

无线传感器网络中基于最优转发集的协作式编码传输协议

丁 旭, 吴晓蓓, 王力立, 张新宇, 夏 昕

(南京理工大学自动化学院, 江苏南京 210094)

摘 要: 针对当前大多数数据传输协议没有充分利用无线信道的广播特性这一问题, 本文提出了基于网络编码的机会路由协议 NCOR (Network Coding based Opportunistic Routing protocol). 首先, 通过分析网络端到端传输代价, 本文提出了最优转发集构造机制以最小化传输代价. 此后, NCOR 在转发集内执行节点协作式编码传输以保证传输可靠性. 最后, 理论分析了 NCOR 的传输可靠性结论. 仿真实验表明 NCOR 可适用于不同的链路环境, 且在保证可靠传输的同时, 大幅降低了网络能耗.

关键词: 无线传感器网络; 传输代价; 最优转发集; 协作编码传输

中图分类号: TP393.02

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2019)07-1584-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.07.025

Optimal Forwarding Set Based Cooperative Coding Transmission Protocol in Wireless Sensor Networks

DING Xu, WU Xiao-bei, WANG Li-li, ZHANG Xin-yu, XIA Xin

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: At present, most data transmission protocols do not make full use of the broadcast nature of wireless channels. To address this problem, this paper proposes a network coding based opportunistic routing protocol (NCOR). Firstly, by analyzing the end-to-end transmission cost of the network, a mechanism for constructing the optimal forwarding set is proposed to minimize the transmission cost. Then, NCOR performs cooperative coding transmission among nodes in the forwarding set to ensure transmission reliability. Finally, the transmission reliability of NCOR is analyzed theoretically. Simulation results show that NCOR can be applied to different link environments, and it can greatly reduce the network energy consumption while ensuring reliable transmission.

Key words: wireless sensor networks; transmission cost; optimal forwarding list; cooperative coding transmission

1 引言

当前, 设计高效 (高可靠、高能效、低时延等) 的端到端路由协议是无线传感器网络研究的热点^[1]. 传统的最短路径协议和多路径协议仍采用点到点的传输方式而没有充分利用无线信道的广播特性, 造成较低的带宽利用率^[1].

机会路由^[2~4]机制 (Opportunistic Routing, OR) 充分利用了无线信道的广播特性. 在数据传输前, 节点无需选择具体的转发节点而只需维护候选转发节点集 (Forwarding List, FL), 相比传统方案, OR 可有效降低重传次数并提高网络吞吐量^[2]. 然而, OR 机制需实现严格的调度机制以选择最终转发节点, 这带来了额外的负

担并降低了网络性能.

网络编码 (Network Coding, NC)^[5,6] 解决了这一问题, 提高了传输可靠性并降低网络拥塞和时延. 不同于传统数据传输的“Store-Forward”机制, NC 机制先编码数据包后再广播发送, 减缓了传统方法中数据副本过多而造成较低的带宽利用率^[5]并提高了传输可靠性和网络吞吐量.

综合上述优劣势, 本文提出了基于 NC 的机会式数据传输机制 (NC-based Opportunistic Routing, NCOR). 主要贡献包括: (1) 通过分析 NCOR 的端到端传输代价 (Transmission Cost, TC), 选择各节点的最优转发集 (Optimal FL, OFL), 以此构建了适用于协作通信的机会路由; (2) 在构建的路由框架中, 提出了 FL 内各节点分工

协作的编码传输机制,在充分利用无线信道广播特性的同时,降低数据包副本传输且保证了传输的可靠性。

2 相关工作

已有的机会路由和 NC 研究中,EEOR^[3]针对节点固定功率和可调功率两种情况,分析了网络端到端传输代价,并以最小化传输代价为目标构建最优 FL. ORR^[4]研究了占空比网络中的机会路由,通过占空比指标和网络拓扑预测转发代价,并在此基础上计算最优转发节点集.当高优先级节点转发数据时,低优先级节点需丢弃侦听到的数据包,造成了能量的浪费。

文献[7]设计了基于跨层 NC 感知的节能路由算法 CAER,将网络编码感知、拓扑控制以及覆盖控制相结合以挖掘潜在编码机会.文献[8]综述了机会式编码传输的已有基础和相关进展,并着重分析了联合方案性能较好和较差的应用场景.文献[9]通过与传统端到端编码方案、链路级重传方案等对比,研究了机会式网络编码传输方案的性能提升效果.文献[10]研究了链路相关性对机会式编码传输的影响,提出了最大化吞吐量及平衡信道利用率的优化问题.EROR^[11]设计了基于节点剩余能量和收发包能耗的传输代价指标,并基于此选择最优候选转发集.但在研究代价指标时,并未考虑 ACK 反馈及代价更新操作的通信代价. INCOR^[12]研究了流间 inter-NC 下机会式路由协议,但其只研究了两跳网络中节点间的数据交换,不具备普适性。

