

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

邵 星¹, 王翠香¹, 饶 元²

(1. 盐城工学院信息工程学院, 江苏盐城 224051; 2. 安徽农业大学信息与计算机学院, 安徽合肥 230036)

摘 要: 编码感知路由可以发现路由中的网络编码机会, 减少数据传输次数, 提高网络吞吐量, 是近年来路由算法研究的一个热点. 当前编码感知路由存在编码条件失效、未考虑节点能量的问题, 不适合直接应用于无线传感器网络. 本文提出基于跨层网络编码感知的无线传感器网络节能路由算法 CAER (Cross layer coding Aware Energy efficient Routing). 提出并证明了修正后的网络编码条件, 以解决编码条件失效问题. 基于跨层思想, 将网络编码感知机制与拓扑控制、覆盖控制结合, 挖掘潜在编码机会. 提出综合考虑节点编码机会、节点能量的跨层综合路由度量 CCRM (Cross layer Coding aware Routing Metric). 仿真结果表明, 相比现有编码感知路由, CAER 能够提高网络编码感知准确性, 增加网络编码机会数量 5% ~ 15%, 延长网络生存时间 8% ~ 12%.

关键词: 跨层; 网络编码感知; 节能; 路由算法; 无线传感器网络

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012)12-2484-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.12.021

Research on Cross Layer Network Coding Aware Energy Efficient Routing for Wireless Sensor Network

SHAO Xing¹, WANG Cui-xiang¹, RAO Yuan²

(1. College of Information Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng, Jiangsu 224051, China;

2. College of Information and Computer Science, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China)

Abstract: Coding aware routing reduces transmissions number and improves network throughput by exploiting network coding opportunities of a route, and has become a hot topic of routing algorithm research in recent years. The network coding condition failure and node energy neglecting are two problems of current coding aware routing. Therefore, current coding aware routing cannot be applied directly in wireless sensor network. A cross layer coding aware energy efficient routing (CAER) is presented for wireless sensor network. The revised network coding condition is proposed and proved to avoid network coding condition failure. Based on the idea of cross layer, the network coding aware mechanism explores potential network coding opportunities through combing topology control mechanism and coverage control mechanism. Besides, a cross layer coding aware routing metric (CCRM) is presented, which jointly considers coding opportunity and energy of nodes. Simulation results demonstrate that, compared with current network coding aware routing, CAER improves the accuracy of coding aware mechanism, increases coding opportunities number by 5% ~ 15% and prolongs network lifetime by 8% ~ 12%.

Key words: cross layer; network coding aware; energy efficient; routing algorithm; wireless sensor network

1 引言

节能问题^[1]是无线传感器网络研究的重要问题, 而节能路由算法设计是其中的一个重要方面. 2000 年 Ahlswede 等^[2]提出“网络编码”概念, 即允许网络中间节点对收到数据包进行编码操作. 无线网络编码^[3], 可利

用无线信道开放特性, 减少数据传输次数、节省能耗、提高网络吞吐量, 适合于无线传感器网络.

应用于路由中的网络编码, 可分为流间网络编码和流内网络编码^[4]. 流间网络编码, 一般为异或运算, 利用无线信道的广播特性, 减少数据传输次数, 适合于解决节能路由问题, 是本文的研究对象. 基于流间网络编码

的路由,也称为编码感知路由(Coding Aware Routing)。目前已出现一些基于流间网络编码的无线路由^[4]。

Sachin^[5]等率先提出基于网络编码的路由框架 COPE(Completely Opportunistic Encoding),讨论存在编码机会的典型编码拓扑。COPE 在已建立路由中,被动发现网络编码机会,且编码拓扑限制在编码节点的 1 跳范围内。

Ni^[6]等提出“编码感知”(Coding Aware)概念,即在路由建立过程中,将路由发现与编码机会发现结合,其编码机会数目显著提高,但未讨论网络编码条件。

Le^[7]等提出分布式编码感知路由 DCAR(Distributed Coding Aware Routing),将编码拓扑的范围向编码节点的上下游进行了拓展,给出两条交叉数据流在交叉节点可进行网络编码的充要条件,但该充要条件在特定场景下失效^[8]。

田贤忠^[9]等分析了编码感知路由的延时问题,但与文献[5~7]一样未考虑节点能耗问题,不适合直接应用于无线传感器网络。朱艺华^[10]等考虑了节点能耗,但未分析网络编码条件。Shen^[11]等研究编码感知路由在应用于无线传感器网络时,编码数据包长度的匹配问题,但没有考虑节点能量,也未分析网络编码条件问题。

