、能耗参数、系统误码率要求、平均噪声功率等计算最优中继率,并在 d_0 (即环宽)内广播 Setup 消息.Setup 中除包含最优中继率外,还有距 sink 的跳数和序列号.节点接收 Setup 后提取中继率信息,并记录到 sink 的跳数以及转发该消息的节点,这是节点到 sink 的中继路径中的可能的下一跳节点;节点可能收到 Setup 消息的多个副本,为避免形成广播风暴,仅在首次接收后转发(这可以通过 ID 和序列号判断^[26]),对其他副本,仅记录可能的下一跳节点.

3.1.2 中继路径的选择

除第 1 环外,其余环的节点需要确定中继路径上的下一跳节点.用 $CF(v)$ 表示节点 v 的可能的下一跳节点集合,一般有 $\|CF(v)\| > 1$.为避免横向能耗不均,在选择下一跳时,节点随机等待 T_1 .

$$T_1 = r(0, \|CF(v)\|) t_0 \quad (22)$$

其中, t_0 是发送一条控制消息的时间, $r(x, y)$ 表示在 x 和 y 之间的随机数.在 T_1 内,节点记录 $CF(v)$ 内节点被选择的次数;在 T_1 后,选取 $CF(v)$ 中被选择次数最小作为中继路径的下一跳,并向其发送 CONNECT 消息.这样, $\|CF(i)\|$ 较少的节点将尽早确定下一跳节点.注意到,确切获得节点被选择的次数需要额外的控制开销,为了减少控制开销, DORRCR 中以节点接收到的其他节点发送的 CONNECT 消息近似估算.

3.1.3 协作组的构造

为了进行协作传输,需要将网络中每 m 个节点分成一组,这类似于分群^[23]:随机选择一组节点成为协作群首,其他节点根据一定准则加入协作组,成为协作成员.与之不同,根据第 2 节的理论分析,这里要求:① 组长在网络中均匀分布;② 每个协作组包含 m 个节点.

由 m 可计算参与协作节点的分布范围为 $d_c = R\sqrt{m/N}$, 其中, N 和 R 分别是网络节点数和网络半径.为实现要求①,如果节点的 d_c 范围已经存在协作群首,则自动成为协作成员.若节点的 d_c 范围可能存在多个协作群首,称为可行群首.为实现要求②,采用类似于第 3.1.2 节的做法:节点随机等待 $T_2 = r(0, \|CL(i)\|) t_1$, 其中, t_1 是发送一个“加入(JOIN)”消息的时间, $CL(i)$ 是节点 i 周围可能的协作群首的数量.

3.2 数据传输

在工作期,节点采集到数据后,根据自己所在环确定相应的最优中继率,依概率选择一种模式.协作传输方式可以灵活选择:一种方法是所有节点把数据传送给协作群首,由它广播原始信息,然后协作组内节点协作发送;还可以由协作群首规定顺序,由协作成员轮流组织协作发送.

4 仿真和性能分析

本节通过仿真评估 DORRCR 的性能.采用 Matlab 平台,仿真环境设置与参数取值见表 1.

Table 1 Simulation environment settings

表 1 仿真环境和参数

名称	参数	
网络	半径 R (m) 节点密度	200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000 通信半径内 60 个节点
业务	周期性,每轮数据回传	1bit
信道	平均噪声功率 n_0 (W/Hz) 误码率 V	$2e-14$ $1e-3, 1e-5$
能耗参数	电路能耗 ϵ_c (J/bit) 初始能量(J)	$2e-8$ 1
协作参数	协作节点数 m	3

假设存在 MAC 协议,能够避免节点接入信道时的冲突.考察网络寿命和剩余能量比例两个指标.网络寿命

定义为从网络开始运行到第 1 个节点失效所经过的轮数,剩余能量比例定义为网络死亡时剩余总能量和初始总能量之比。

选择了非协作能耗均衡路由(non-cooperative energy balance routing,简称 NCEBR)和纯协作路由(pure cooperative routing,简称 PCR)作为比较的对象.NCEBR 构造以 sink 为根的数据收集树时,通过设置延时定时器实现能耗均衡^[8];PCR 则是所有节点均以协作模式传输的情况,可以看做 DORRCR 在 $B=0$ 时的特例。