3 网络模型

假设 N 个节点随机分布在网络中,网络模型表示为 $G=(V,E)$,其中 V 为节点集, E 为链路集.对任意节点 $i, j \in V$, $\exists e_{ij} \in E$, 则节点 i, j 可互相通信且链路质量为 $p_{ij} \in (0, 1]$. 节点通信半径 R_s , 各节点维护一个邻居表 NeiTable, NeiTable 中包含节点 $i \in V$ 的邻居集 N_i 及对应邻节点的链路质量 $p_{ik}, k \in N_i$.

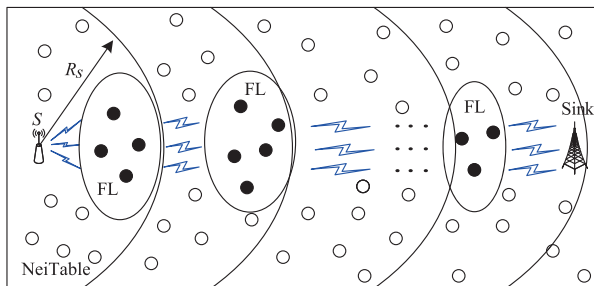


图1 NCOR网络模型

图 1 为 NCOR 的网络模型,设定数据包按轮次进行周期性传输^[13],源节点 S 每轮向 sink 传输 K 个数据包.每轮传输时,源节点 S 确定编码包数并广播生成的编码

包;节点 S 的邻节点均侦听编码包,当邻节点 $i \in N_s$ 收到包后,首先判断其是否在 S 的候选转发集 FL_s 中:若 $i \in FL_s$, 则节点 i 存储此包,否则直接丢包; S 传输完成后,其 FL_s 内各转发节点相互通信一个消息包(Message Packet, MP), MP 中包含此节点的接收包数及传输代价(定义 1); FL 中具有最小传输代价的节点 j 当选为主传节点,以 j 的候选集 FL_j 作为下一跳转发集;为保证传输可靠性, FL_s 中其它节点协同主传节点 j 传输一定数量的编码包;最后, sink 接收上跳传来的编码包并执行解码操作。

定义 1 (传输代价) 任一节点 $i \in V$ 的传输代价 TC_i 是指节点 i 传输期望数量的数据包到 sink 的期望通信次数。

4 最优转发集

4.1 传输代价

如第 3 节所述,节点 i 的传输代价 TC_i 主要包括:(1)节点 i 传输期望数量的编码包到其转发集 FL_i 的一跳广播代价 $b(FL_i)$; (2) FL_i 内候选节点的 MP 包通信代价 $m(FL_i)$; (3) FL_i 到 sink 的剩余传输代价 $R(FL_i)$. 因此 TC_i 表示为

$$TC_i(FL_i) = b(FL_i) + m(FL_i) + R(FL_i) \quad (1)$$

最优转发集 FL_i^* 需满足: $FL_i^* = \arg \min_{FL_i \subseteq N_i} TC_i$.

设节点 $j \in FL_i$ 被选为主传节点的概率为 Q_{ij} 且其最小传输代价为 $TC_j(FL_j^*)$, 则式(1)转为

$$\begin{aligned} FL_i^* &= \arg \min_{FL_i \subseteq N_i} [b(FL_i) + m(FL_i) + R(FL_i)] \\ &= \arg \min_{FL_i \subseteq N_i} [b(FL_i) + m(FL_i) \\ &\quad + \sum_{j \in FL_i} Q_{ij} \times TC_j(FL_j^*)] \end{aligned} \quad (2)$$

4.1.1 一跳广播代价 $b(FL_i)$

NC 理论中,为保证 K 个编码包之间线性无关而需要的平均编码包数量^[14]为

$$N_q = \sum_{k=1}^K (1 - q^{-k})^{-1} \quad (3)$$

其中, q 为伽罗瓦域(Galois field)大小。

由于 FL_i 中所有节点均会侦听信道,节点 i 每发送一次编码包, FL_i 中至少有一个节点接收的概率为 $1 - \prod_{j \in FL_i} (1 - p_{ij})$. 因此, $b(FL_i)$ 表示为

$$b(FL_i) = N_q / \left(1 - \prod_{j \in FL_i} (1 - p_{ij}) \right) \quad (4)$$

4.1.2 MP 包通信代价 $m(FL_i)$

FL_i 中节点需互相发送 MP 包以确定主传节点.为确保代价函数的统一,需标准化 MP 包与编码包的传输数,设 MP 包长度与编码包长度的比率为 σ ($\sigma \ll 1$). 由于 FL_i 中任一节点 a 的 MP 包被 FL_i 内其它节点接收的概率为 $\sum_{j \in FL_i, j \neq a} p_{aj}$, 为保证其它节点能顺利接收 MP 包,