此外,以上路由^[6~11]仅从网络层考虑路由问题。而跨层技术^[12]可以实现网络不同层次信息共享,优化系统整体性能。因此,有必要针对现有编码感知路由的网络编码条件进行研究,进而从无线传感器网络节点能耗受限的需求出发,并结合跨层思想,提出适用于无线传感网的编码感知路由算法。

本文创新点包括:

(1)提出并证明修正的网络编码条件,避免了失效问题,提高编码感知的准确性;

(2)基于跨层思想,将网络编码感知和拓扑控制、覆盖控制结合,发现潜在编码机会。

本文组织如下:第 2 节介绍 CAER 的详细设计;第 3 节为算法仿真与性能分析;第 4 节为结束语。

2 基于跨层网络编码感知的节能路由

2.1 网络编码条件

编码感知路由需要一套规则来判断路由中每个节点是否存在多条数据流流过时,是否存在编码机会,该规则称为网络编码条件,其直接影响网络编码机会发现的数量和准确度。在定义网络编码条件之前,首先给出相关定义和引理。

定义 1 对一条由源节点 S 到目的节点 D 的数据流 $f: S \rightarrow N_1 \rightarrow \dots \rightarrow N_n \rightarrow v \rightarrow N_{n+1} \rightarrow \dots \rightarrow N_{n+m} \rightarrow D$, 符号 $U(v, f)$ 表示 f 中, v 的上游节点集合, $U(v, f) = \{S,$

$N_1, \dots, N_n\}$, 符号 $D(v, f)$ 表示 f 中, v 的下游节点集合, $D(v, f) = \{N_{n+1}, \dots, N_{n+m}, D\}$ 。

引理 1 在 DCAR 路由中,两条数据流 f_1 和 f_2 在节点 v 交叉, f_1 和 f_2 可以在 v 进行网络编码的充分必要条件^[8]是:

(1)存在节点 $d_1 \in D(v, f_1)$, 且有 $d_1 \in N(u_2)$, 其中 $u_2 \in U(v, f_2)$; 或者 $d_1 \in U(v, f_2)$

(2)存在节点 $d_2 \in D(v, f_2)$, 且有 $d_2 \in N(u_1)$, 其中 $u_1 \in U(v, f_1)$; 或者 $d_2 \in U(v, f_1)$

但引理 1 存在失效问题^[8]。以图 1(a)为例,网络中存在 3 条数据流, Flow1: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 5$, Flow2: $6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow 11$, Flow3: $12 \rightarrow 13 \rightarrow 9 \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 16$, 分别传输数据包 P_1, P_2, P_3 , 此时 3 条数据流未发生网络编码。