如前所述, e_f 和 $e_c(i)$ (其中, $1 \leq i \leq K$)相对大小不同,算法将采用不同方式求解最优中继率,进而影响网络寿命。而给定网络规模和节点能耗参数时, e_f 和 $e_c(i)$ 是路径衰耗指数 n 和误码率 V 的函数。下面在一组典型的 n 和 V 下计算 e_f 和 $e_c(i)$,结果见表 2,其中:① 当 $n=2$ 和 $V=1e-3$ 时, $e_f < e_c(1)$;② $n=2$ 和 $V=1e-5$ 、 $n=4$ 和 $V=1e-3$ 、 $n=4$ 和 $V=1e-5$ 时, $e_c(i) < e_f < e_c(i+1)$ 。为节省篇幅,下面在 $n=2, V=1e-3$ 和 $n=2, V=1e-5$ 两种典型条件下仿真。

Table 2 Relation between e_f and $e_c(i)$ under representative path loss exponents and bit-error-rates

表 2 典型路径衰耗指数和误码率下 e_f 和 $e_c(i)$ 关系

	$n=2, V=1e-3$	$n=2, V=1e-5$	$n=4, V=1e-3$	$n=4, V=1e-5$
e_f	1.40e-007	e_f 1.004e-005	e_f 9.98e-04	e_f 0.1
$e_c(1)$	1.61e-07	$e_c(1)$ 2.21e-06	$e_c(1)$ 1.11e-04	$e_c(1)$ 0.01
$e_c(2)$	2.27e-07	$e_c(2)$ 8.87e-06	$e_c(2)$ 23.29e-04	$e_c(2)$ 0.23
$e_c(3)$	3.6e-07	$e_c(3)$ 2.22e-05	$e_c(3)$ 147.48e-04	$e_c(3)$ 1.48
$e_c(4)$	5.6e-07	$e_c(4)$ 4.22e-05	$e_c(4)$ 533.378e-04	$e_c(4)$ 5.34

4.1 $e_f < e_c(1)$ 时的仿真

在低路径衰耗指数和低误码率要求,即 $n=2, V=1e-3$ 时,有 $e_f < e_c(1)$ 。根据第 2.2.1 节,网络寿命最大化时所有节点均应采用混合传输模式。最优中继率见表 3。图 3 是 DORRCR 与其他算法的比较。

Table 3 Optimal relay ratio when $e_f < e_c(1)$

表 3 $e_f < e_c(1)$ 时的最优中继率表

网络半径	中继率									
	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
R (m)	1	0.172 4	-	-	-	-	-	-	-	-
200	1	0.259 6	0.277 5	-	-	-	-	-	-	-
300	1	0.364 2	0.411 7	0.312 8	-	-	-	-	-	-
400	1	0.426 0	0.512 0	0.486 5	0.346 5	-	-	-	-	-
500	1	0.521 2	0.317 2	0.576 1	0.587 3	0.471 1	-	-	-	-
600	1	0.554 7	0.344 1	0.649 3	0.629 1	0.620 3	0.505 4	-	-	-
700	1	0.593 4	0.373 1	0.723 4	0.680 8	0.726 6	0.737 8	0.682 3	-	-
800	1	0.807 3	0.709 1	0.851 2	0.840 1	0.831 8	0.849 8	0.787 7	0.558 8	-
900	1	0.606	0.386	0.743 7	0.696 8	0.765 3	0.763 7	0.706 5	0.753 8	0.581 7
1 000	1	0.606	0.386	0.743 7	0.696 8	0.765 3	0.763 7	0.706 5	0.753 8	0.581 7