节点 a 需要的广播次数 θ_a 为

$$\theta_a = \frac{1}{\prod_{j \in FL_i \setminus \{a\}} p_{aj}} \quad (5)$$

因此 FL_i 中 MP 包通信代价 $m(FL_i)$ 为

$$m(FL_i) = \frac{\sigma \times \sum_{a \in FL_i} \theta_a}{1 - \prod_{j \in FL_i} (1 - p_{ij})} \quad (6)$$

式(6)是在 FL 集中至少存在一个节点接收到编码包这一条件下, FL 中节点互相广播 MP 包的期望传输次数, 其中 σ 将 MP 包传输次数归一化到编码包长度的尺寸下。

由于 FL_i 内节点数 $|FL_i|$ 较少 ($|FL_i| \ll N_i$, 见第 6 节) 且相邻节点间控制包传输的成功率较高^[6], 为简化运算, 本文近似 $\theta_a \rightarrow 1$ 得到 $m(FL_i)$ 为

$$m(FL_i) = \frac{\sigma \times |FL_i|}{1 - \prod_{j \in FL_i} (1 - p_{ij})} \quad (7)$$

由式(7)可知, 为最小化传输代价 TC, 需限制转发集大小 $|FL_i|$ 以降低 $m(FL_i)$. 因此直观上而言, 考虑 $m(FL_i)$ 代价可制约转发集的大小, 防止其过大而消耗过多不必要的能量, 第 6 节仿真验证了这一结论。

4.1.3 剩余传输代价 $R(FL_i)$

由第 3 节主传节点的选取规则可知, 当满足传输代价 $TC_k < TC_j$ 的所有节点 $k \in FL_i$ 均未接收到编码包而节点 j 接收到包时, j 选为主传节点. 考虑链路质量 p_{ik} , 则满足上述条件的所有节点 $k \in FL_i$ 均未接收到包的概率为 $\prod_{k \in FL_i, TC_k < TC_j} (1 - p_{ik})$, 因此节点 $j \in FL_i$ 为主传节点的概率 q_{ij} 为

$$q_{ij} = p_{ij} \prod_{k \in FL_i, TC_k < TC_j} (1 - p_{ik}) \quad (8)$$

式(8)成立的基础条件是 FL_i 中至少有一个节点收到节点 i 的编码包, 因此式(2)中:

$$Q_{ij} = \frac{q_{ij}}{1 - \prod_{j \in FL_i} (1 - p_{ij})} = \frac{p_{ij} \prod_{k \in FL_i, TC_k < TC_j} (1 - p_{ik})}{1 - \prod_{j \in FL_i} (1 - p_{ij})} \quad (9)$$

$$R(FL_i) = \sum_{j \in FL_i} Q_{ij} \times TC_j(FL_i^*) = \frac{\sum_{j=1}^{|FL_i|} TC_j(FL_i^*) \cdot p_{ij} \cdot \prod_{k \in FL_i, TC_k < TC_j} (1 - p_{ik})}{1 - \prod_{j \in FL_i} (1 - p_{ij})} \quad (10)$$

因此, 节点 i 的期望传输代价 TC_i 为

$$TC_i(FL_i) = \frac{N_q}{(1 - \prod_{j \in FL_i} (1 - p_{ij}))} + \frac{\sigma \times |FL_i|}{1 - \prod_{j \in FL_i} (1 - p_{ij})}$$

$$+ \frac{\sum_{j=1}^{|FL_i|} TC_j(FL_i^*) \cdot p_{ij} \cdot \prod_{k \in FL_i, TC_k < TC_j} (1 - p_{ik})}{1 - \prod_{j \in FL_i} (1 - p_{ij})} \quad (11)$$

4.2 最优转发集 OFL

定义 2 (代价因子 δ) 设 N_i 和 FL_i 分别为节点 i 的邻居集和转发集, 节点 $j \in FL_i$ 的传输代价为 TC_j , 链路质量为 p_{ij} , 则任一链路质量为 p_{ik} 的节点 $k \in N_i$ 的代价因子 δ_k 为

$$\delta_k = \frac{\sigma}{p_{ik} \prod_{j \in FL_i} (1 - p_{ij})}.$$

定理 1 设节点 i 最优转发集为 FL_i^* , 节点 $k \in N_i$ 的传输代价为 TC_k , 如果存在 $TC_k < TC_i(FL_i^*) - \delta_k$, 则满足

$$TC_k < TC_i(FL_i^* \cup \{k\}) < TC_i(FL_i^*).$$

引理 1 若节点 $k \in N_i$ 满足

$$TC_k > TC_i(FL_i^*) - \delta_k,$$

则 $TC_k < TC_i(FL_i^* \cup \{k\}) < TC_i(FL_i^*)$.