依据引理 1, Flow1 和 Flow2 可在节点 7, Flow2 和 Flow3 可在节点 9 分别进行编码。但在节点 7 和节点 9

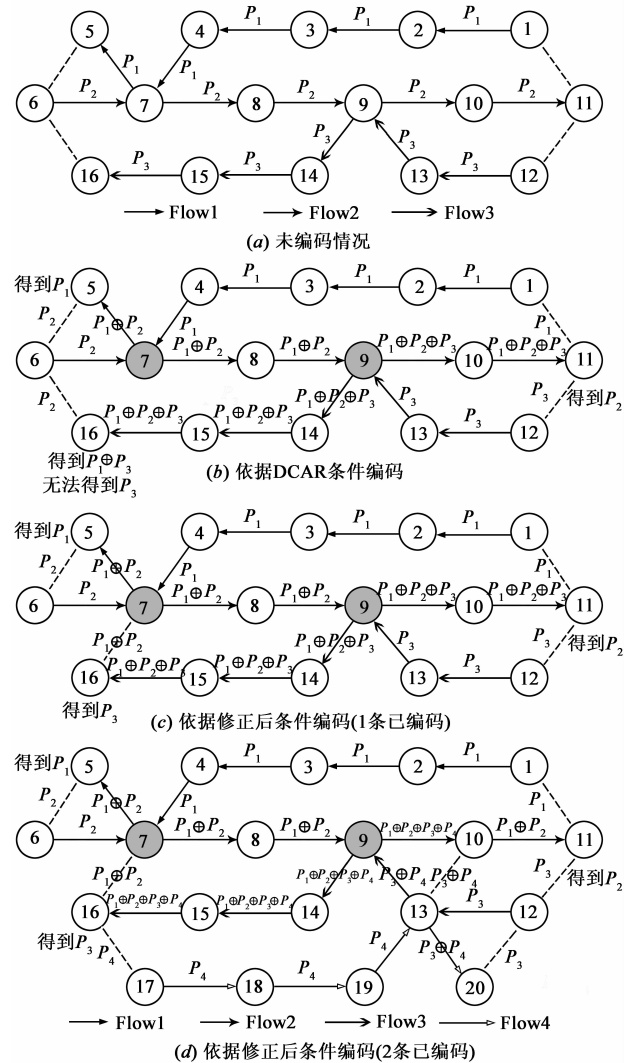


图1 网络编码条件示例

进行编码后,节点 16 仅可得到 $P1 \oplus P3$,无法正确解码得到 $P3$,如图 1(b)所示.

通过分析图 1(b),发现如节点 16 能够监听到节点 7 发出的编码包 $P1 \oplus P2$,则其可正确解码.引理 1 之所以出现失效问题,是由于数据流的数据包在到达 v 之前已经发生编码,此时 $U(v, f_1)$ 和 $U(v, f_2)$ 的范围需要进一步确定.在两条数据流到达 v 之前均未编码的情况下,引理 1 成立.

定义 2 对一条由源节点 S 到目的节点 D 的数据流 $f: S \rightarrow N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow \dots \rightarrow N_n \rightarrow v \rightarrow N_{n+1} \rightarrow N_{n+2} \rightarrow \dots \rightarrow N_{n+m} \rightarrow D$,符号 $UC(v, f)$ 表示数据流 f 中,由节点 v 上溯到第一个编码节点 N_{cl} ,所遍历得到的节点集合, $UC(v, f) = \{N_{cl}, \dots, N_n\}$.

定理 1 两条数据流 f_1 和 f_2 在节点 v 交叉, f_1 和 f_2 可以在 v 进行网络编码的充分必要条件是:

(1)存在节点 $d_1 \in D(v, f_1)$,且有 $d_1 \in N(u_2)$,其中 $u_2 \in UC(v, f_2)$;或者 $d_1 \in UC(v, f_2)$

(2)存在节点 $d_2 \in D(v, f_2)$,且有 $d_2 \in N(u_1)$,其中 $u_1 \in UC(v, f_1)$;或者 $d_2 \in UC(v, f_1)$

证明

Case1 当 f_1 和 f_2 在 v 之前未发生编码,定理 1 退化为引理 1,该充要条件成立.

Case2 当 f_1 和 f_2 中有 1 条数据流在到达 v 之前发生编码,假定是 f_1 发生编码,其发送编码数据包 P_c ,而 f_2 发送未编码数据包 P_2 .此时有 $UC(v, f_2) = U(v, f_2)$.

假定条件(1)、(2)成立.依据条件(1), d_1 可以得到 P_2 .依据条件(2), d_2 可以得到 P_c .假定在 v 进行编码 $P_2 \oplus P_c$,则 f_1 可在 d_1 处,通过 $(P_2 \oplus P_c) \oplus P_2 = P_c$ 得到 P_c ,而 f_2 可在 d_2 处通过 $(P_2 \oplus P_c) \oplus P_c = P_2$ 得到 P_2 .因此,在条件(1)、(2)成立时, f_1 和 f_2 均可正确解码,则 f_1 和 f_2 可在 v 处进行网络编码,充分性得证.

假定 f_1 和 f_2 在 v 可以进行编码,则 f_1 和 f_2 都可对 $P_2 \oplus P_c$ 正确解码. f_1 要解码得到 P_c , $D(v, f_1)$ 集合中必存在一个节点,可以获得 P_2 ,有 2 种方式:无线监听,即存在节点 $d_1 \in D(v, f_1)$,且有 $d_1 \in N(u_2)$,其中 $u_2 \in UC(v, f_2) = UC(v, f_2)$; P_2 本身经过该节点并被缓存,即 $d_1 \in U(v, f_2) = UC(v, f_2)$.从而条件(1)成立.同理条件(2)成立.因此,如 f_1 和 f_2 在 v 可以进行编码,则条件(1)、(2)成立,必要性得证.

因此,当 f_1 和 f_2 中有 1 条数据流在到达 v 之前发生编码,条件(1)、(2)是 f_1 和 f_2 可在 v 进行网络编码的充要条件.