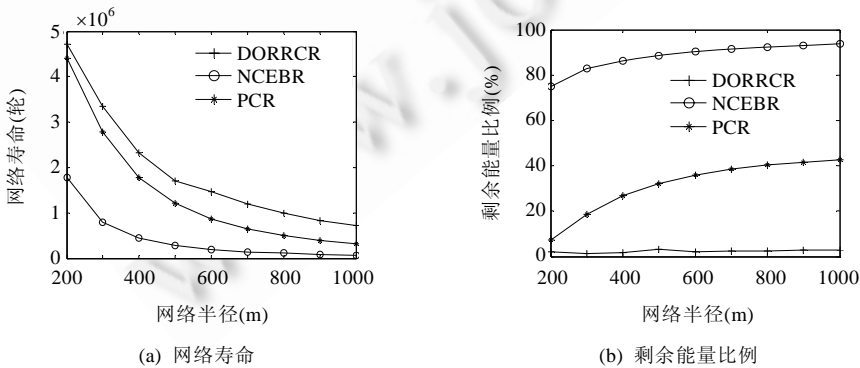


Fig.3 Routing algorithm performance comparison when $V=1e-3, n=2$

图 3 $V=1e-3, n=2$ 时路由算法的性能比较

由图 3(a)得知网络寿命随半径增加而减小;DORRCR 优于 NCEBR,且半径越大优势越明显,当 R 分别为

200m 和 1 000m 时,DORRCR 的网络寿命分别是 NCEBR 的 1.64 倍和 8.98 倍.结合图 3(b)可见,NCEBR 存在严重的能耗不均,在网络死亡时有 75%~93.8%的剩余能量.这是由于距离 sink 近的节点的负载过高,能量消耗速度大,影响了网络寿命.PCR 的网络寿命在网络半径较小时与 DORRCR 相当,但随半径增加,PCR 剩余能量比例急剧增加,在半径 1 000m 时,网络死亡时有接近一半的能量未被使用(剩余能量比例达 42.7%),寿命仅是 DORRCR 的 44%.这是由于 PCR 下,距 sink 最远的环上的节点能耗过高,而距 sink 近的节点的能量不能被有效利用.DORRCR 的剩余能量比例没有明显变化且均低于 5%,符合理论分析结果.图 3 说明,通过合理地混合使用中继和协作两种传输模式,能高效利用距 sink 远近不同的节点的能量,延长网络寿命.

4.2 $e_c(i) < e_f < e_c(i+1)$ 时的仿真

在 $n=2, V=1e-5$ 时, $e_c(2) < e_f < e_c(3)$. 根据第 2.2.2 节,网络寿命最大化时,第 1 环和第 2 环的节点应采用纯协作模式,而其余节点应采用混合模式.最优中继率见表 4.

Table 4 Optimal relay ratio when $e_c(2) < e_f < e_c(3)$

表 4 $e_c(2) < e_f < e_c(3)$ 时的最优中继率表

网络半径	中继率									
R (m)	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
200	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
300	0	0	0.494	-	-	-	-	-	-	-
400	0	0	0.633 8	0.528 7	-	-	-	-	-	-
500	0	0	0.696 5	0.666 5	0.562 9	-	-	-	-	-
600	0	0	0.728 4	0.731 8	0.699	0.590 6	-	-	-	-
700	0	0	0.752 6	0.762 3	0.758 7	0.723 9	0.613 1	-	-	-
800	0	0	0.766 1	0.790 7	0.782 3	0.746 3	0.784 9	0.634 3	-	-
900	0	0	0.777	0.812 2	0.797	0.800 5	0.814 7	0.760 3	0.648 1	-
1 000	0	0	0.784 5	0.831 8	0.807 1	0.830 8	0.826 2	0.814 2	0.772 9	0.660 9

图 4 是采用最优中继率时,DORRCR 的性能随网络半径 R 变化的情况以及与其他算法的比较.由于误码率要求的提高,本组仿真中网络寿命比前一组仿真有明显下降.从图 4(a)中可以看到,当 R 为 200m 时,DORRCR 和 PCR 的性能一致.这是由于 $e_c(2) < e_f$,根据第 2.2.3 节,DORRCR 退化为 PCR.同时,引入协作的路由算法的网络寿命均远远高于非协作路由 NCEBR.随着 R 的增加,DORRCR 和 PCR 的网络寿命都有所下降,但是 PCR 的下降速度高于 DORRCR.当 R 为 1 000m 时,DORRCR 的网络寿命是 PCR 的 2.7 倍,是 NCEBR 的 9.2 倍.由图 4(b)看到,随 R 的增加,DORRCR 的剩余能量比例逐步降低.这是由于当 $R > 300$ 时,对 $e_f < e_c(i)$ 的环,通过采用协作和中继混合模式,其能耗几乎可用尽,网络的总剩余能量来自于第 1 环和第 2 环,而随着 R 的增加,这部分占总能量的比例在降低.