根据上述定理, 节点 i 将其邻居内节点 $j \in N_i$ 按传输代价增序排列并依次添加到 FL_i 中, 每添加一次则执行如下判断法则: 当任一邻节点 k 的添加导致节点 i 的 TC_i 增大, 则节点 k 及剩余未加入的邻节点无需再加入 FL_i 中, 此时得到的 FL_i 集即为节点 i 的最优转发集 FL_i^* .

算法 1 给出了任一节点 i 构造最优转发集 FL_i^* 的伪代码, 具体解释如下。

初始时设定 TC_{sink} 为 0, 其余各节点的 TC 均为 ∞ 且转发集为 $NULL$; 节点 i 的邻居表 N_i 中包含其邻节点 j 的 p_{ij} 及 TC_j ; 步 2 中, 节点 i 执行算法 $OFL(i, N_i, TC_i, FL_i)$ 以更新 TC_i 及 FL_i ; 若此时 TC_i 得到更新, 则节点 i 向其邻居广播新的 TC_i (步 3 ~ 5); 同时, 节点 i 会持续侦听信道 (步 6), 当收到邻节点 j 传输的 TC_j 后, 节点 i 将收到的新 TC_j 与邻居表中已储存的 TC_j 对比, 若小于储存值, 则节点 i 更新 N_i 中对应节点 j 的 TC_j (步 7 ~ 9); 上述操作持续进行直到 TC_i 和 FL_i 不再变化, 此时即可得到自身转发集信息 (步 10)。

算法 1 节点 i 的最优转发集构造过程

初始化: $G(V, E); TC_i = \infty, FL_i = NULL, i \in V; TC_{\text{sink}} = 0$

1. Repeat;
2. 执行 $OFL(i, N_i, TC_i, FL_i)$, 更新 TC_i 和 FL_i ;
3. If (TC_i 已更新)
4. 节点 i 向其邻居广播新生成的 TC_i ;
5. End If
6. 节点 i 侦听信道, 以接收邻节点 $j \in N_i$ 广播的 TC_j ;
7. If (接收到的 $TC_j <$ 已储存的 TC_j)
8. 节点 i 更新其邻居表内储存的 TC_j ;

9. End If
10. Until 节点 i 的 TC_i 及 FL_i 恒定

$OFL(i, N_i, TC_i, FL_i)$ 算法:

- 输入: $N_i = \{n_1, n_2, \dots, n_{|N_i|}\}$ 其中 $TC_{n_1} \leq TC_{n_2} \leq \dots \leq TC_{n_{|N_i|}}$
11. For $j = 1$ to $|N_i|$
12. If $(TC_j + \delta_j < TC_i)$
13. $FL_i = FL_i \cup \{n_j\}$ 根据式(11)更新 $TC_i = TC_i(FL_i)$;
14. Else FL_i 与 TC_i 维持不变;
15. End If
16. End For

网络中任意节点均执行类似的转发集构造过程,故算法具有分布式特性.对算法 1 进行分析,节点 i 在每次迭代时均与邻节点进行通信,设 $t_{\max}$ 为算法迭代次数(即节点 i 的广播次数),故其通信复杂度为 $O(t_{\max} \cdot |N_i|)$,其中 $|N_i|$ 为节点 i 的邻节点数.

5 NCOR 协议设计与分析

5.1 协议设计

5.1.1 源节点编码传输

源节点 S 发送 K 个源数据包 $X = [x_1, x_2, \dots, x_K]$ 到 sink, S 到 FL_S 内节点的链路质量为 $p_{sj}, j \in FL_S$, 则由式(4)可知, S 传输的编码包数为 $\tilde{M}_S = N_q / \left(1 - \prod_j (1 - p_{sj})\right)$. S 从伽罗瓦域 $GF(q)$ 中随机选取 $\tilde{M}_S$ 个编码向量 $q_l = [q_{l1}, q_{l2}, \dots, q_{lk}]$ 并将 K 个源数据包编码为 $\tilde{M}_S$ 个编码包 $y_l (l = 1, 2, \dots, \tilde{M}_S)$:

$$y_l = q_l X = \sum_{a=1}^K q_{la} x_a, l = 1, 2, \dots, \tilde{M}_S \quad (12)$$

源节点 S 如图 2 封装 $\tilde{M}_S$ 个编码包,其中,

$$\begin{aligned} Src &= S, FL = FL_S, M = \tilde{M}_S, \\ SeqNo. &= l (l = 1, 2, \dots, \tilde{M}_S), \\ CV &= q_l, Coded_Data = y_l. \end{aligned}$$

此后, S 依次向邻节点广播生成的编码包. 各邻节点 j 侦听信道, 当收到编码包后, j 首先检查此包中 FL_S 位, 若 $j \in FL_S$, 则存储此包; 否则直接丢弃.