Case3 当 f_1 和 f_2 在到达 v 之前均发生编码时,证明与 Case2 同理,不再赘述.

基于 Case1 ~ 3 证明,定理 1 得证. \square

依据定理 1,可以发现:图 1(c)中 Flow2 和 Flow3 满足定理 1,可在节点 9 编码,且节点 16 可正确解码;图 1(d)中,Flow2 和 Flow3 满足定理 1,可在节点 9 编码,且节点 16 和 11 均可正确解码.

下面将定理 1 推广,考虑多条数据流在交叉节点可进行网络编码的充要条件.

定理 2 n 条($n \geq 2$)数据流 f_1, f_2, \dots, f_n 在节点 v 交叉, f_1, f_2, \dots, f_n 可以在节点 v 进行网络编码的充分必要条件是: n 条数据流中,任意两条数据流 f_i 和 f_j 可以在节点 v 可以进行网络编码,即 f_i 和 f_j 满足定理 1.

证明 假定 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$,发向 v 的数据包分别为 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$.

(1)充分性证明

假定 f_i 和 f_j ($i \neq j$)满足定理 1,则对 f_i 存在节点 $d_i \in D(v, f_i)$,且有 $d_i \in N(u_j)$,其中 $u_j \in UC(v, f_j)$,或者 $d_i \in UC(v, f_j)$,对 f_j 存在节点 $d_j \in D(v, f_j)$,且有 $d_j \in N(u_i)$,其中 $u_i \in UC(v, f_i)$,或者 $d_j \in UC(v, f_i)$,则 f_i 可在 d_i 获取到 P_j .由于 j 随意选取,且 $i \neq j$,则 f_i 可以在对各数据流的 d_i 处分别获取到 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_{i-1}, P_{i+1}, \dots, P_n$.此时如果 n 条数据流在 v 进行编码,得到编码包 $(P_1 \oplus P_2 \oplus \dots \oplus P_n)$,则节点 i 可通过 $(P_1 \oplus P_2 \oplus \dots \oplus P_n) \oplus (P_1 \oplus P_2 \oplus \dots \oplus P_{i-1} \oplus P_{i+1} \oplus \dots \oplus P_n) = P_i$ 正确解码.由于 i 随机选取,则 n 个节点都可正确解码,则 n 条数据流可以在节点 v 处进行网络编码.

(2)必要性证明

假定 f_1, f_2, \dots, f_n 可以在 v 进行编码,则对 f_i ,其能够从编码包 $(P_1 \oplus P_2 \oplus P_3 \oplus \dots \oplus P_n)$,通过解码运算得到原始数据包 P_i ,则 f_i 可获取 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_{i-1}, P_{i+1}, \dots, P_n$.同理,对 $j \neq i$, f_i 可获取 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_{j-1}, P_{j+1}, \dots, P_n$.此时 f_i 可以获取 P_j , f_j 可以获取 P_i ,如 f_i 和 f_j 在 v 处进行网络编码,均可正确解码,即 f_i 和 f_j 满足定理 1.

基于(1)、(2)的证明,定理 2 得证.

2.2 跨层网络编码感知基本思想

无线传感器网络中,一般在网络层之下进行拓扑控制和覆盖控制,但会影响部分潜在编码机器的发现.

以图 2 所示拓扑为例,图 2(a)中,由于节点 16 距节点 7 较远,无法监听其数据,据定理 1,Flow1 和 Flow2 可在节点 7 编码,而 Flow2 和 Flow3 无法在节点 9 编码.如通过拓扑控制,调整节点 7 的发送功率,使节点 16 可监听节点 7 的数据,则 Flow2 和 Flow3 可以在节点 9 编码,如图 2(b).

而图 2(c)中,依据覆盖控制,节点 17 出于节能考虑而休眠.此时如激活节点 17,则节点 17 可以监听到节点 7 的数据,Flow2 和 Flow3 可以在节点 9 编码.