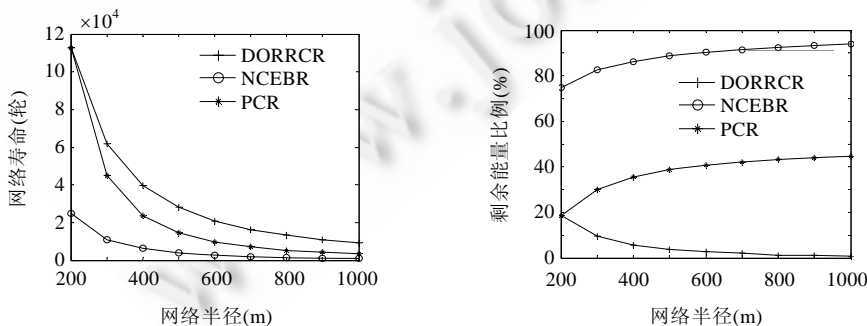


Fig.4 Routing algorithm performance comparison when $e_c(2) < e_f < e_c(3)$

图 4 $e_c(2) < e_f < e_c(3)$ 时路由算法的性能比较

5 结束语

本文研究了周期监测、多对一业务模式下 WSN 的网络寿命最大化问题,提出了通过采用中继、协作混合的路由策略以均衡能耗、延长网络寿命,建立了基于最优中继率的网络寿命数学模型,通过深入分析网络寿命最大化和各环节能耗相等的关系,得到了关于网络寿命最大化和节点能量的关系的结论,并以此为基础求解了最优中继率.设计了基于最优中继率的分布式的网络寿命最大化路由 DORRCR.该算法具有复杂度较低、易于分布式实现的特点.仿真结果表明,在不同网络半径下,DORRCR 相对于非协作路由 NCEBR 和纯协作路由 PCR 均明显延长网络寿命,网络死亡时剩余能量比例显著低于 NCEBR 和 PCR,获得了更好的能耗均衡效果.因此,DORRCR 在能量受限的 WSN 中具有较高实用价值.

今后将考虑节点密度非均匀的条件下网络寿命最大化问题,并讨论协作节点数、协作半径对算法性能的影响.此外,还将讨论协作和中继混合的路由机制与非均匀分簇相结合,以进一步延长网络寿命.

References:

- [1] Akyildiz IF, Su WL, Sankarasubramaniam Y, Cayircidic E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8):102–114. [doi: 10.1109/MCOM.2002.1024422]
- [2] Gatzianas M, Georgiadis L. A distributed algorithm for maximum lifetime routing in sensor networks with mobile sink. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2008,7(3):984–994. [doi: 10.1109/TWC.2008.060727]
- [3] Chang JH, Tassiulas L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2004,8(12):609–619. [doi: 10.1109/TNET.2004.833122]
- [4] Chen YX, Chuah CN, Zhao Q. Network configuration for optimal utilization efficiency of wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2008,1(6):92–107. [doi: 10.1016/j.adhoc.09.001]
- [5] Mainwaring A, Polastre J, Szewczyk R, Culler D, Anderson J. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In: *Proc. of the 1st ACM Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*. New York: ACM Press, 2002. 88–97. [doi: 10.1145/570738.570751]
- [6] Wu XB, Chen GH. The energy hole problem of nonuniform node distribution in wireless sensor networks. *Chinese Journal of Computers*, 2008,31(2):253–261 (in Chinese with English abstract).
- [7] Lian J, Naik K, Agnew GB. Modeling and enhancing the data capacity of wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Monograph on Sensor Network Operations*. New York: IEEE Press, 2004. 91–183. [doi: 10.1.1.72.519]
- [8] Lee DW, Kim JH, Ko YB. An energy balanced data dissemination scheme for lifetime extension in wireless sensor networks. In: *Proc. of the Wireless Networks and Emerging Technologies*. Banff: ACTA Press, 2005. 1–8.
- [9] Yu Y, Govindan R, Estrin D. Geographical and energy aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. Technical Report, UCLA/CSD-TR-01-0023, UCLA, 2001. 1–11.
- [10] Howitt I, Wang J. Energy balanced chain in distributed sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf.* Atlanta: IEEE Press, 2004. [doi: 10.1109/WCNC.2004.1311812]
- [11] Perillo M, Cheng Z, Heinzelman WD. On the problem of unbalanced load distribution in wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Global Telecommunication Conf.* Dallas: IEEE Press, 2004. 74–79. [doi: 10.1109/GLOCOMMW.2004.1417552]
- [12] Olariu S, Stojmenovic I. Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer and Communications*. Barcelona: IEEE Press, 2006. 1–12. [doi: 10.1109/INOFCON.2006.269]
- [13] Li CF, Ye M, Chen GH, Wu J. An energy-efficient unequal clustering mechanism for wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Mobile Adhoc and Sensor Systems*. Washington, 2005. 597–604. [doi: 10.1109/MAHSS.2005.1542849]
- [14] Jiang CJ, Shi WR, Tang XL, Wang P, Xiang M. Energy-Balanced unequal clustering routing protocol for wireless sensor networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2012,23(5):1222–1232 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4061.html> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04061]
- [15] Laneman JN. Cooperative diversity in wireless networks, algorithms and architectures [Ph.D. Thesis]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2002.