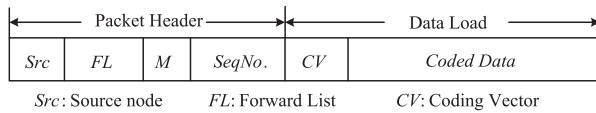


图2 编码包格式

5.1.2 中继转发集再编码传输

各节点 $h \in FL_i$ 接收节点 i 传来的编码包, 并维护存储队列 $RecvQueue()$; 当节点 i 传输完成后, FL_i 中节点互相广播 MP 包以确定主传节点. 若 FL_i 内某一节点无法接收到其它节点的 MP 包, 则无需发送自身 MP 包且不参与传输.

此后, FL_i 内节点执行协作转发操作: (1) 设节点 j 为主传节点, 其直接将设定数量的编码包传给自身转发集 FL_j ; (2) 其它节点 h 根据收到的 MP 包中 FL_j 字段来确定 FL_j 中是否存在节点是节点 h 的邻节点, 若存在, 则节点 h 执行编码包传输, 反之则无需传输.

NCOR 根据式(13)设置 FL_i 内任一节点 h 的实际传输包数 M_h 为

$$M_h = \begin{cases} \min\left(\left\lfloor \frac{z_h}{\sum_{h \in FL_i \setminus \{j\}} z_h} \cdot \tilde{M}_j + \varphi_h \right\rfloor, z_h\right), & h \neq j \\ \min(K, Z_h), & h = j \end{cases} \quad (13)$$

其中, Z_h 为接收包数, $\tilde{M}_j$ 是节点 j 的理论传输数, $\lfloor \cdot \rfloor$ 是向下取整, 随机数 φ_h 见式(14), 即节点接收包数越多, 则有越大概率多传一个包以增加解码成功率.

$$\varphi_h = \begin{cases} 0, & rand[0, Z_h/K] < 0.5 \\ 1, & rand[0, Z_h/K] \geq 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

式(13)限制了主传节点 j 的编码包数, 其无需传输 $\tilde{M}_j$ 个编码包, 而通过 FL_i 内其它节点的协作传输以提高可靠性.

此后 FL_i 内节点即可根据自身 $RecvQueue()$ 中的接收包及传输数执行再编码传输操作并向下一跳转发集 FL_j 依次广播编码包.

5.1.3 sink 收包解码操作

Sink 只需维护存储队列 $RecvQueue()$ 以接收网络中传来的编码包, 当收到 K 个线性无关的编码包后, sink 执行 Gauss-Jordan 消除法^[5] 解码得到源数据 X .

5.2 传输可靠性分析

定义 3 (传输成功率 TSR) 数据包由源节点编码传输到 sink 后能成功解码的概率.

考虑 $FL_i \rightarrow FL_j$ 的传输过程, 设 FL_i 集传输的编码包标号集为 $\mathbb{Z}_i = \{1, 2, \dots, M_{FL}^i\}$, 其中 $M_{FL}^i = \sum_{h \in FL_i} M_h$, 任一编码包 $a \in \mathbb{Z}_i$ 对应一个链路成功率 p_a , 若 a 由节点 $h \in FL_i$ 发出, 则 $p_a = 1 - \prod_{l \in FL_j} (1 - p_{hl})$ 表示包 a 被下一跳转发集 FL_j 中至少一个节点接收的概率; 设 FL_j 集接收到的编码包标号集为 $\mathcal{R}_i$, 则 $\mathcal{R}_i \in \mathbb{Z}_i$. 因此, 编码包集 $\mathcal{R}_i$ 被成功传输到 FL_j 集的概率为 $\prod_{a \in \mathcal{R}_i} p_a \cdot \prod_{a \in \mathbb{Z}_i \setminus \mathcal{R}_i} (1 - p_a)$, 考虑到 $\mathcal{R}_i$ 可能是空集 ($|\mathcal{R}_i| = 0$) 或全集 ($\mathcal{R}_i = \mathbb{Z}_i$) 或任意包含于 $\mathbb{Z}_i$ 的集合, 则综合所有情况下编码包集 $\mathcal{R}_i$ 被成功接收的概率 $P_{\mathcal{R}_i}$ 为

$$P_{\mathcal{R}_i} = \sum_{\substack{|\mathcal{R}_i| \geq 0 \\ \mathcal{R}_i \subseteq \mathbb{Z}_i}} \prod_{a \in \mathcal{R}_i} p_a \prod_{a \in \mathbb{Z}_i \setminus \mathcal{R}_i} (1 - p_a).$$