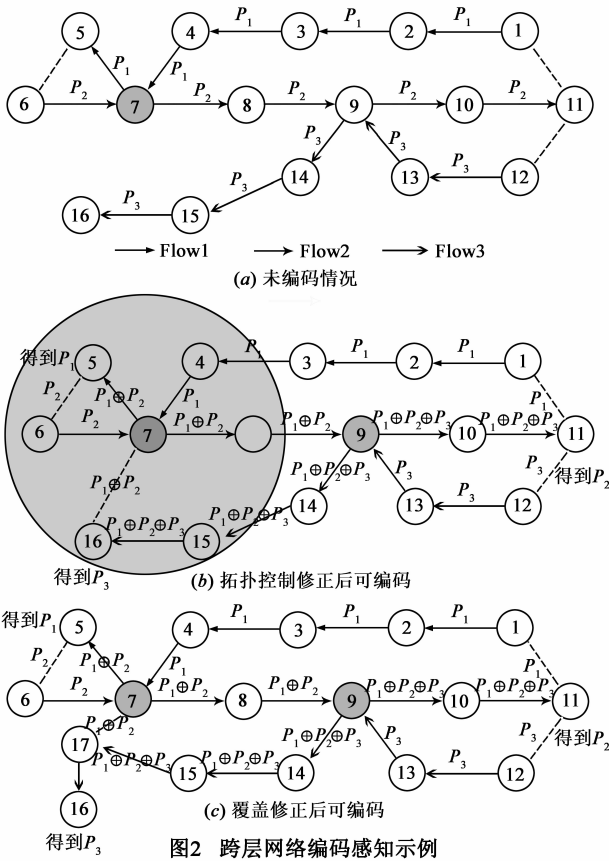


图2 跨层网络编码感知示例

从图2出发,CAER考虑将网络编码感知与拓扑控制、覆盖控制结合,提出跨层网络编码感知思想。

2.3 跨层网络编码感知路由度量

编码机会最多的路径,其能量消耗可能未必最优,需要设计一种综合考虑节点能量、网络编码机会、无线链路质量等因素的综合路径代价度量。为此,CAER设计了一种跨层编码感知路由度量 CCRM (Cross layer Coding aware Routing Metric)。

本文使用文献[13]中的能量模型。对由节点 i 到节点 j 的无线链路 l_{ij} ,其 CCRM 值定义如下:

$$\text{CCRM}_{ij} = E(T_i) + E(R_j) \quad (1)$$

其中 $E(T_i)$ 表示 i 向 j 发送数据的代价, $E(R_j)$ 是 j 接收数据的代价。

对一条路径 P ,其 CCRM 值定义如下:

$$\text{CCRM}_P = \sum_{l_{ij} \in P} \text{CCRM}_{ij} \quad (2)$$

为反映节点 i 的网络编码机会、链路 l_{ij} 的链路质量, $E(T_i)$ 的定义如下:

$$E(T_i) = \text{ETX}_{ij} \times \text{CF}_i \times E_T(i) \quad (3)$$

ETX_{ij} (Expected Transmission count, 期望传输次数) 的计算可参考文献[14]。

CF_i 为节点 i 的网络编码因子,其定义如下:

$$\text{CF}_i = \begin{cases} 0, & \text{在节点 } i \text{ 存在编码机会} \\ 1, & \text{节点 } i \text{ 不存在编码机会} \end{cases} \quad (4)$$

网络编码因子反映的是编码机会给路由带来的增益。如在节点 i 存在编码机会,则当前数据流的数据可以和原有其他数据流的数据包编码后传输,可以看做当前的数据包被原有数据流捎带发送出去,节省数据传输和能量消耗。

$E_T(i)$ 反映的是节点 i 的数据发送能耗强度,其定义如下:

$$E_T(i) = E_{\text{TElec}}(i) + \epsilon_{\text{amp}} d^\gamma \quad (5)$$

其中 $E_{\text{TElec}}(i)$ 为节点 i 电路上传输单位比特数据消耗的能量,直接与节点的发送功率相关; ϵ_{amp} 为信号放大消耗的能量; d 为发送与接收节点之间的距离; γ 为路径消耗系数,在 $[2, 4]$ 内取值。

$E(R_j)$ 的定义如下:

$$E(R_j) = \text{ETX}_{ij} \times E_{\text{RElec}}(j) \quad (6)$$

其中 $E_{\text{RElec}}(j)$ 为节点 j 电路上接收单位比特数据消耗的能量。

2.4 CAER 详细步骤

CAER 路由中,每个节点维持一个完全邻居表,记录所有邻居节点信息;一个循环缓冲队列,缓存监听到的数据包;一个数据流表,记录流经该节点的数据流信息,包括每条数据流的路径信息,及路径上每个节点的编码状态和所有邻居信息。网络初始时刻,所有节点置为 Unhear 状态,不需进行监听。