- [16] Guo JH. On key technologies in generalized cooperative communication [Ph.D. Thesis]. Zhengzhou: Information and Engineering University, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [17] Khandani AE, Abounadi J, Modiano E, Zheng LZ. Cooperative routing in wireless networks. In: Proc. of the Allerton Conf. on Communication, Control, and Computing. 2003. 1270–1279.
- [18] Pandana C, Siriwongpairat WP, Himsoon T, Liu KJR. Distributed cooperative routing algorithms for maximizing network lifetime. In: Proc. of the Wireless Communication and Networking Conf. IEEE Press, 2006. 451–456. [doi: 10.1109/WCNC.2006.1683506]
- [19] Huang WJ, Hong YW, Yao WH, Kuo CCJ. Lifetime maximization for amplify-and-forward cooperative networks. In: Proc. of the Wireless Communication and Networking Conf. Hong Kong: IEE Press, 2007. 1–10. [doi: 10.1109/WCNC.2007.155]
- [20] Han Z, Poor HV. Lifetime improvement in wireless sensor networks via collaborative beamforming and cooperative transmission. In: Proc. of the ICC 2007. Glasgow: IEEE Press, 2007. 3954–3958. [doi: 10.1109/ICC.2007.651]
- [21] 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 Communications, 2007,25(2):306–317. [doi: 10.1109/JSAC.2007.070207]
- [22] Zhou G, He T, Krishnamurthy S, Stankovic JA. Impact of radio irregularity on wireless sensor networks. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM Press, 2004. 1225–138. [doi: 10.1145/990064.990081]
- [23] Heinzelman WR, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocol for wireless microsensor network. In: Proc. of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences. Hawaii: IEEE Press, 2002. 3005–3014.
- [24] Fan CX, Cao LN. Communication Principle. 6th ed., Beijing: National Defense and Industry Publishing House, 2010. 209–210 (in Chinese).
- [25] Zhang X, Yu HY, Yang BW. On energy efficient coherent cooperative routing in WSN. Computer Technology, 2009,35(12):14–16 (in Chinese with English abstract).
- [26] Perkins CE, Royer EM. Ad-Hoc on-demand distance vector routing. In: Proc. of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Systems and Applications, the 2nd IEEE Workshop on Mobile Systems and Applications. 1999. 90–100. [doi: 10.1109/MCSA.1999.749281]

附中文参考文献:

- [6] 吴小兵,陈贵海.无线传感器网络中节点非均匀分布的能量空洞问题.计算机学报,2008,31(2):253–261.
- [14] 蒋畅江,石为人,唐贤伦,王平,向敏.能量均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由协议.软件学报,2012,23(5):1222–1232. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4061.html> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04061]
- [16] 郭金淮.广义协作通信若干关键问题研究[博士学位论文].郑州:信息工程大学,2008.
- [24] 樊昌信,曹丽娜.通信原理.第6版,北京:国防工业出版社,2010.209–210.
- [25] 张霞,于宏毅,杨白薇.WSN 相干协作路由的能量有效性研究.计算机工程,2009,35(12):14–16.



张霞(1979—),女,山东济南人,博士,讲师,主要研究领域为无线传感网网络协议优化.
E-mail: zhangxiaatzz@hotmail.com



于宏毅(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为传感器网络,通信中的信号处理.
E-mail: maxyucn@sohu.com



周刚(1974—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为网络协议设计,数据挖掘技术.
E-mail: gzhougzhou@gmail.com