当编码向量的秩为 K 时, 编码包即可成功解码, 因此需要分析 $|\mathcal{R}_i|$ 个编码包能否成功解码. 文献[15]给

出了从有限域 $GF(q)$ 中随机生成的 $|\mathcal{R}_i| \times K$ 矩阵的秩不小于 K 的概率 $P_{|\mathcal{R}_i|, K}$, 如式 (15) 所示:

$$P_{|\mathcal{R}_i|, K} = \begin{cases} 0, & |\mathcal{R}_i| < K \\ \prod_{b=0}^{K-1} \left(1 - \frac{1}{q^{|\mathcal{R}_i| - b}}\right), & |\mathcal{R}_i| \geq K \end{cases} \quad (15)$$

因此, 中转转发集 FL_i 传输编码包的 TSR_i 为

$$TSR_i = \sum_{\substack{|\mathcal{R}_i| \geq 0 \\ \mathcal{R}_i \subseteq \mathcal{Z}_i}} \left\{ \prod_{a \in \mathcal{R}_i} p_a \prod_{a \in \mathcal{Z}_i} (1 - p_a) P_{|\mathcal{R}_i|, K} \right\}.$$

设源节点到 sink 的传输路径为

$$Path = \{FL_0, FL_1, \dots, FL_i, \dots, FL_{|Path|}\},$$

其中 $FL_0 = S, FL_{|Path|} = \text{sink}$, 则网络中数据传输成功率 TSR 为

$$TSR = \prod_{i=0}^{|Path|} TSR_i = \prod_{i=0}^{|Path|} \sum_{\substack{|\mathcal{R}_i| \geq 0 \\ \mathcal{R}_i \subseteq \mathcal{Z}_i}} \left\{ \prod_{a \in \mathcal{R}_i} p_a \prod_{a \in \mathcal{Z}_i} (1 - p_a) P_{|\mathcal{R}_i|, K} \right\}.$$

6 性能分析

6.1 网络参数影响

节点随机分布在 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的区域内, sink 位于 $(100, 50)$ 处, 默认情况下, 节点密度 $\rho = 0.01$, $R_s = 30\text{m}$, 原始包数 $K = 4$, 数据包长度 $L = 128\text{bytes}$, 比率因子 $\sigma = 0.1$, 有限域大小 $q = 16$.

图 3 分析了不同比率因子 σ 对 NCOR 传输性能的影响, 可以得到:

(1) 随着链路质量 p 的提高, $\sigma = 0.05$ 及 $\sigma = 0.1$ 时的 TSR 逐渐增加; 而 $\sigma = 0.5$ 的 TSR 较低, 甚至在 $p = 0.95$ 时, TSR 只有 63% 左右, 这是因为此时的平均转发集只有 1.1 左右 (图 3(c)), 故而协作传输无法实现; 因此, 实际应用中为充分利用协作传输策略, 需保证 σ 不能过大.

(2) $\sigma = 0.05$ 的平均转发集最大, 故其 TSR 最高, 网络传输数也最大. 较大的 σ 会抑制转发集的大小, 以降低 MP 包通信代价 (如式 (11)), 并最终减少传输代价.

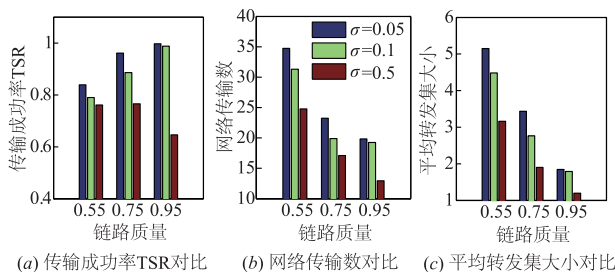


图3 不同 σ 下NCOR的传输性能

6.2 不同协议对比分析

本节将 NCOR 与 EEOR^[3]、NCCM-DC^[6] 和 NCMR^[16] 作对比, 源节点的原始数据包长度 $L = 150\text{bytes}$, $q = 2^4$, 则编码包中 CV 位 $L_{CV} = 2\text{bytes}$, 包头长度 $L_{\text{head}} = 14\text{bytes}$,

MP 包长度 $L_{\text{MP}} = 16\text{bytes}$, 则比例因子 $\sigma = 0.096$. 节点传输能耗模型参数见文献[6]. 为保证参数一致性, NCCM-DC 中多路径数 $k = 1$ 且各簇内期望工作节点数 $N_c = K$.