节点上电后,首先以最大发射功率,发送一个探寻报文。其他节点收到该报文后,将该节点加入完全邻居表。网络进行拓扑控制和覆盖控制后,完全邻居表中,部分邻居节点可能休眠,而部分邻居节点可能由于发射功率降低,无法直接通信,这两类邻居节点状态设为 Inactive,其他可通信的邻居节点状态设为 Active。完全邻居表中,处于 Active 状态的节点信息构成的数据结构,称为活动邻居表。

CAER 的路由发现过程与 DCAR 类似,在源节点创建路由由请求报文 RREQ(Route REQuest)。RREQ 到的目的节点后,创建路由由应答报文 RREP(Route REPLY)。RREP 沿反向路径返回,每到达一个中间节点,收集用于计算 CCRM 的相关参数信息,运行跨层网络编码感知算法,并将返回结果 Result 存进 RREP,如算法 1 所示。算法 1 中 HearRev 为实施监听的节点集合, HearSend 为被监听节点集合, CodeSet 为可编码数据流集合, Num 为编码数据流数目, TS 为需要拓扑控制修正的节点集合, CS 为需要覆盖控制修正的节点集合。

源节点收到 RREP 报文后,按照式(2)计算路径的 CCRM 值,选择值最小的路径 r 作为路由。路由算法与

覆盖控制、拓扑控制模块交互:对 r 每跳节点的编码感知算法返回结果,CS 中的节点,实施覆盖修正,TS 中的节点,实施拓扑控制修正.将 HearRev 集合中的节点置为 Hear 状态,允许其进行监听.

算法 1 跨层网络编码感知算法

输入:节点 v ,RREP 中路径 r , v 的数据流表 FlowTable_v , n 条经过 v 的数据流: $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$
 输出:Result,可以与 r 在 v 进行编码的数据流集合

1. CodeSet $\leftarrow \{r\}$
2. Judge: For each flow f_i in $\text{FlowTable}_v, i = 1$ to n do
3. If f_i 与 CodeSet 中任一数据流 f_j 满足定理 1 then
4. CodeSet = CodeSet $\cup \{f_i\}$;
5. 更新 HearSend;更新 HearRev;
6. End If
7. End For
8. Num = |CodeSet|;
9. TS = {HearSend 中为 InActive 状态的节点};
10. CS = {HearSend 和 HearRev 中 Inactive 状态,且属 r 的节点};
11. If Num > 1 then
12. Result = $\{ \langle r, \text{CodeSet}, \text{Num}, \text{HearRev}, \text{TS}, \text{CS} \rangle \cup \text{Result} \}$;
13. End If
14. If r 中每两个相邻节点有共同的 Inactive 邻居节点 then
15. 将共同的 Inactive 节点加入这 2 个相邻节点之间构成新路径 r ;
16. CodeSet $\leftarrow \{r\}$;
17. Goto Judge;
18. End If
19. Return Result

3 算法仿真与性能分析

3.1 仿真参数设定

为分析 CAER 路由性能,使用 NS2 对 CAER、DCAR、COPE 进行仿真.仿真场景为,50 个传感器节点均匀部署在 $1000\text{m} \times 1000\text{m}$ 正方形区域内.节点数据链路层采用 802.15.4,信道容量为 250Kbps,初始能量为 100J.网络覆盖控制采用 CCP(Coverage Control Protocol)算法^[15].网络拓扑控制采用 LMN(Local Mean of Neighbors)算法^[16].数据流设为固定比特率 CBR(Const Bit Rate)类型,速率为 8Kbps,源节点和目的节点随机选取.仿真中逐步增加数据流数目,分析 3 种路由性能.其他仿真参数参见表 1.

表 1 仿真参数设定

仿真参数	参数值
$E_{\text{TElec}}(i)$ (正常)	50 nJ/bit
$E_{\text{TElec}}(i)$ (最大)	100 nJ/bit
$E_{\text{RElec}}(i)$	50 nJ/bit
ϵ_{amp}	10 pJ/bit/m ²
γ	2

3.2 仿真结果分析

图 3 为数据流数目逐渐增长时,3 种路由的单位数据包能耗情况.由图 3 可以发现,COPE 在数据流数目小于 10 时逐渐减小,大于 10 后逐渐增加.CAER 和 DCAR 在数据流数目小于 12 时逐渐减小,大于 12 后逐渐增加,都低于 COPE.这是由于 3 种路由在数据流较少时,随着数据流数目增加,编码机会增多,单位数据包能耗降低.而在数据流数目继续增大后,网络中发生拥塞,重传次数增加,单位数据包能耗逐渐增长.CAER 由于能够发现更多编码机会,其单位数据包能耗最低.6~20 条数据流时,CAER 比 DCAR 低 0.7%~3.5%.