6.2.1 不同链路质量下的性能仿真

图 4 是不同链路质量下各协议的性能指标, 表 1 给出了 NCOR 与 EEOR 的平均转发集大小.

(1) 如图 4(a)(b), NCOR 的 TSR 随着链路质量 p 的提高而提高, 当 $p = 0.6$ 时仍可保证 90% 的传输成功率; 节点能耗随着 p 的提高而降低, 这是因为 p 增加后, 只需传输较少包即可解码得到源数据, 故能耗随之降低.

(2) EEOR 的 TSR 小于 NCOR, 但其能耗远大于 NCOR, 这是因为 EEOR 的转发集远大于 NCOR (如表 1), 故其会传输更多数据包并消耗更多能量. 此外, 随着 p 的增加, EEOR 的转发集大小类似, 而 NCOR 可适应于不同的链路质量, 在较好的 p 下缩小转发集以减少能耗.

(3) 当 $p \leq 0.70$ 时, NCCM-DC 的能耗小于 NCOR, 但其 TSR (25% ~ 75%) 远小于 NCOR; 而 $p > 0.70$ 时, NCCM-DC 的 TSR 类似于 NCOR, 但其能耗却大于 NCOR, 且随着 p 的增长而增加. 因此 NCCM-DC 在较差链路时由于没有足够的编码包而无法解码, 导致传输成功率很低, 而在较好链路下又会出现大量冗余包而造成较大能耗.

(4) NCMR 的 TSR 与 NCOR 类似, 在较差链路时略优于 NCOR, 但其能耗较大 (如 $p = 0.80$ 时, 能耗约为 NCOR 的 2 倍). 同时, 如图 4(b), 随着 p 的增加, NCMR 的节点能耗相比 NCOR 越来越大, 表明其不能适应于不同链路环境.

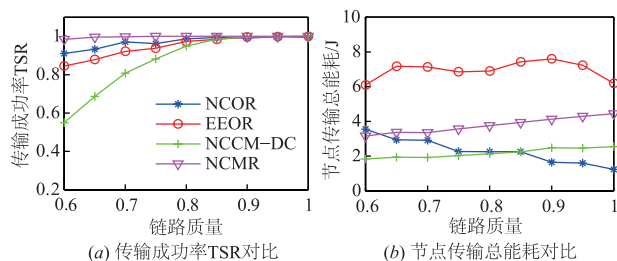


图4 不同链路质量下各协议的性能对比

表1 NCOR 与 EEOR 的节点平均转发集大小对比

链路质量	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
NCOR	4.12	3.40	2.62	1.93	2.12
EEOR	10.80	10.68	11.02	10.74	10.74

6.2.2 不同节点对“源节点-sink”的性能仿真

本节考虑不同“源节点-sink”的传输场景, 研究较差链路环境 ($p = 0.65$) 下的算法性能. 如图 5 所示.

由图 5 可知, NCOR 和 EEOR 可保持稳定的 TSR , 但 NCOR 的能耗远少于 EEOR, 当 $H = 3$ 时, NCOR 的能耗

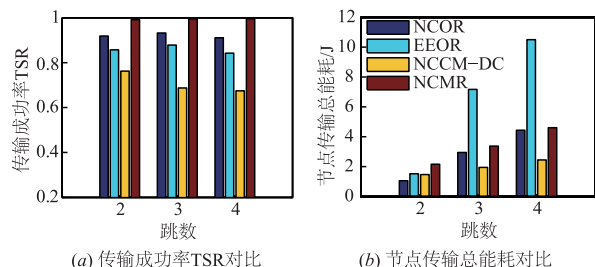


图5 不同跳数下各协议的性能对比

只有 EEOR 的 50% 左右. NCCM-DC 在较差链路环境下的 TSR 较低,且随着跳数的增长持续下降,表示其可扩展性较差. NCMR 针对较差链路环境设计,故 TSR 在 $p = 0.65$ 时略优于 NCOR,但其能耗更大,如 $H = 3$ 时,NCMR 的 TSR 相比 NCOR 多约 6.5%,但其能耗多 16%. 此外如图 4(b),随着链路变好,NCMR 的能耗会增大,表示其对环境的适应性较差.

7 总结

本文提出了基于网络编码的机会式传输协议 NCOR. 首先通过分析端到端数据传输代价以构造最优转发集;此外,设计节点间协作编码传输增加传输成功率,同时限定各节点传输上界值以减少冗余包的传输. 仿真实验表明 NCOR 在可靠性与能效性传输指标下具有很好的优越性. 未来的工作将进一步研究协作传输时节点的智能调度机制并考虑占空比技术以进一步降低节点能耗.