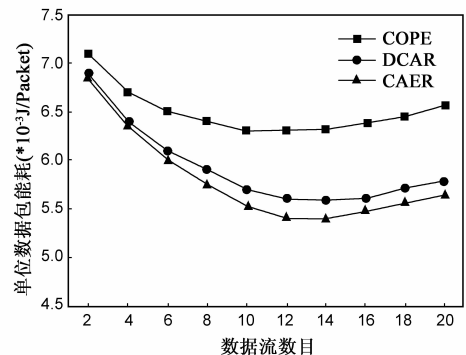


图 3 数据流数目变化时单位数据包能耗情况

图 4 为数据流数目逐渐增长时,3 种路由的网络生存时间情况.由图 4 可以发现,随着数据流数目增长,3 种路由的网络生存时间迅速减少.但由于 CAER 和 DCAR 能够主动感知编码机会,其网络生存时间要高于 COPE.CAER 由于能够发现潜在编码机会,进一步节省节点能量,其网络生存时间平均比 DCAR 高 8%~12%,延长了网络生存时间.

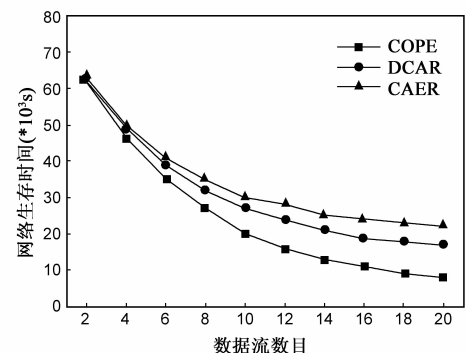


图 4 数据流数目变化时网络生存时间情况

图 5 为数据流数目逐渐增长时,3 种路由的编码包百分比情况.由图 5 发现,在数据流数目小于 4 时,3 种路由的编码数据包百分比均在 10% 以下.随着数据流数目的增加,3 种路由逐渐增加,CAER 和 DCAR 高于 COPE,CAER 比 DCAR 高 5%~15%.这是由于 CAER 修正了网络编码条件,并通过覆盖修正和功率修正,进一

步增加编码机会,编码数据包所占百分比始终最高,与图 3、图 4 分析相印证。

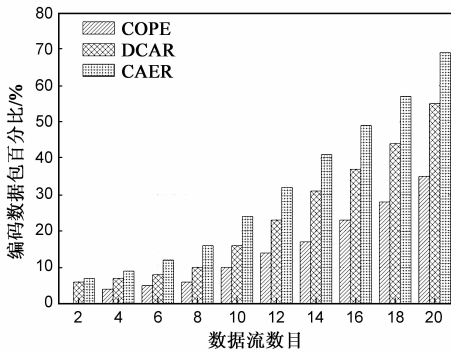


图5 数据流数目变化时编码数据包百分比情况

图 6 分析了 CAER 路由中各类型编码节点的百分比。编码节点根据网络编码发生的依据,分为 4 类。由图 6 发现,无修正类型远高于其他 3 种,且随着数据流数目增长缓慢降低,而覆盖修正缓慢增加,在 5% ~ 11% 之间变化。功率修正、覆盖修正且功率修正所占比例较低,均在 5% 以内。这是由于功率修正后,节点发射功率增大,路径 CCRM 值较大。因此,覆盖修正对编码机会增加的贡献较大,功率修正的贡献较低。

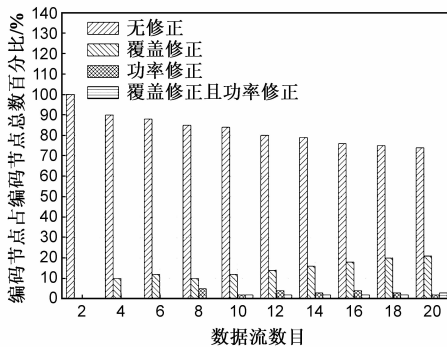


图6 数据流数目变化时编码节点百分比情况

4 结束语

本文针对当前编码感知路由存在编码条件失效、未考虑节点能量而不适合于无线传感器网络的问题,提出基于跨层网络编码感知的无线传感器网络节能路由算法 CAER,提出并证明修正的网络编码条件,将网络编码感知机制与拓扑控制、覆盖控制相结合,增加网络编码机会、延长网络生存时间。将编码感知路由与介质访问控制层参数进行联合优化,将是我们今后的工作。

参考文献

[1] Yick Jennifer, Mukherjee Biswanath, Ghosal Dipak. Wireless sensor network survey[J]. Computer Networks, 2008, 52(12):

2292 - 2330.

- [2] Rudolf Ahlswede, Ning Cai, Shuo-Yen Robert Li, Raymond W Yeung. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204 - 1216.
- [3] Christina Fragouli, Dina Katabi, Athina Markopoulou, Muriel Medard, Hariharan Rahul. Wireless network coding: opportunities and challenges [A]. Proceedings of 2007 IEEE Military Communications Conference [C]. Piscataway: IEEE, 2007. 1 - 8.
- [4] Muhammad Azhar Iqbal, Bin Dai, Benxiong Huang, A Hassan, Shui Yu. Survey of network coding-aware routing protocols in wireless networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2011, 34(6): 1956 - 1970.
- [5] Sachin Katti, Hariharan Rahul, Wenjun Hu, Dina Katabi, Muriel Medard, Jon Crowcroft. Xors in the air: practical wireless network coding [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(3): 497 - 510.
- [6] Ni Bin, Naveen Santhapuri, Zhong Zifei, Srihari Nelakuditi. Routing with opportunistically coded exchanges in wireless mesh networks[A]. Proceedings of 2006 2nd IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks [C]. Piscataway: IEEE, 2006. 157 - 159.
- [7] Le Jilin, Lui John C S, Chiu Dah Ming. DCAR: distributed coding-aware routing in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(4): 596-608.
- [8] Guo Bin, Li Hongkun, Zhou Chi, Cheng Yu. Analysis of general network coding conditions and design of a free-ride-oriented routing metric[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4): 1714 - 1727.
- [9] 田贤忠, 朱艺华, 缪得志. 无线网络编码增益感知的低时延路由协议[J]. 电子学报, 2013, 41(4): 652 - 658.
- Tian Xian-zhong, Zhu Yi-hua, Miao De-zhi. Wireless network coding gain aware routing protocol with low delay [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(4): 652 - 658. (in Chinese)
- [10] 朱艺华, 唐春光, 田贤忠. 基于交叉流网络编码的节能路由[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12): 2984 - 2989.
- Zhu Yi-hua, Tang Chun-guang, Tian Xian-zhong. An energy-saving routing based on network coding on intersecting flows [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(12): 2984 - 2989. (in Chinese)
- [11] Shen Hang, Bai Guangwei, Zhao Lu, Tang Zhenmin. An adaptive opportunistic network coding mechanism in wireless multimedia sensor networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012, 2012(11): 1 - 13.
- [12] Lucas D P Mendes, Joel J P C Rodrigues. A survey on cross-layer solutions for wireless sensor networks [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2011, 34(2): 523 - 534.
- [13] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor

networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4):660 – 670.

- [14] Douglas S J De Couto, Daniel Aguayo, John Bicket, Robert Morris. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing[J]. Wireless Networks, 2005, 11(4):419 – 434.
- [15] Wang Xiao-rui, Xing Guo-liang, Zhang Yuan-fang, Lu Chen-yang, Pless Robert, Gill Christopher. Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks [A].

Proceedings of First ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems [C]. New York: ACM, 2003. 28 – 39.

- [16] Martin Kubisch, Holger Karl, Adam Wolisz, Lizhi Charlie Zhong, Jan Rabaey. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor network [A]. Proceedings of IEEE 2003 Wireless Communications and Networking [C]. Piscataway: IEEE, 2003. 558 – 563.

作者简介



邵星 男, 1985年5月出生于江苏省宿迁市. 2013年毕业于南京邮电大学信息网络专业, 博士学位. 现为盐城工学院信息工程学院讲师. 主要研究方向为网络编码和无线传感器网络路由.

E-mail: shaoxing269@sina.com



王翠香 女, 1982年10月出生于山东省新泰市. 2010年毕业于南京邮电大学计算机软件与理论专业, 硕士学位. 现为盐城工学院信息工程学院讲师. 主要研究方向为无线传感器网络, 路由和网络编码.

E-mail: wangcuixiang@ycit.edu.cn



饶元 男, 1981年2月出生于安徽省铜陵市. 现为安徽农业大学讲师. 主要研究方向为卫星网, 无线传感器网络和路由.

E-mail: ry9925@gmail.com