参考文献

- [1] PANTAZIS N A, NIKOLIDAKIS S A, et al. Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks; a survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15 (2): 551 – 591.
- [2] CHAKCHOUK N. A survey on opportunistic routing in wireless communication networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17 (4): 2214 – 2241.
- [3] MAO X, TANG S, XU X, et al. Energy-efficient opportunistic routing in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2011, 22 (11): 1934 – 1942.
- [4] SO J, BYUN H. Load-balanced opportunistic routing for duty-cycled wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 16 (7): 1940 – 1955.
- [5] AHLSSWEDE R, CAI N, LI S Y R, et al. Network information flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46 (4): 1204 – 1216.
- [6] DING X, SUN X, HUANG C, et al. Cluster-level based link redundancy with network coding in duty cycled relay wireless sensor networks [J]. Computer Networks, 2016, 99 (4): 15 – 36.
- [7] 邵星, 王翠香, 饶元. 基于跨层网络编码感知的无线传感器网络节能路由算法研究 [J]. 电子学报, 2015, 43 (12): 2484 – 2490.
- SHAO Xing, WANG Cui-xiang, RAO Yuan. Research on cross layer network coding aware energy efficient routing for wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43 (12): 2484 – 2490. (in Chinese)
- [8] KAFARIE S, CHEN Y, DOBRE O A, et al. Joint inter-flow network coding and opportunistic routing in multi-hop wireless mesh networks: a comprehensive survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, PP (99): 1 – 1.
- [9] WHISMAN D, MEDARD M, KUSUMA J, et al. Benefits of opportunistic routing, implicit acknowledgments, and network coding on a linear broadcast network [A]. Proceedings of IEEE GLOBECOM Workshops [C]. Washington, USA: IEEE, 2017. 1 – 1.
- [10] KHREISHAH A, KHALIL I, WU J. Universal network coding-based opportunistic routing for unicast [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2015, 26 (6): 1765 – 1774.
- [11] 徐骥, 朱艺华, 田贤忠, 等. 无线传感器网络中利用随机网络编码的低能耗可靠机会路由 [J]. 电子学报, 2016, 44 (8): 1799 – 1805.
- XU Ji, ZHU Yi-hua, TIAN Xian-zhong, et al. Energy-efficient reliable opportunistic routing applying random network coding for wireless sensor network [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44 (8): 1799 – 1805. (in Chinese)
- [12] ZHU D, YANG X, YU W, et al. INCOR: inter-flow network coding based opportunistic routing in wireless mesh networks [A]. Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Communications [C]. London, UK: IEEE Press, 2015. 3666 – 3671.
- [13] 陈朋朋, 高守婉, 黄丹, 等. 面向能量受限传感网的最优数据收集策略 [J]. 电子学报, 2017, 45 (8): 2049 – 2056.
- CHEN Peng-peng, GAO Shou-wan, HUANG Dan, et al. Optimal data collection strategies for energy constrained sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45 (8): 2049 – 2056. (in Chinese)
- [14] SHRADER B, EPHREMIDES A. On packet lengths and overhead for random linear coding over the erasure channel [A]. Proceedings of the International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing [C]. Honolulu, Hawaii, USA: ACM Press, 2007. 314 – 318.
- [15] TRULLOLS-CRUCES O, BARCELO-ORDINAS J M, FIORE M. Exact decoding probability under random linear network coding [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15 (1): 67 – 69.

- [16] WANG L, YANG Y, ZHAO W. Network coding-based multipath routing for energy efficiency in wireless sensor

networks [J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking*, 2012, (6): 1–15.

作者简介



丁旭男, 1991 年 2 月出生, 江苏盐城人. 博士研究生, 研究方向为无线传感网智能调度、网络编码及数据处理.
E-mail: xdnjust@163.com



吴晓蓓女, 1958 年 8 月出生, 四川成都人. 教授, 博士生导师. 研究方向为无线传感器网络、智能控制. 曾获得部省级科技进步二等奖和三等奖; 获国家教学成果一、二等奖; 国家级教学名师; 发表论文 80 余篇等.
E-mail: wuxb@njust.edu.cn



王力立(通信作者)女, 1987 年 10 月出生, 江苏泰州人. 博士研究生, 讲师. 研究方向为无线传感器网络数据传输、机器学习.
E-mail: Liliwang@njust.edu.cn

张新宇男, 1991 年 6 月出生. 吉林吉林人. 博士研究生, 研究方向为无线传感器网络数据处理.
E-mail: zhanggop@126.com

夏昕女, 1997 年 11 月出生, 江苏淮安人. 本科生, 研究方向为自动化.
E-mail: 18260065700@163.com