

文章编号:1001-9081(2010)01-0130-04

基于网络编码的分簇传感器网络链路容错策略

林力伟, 许力, 潘鹏贵

(福建师范大学 网络安全与密码技术重点实验室, 福州 350007)

(llw02_02@163.com)

摘要:许多紧急事件的应用对无线传感器网络的数据传输的可靠性有比较高的要求,因此对传感器网络数据传输的容错性研究十分重要。传统的1+1数据保护的容错模式带来的额外负载较大地增加了传感器节点的能耗。提出了基于网络编码的分簇结构传感器网络链路容错策略,不仅可以实现对链路的容错,而且可以降低网络中转发的数据包数量,从而降低传感器节点的能耗。

关键词:无线传感器网络;网络编码;分簇;链路容错

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Link failure tolerance scheme in clustering wireless sensor network based on network coding

LIN Li-wei, XU Li, PAN Peng-gui

(Key Laboratory of Network Security and Cryptology, Fujian Normal University, Fuzhou Fujian 350007, China)

Abstract: In many emergent applications, Wireless Sensor Network (WSN) must be able to guarantee highly reliable data transmission, and therefore it becomes more and more important to study the fault-tolerance of data transmission fault-tolerance in WSN. The 1+1 data protection model will consumes the energy of sensor node dramatically due to its additional overload. This paper, aiming at reducing the consumption of sensor energy, proposed a scheme based on network coding in clustered WSN, which can not only achieve tolerance of link failure, but also reduce the number of data packets in network. The method has been proved to be more energy-efficient than the model of 1+1 data protection.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); network coding; cluster; link failure tolerance

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)综合了无线通信技术、传感器技术、嵌入式计算技术和分布式信息处理技术,已经成为当前国际上备受关注的、涉及多学科高度交叉、知识高度集成的前沿热点研究领域^[1-2]。近几年,无线传感器网络的研究取得了很大的进展,随着实际需求的推动,应用领域也越来越广泛。

传感器网络是由部署在观测环境内的大量微型传感器节点通过无线通信方式组成的一种无线网络。组成传感器网络的节点包括数据汇聚点和传感器节点。由于传感器网络节点本身成本控制的需要以及尺寸的限制,节点所采用的器件性能受到限制,环境条件容易造成无线链路带宽的变化,节点传输数据容易丢失。在许多紧急事件应用中,例如军事战场上对敌方情况的监测、工业上对有毒气体泄露监控等,监控方对网络数据传输的可靠性提出了比较高的要求,一旦发生异常事件,则要求报文可靠、实时地传回。因此对传感器网络数据传输的容错性研究变得十分现实和重要。另一方面传感器节点通常是由能量十分有限的电池供电,而且在部署后难以二次补充能量,因此传感器网络存在严重的能量约束问题。因此在传感器网络容错问题研究中也要尽可能降低能耗。

传感器网络节点绝大部分能量都消耗在通信模块上^[3]。

由于无线传感器网络规模比较大,基于分簇的层次式拓扑管理结构可以有效地提高网络的可扩展性。在以分簇方式组织的传感器网络中,传感器节点的角色分为簇头和簇成员两种。簇头作为簇的中心负责簇结构的建立,收集簇成员的数据,经融合处理后发送给汇聚点。

网络编码^[4-5]是一种新型数据编码方式,它融合了路由和编码的概念,使网络节点不仅可以对数据进行存储转发,还可以进行编码处理。网络编码可以在网络中提高网络吞吐量、降低能耗、提高网络鲁棒性等,并且无线网络的不可靠性和广播特性等特性使网络编码非常适合应用在无线网络上。

1 相关工作

针对传感器网络数据传输容易丢失的问题,目前已提出的一些数据链路容错策略^[6-11],在网络中额外传输数据副本,需要额外传输的数据量较大,更大地消耗网络中节点的能量。这些数据保护策略可分为主动数据保护模式和被动数据保护模式,最经典的主动数据保护模式是1+1数据保护模式,每个节点都通过两条链路不相交的路径同时发送两份相同的数据到目的节点来保证一条链路失效后,目的节点还能收到源节点发送的数据。由于传感器网络节点的能量比较小,并且传感器网络节点绝大部分能量都消耗在通信模块上^[3]这种主动式数据保护模式网络中需要额外传输1倍的

收稿日期:2009-07-13;**修回日期:**2009-08-31。 **基金项目:**国家自然科学基金资助项目(60502047);福建省教育厅重点资助项目(JA07030);福建省自然科学基金资助项目(2008J0014;2007J0316);福建省科技厅青年人才基金资助项目(2007F3025)。

作者简介:林力伟(1984-),男,福建莆田人,硕士研究生,CCF会员,主要研究方向:无线多跳网络拓扑优化和安全;许力(1970-),男,福建福州人,教授,博士,CCF高级会员,主要研究方向:无线网络与移动计算、网络安全和网络优化;潘鹏贵(1986-),男,福建泉州人,硕士研究生,主要研究方向:无线通信网络。

数据,会更多地消耗传感器网络节点的能量;被动数据保护模式是源节点使用一条主路径与目的节点发送数据包,当此路径上链路出现错误时再启用一条与主路径不相交的备用路径与目的节点通信,被动式的数据保护模式虽然可以减少数据的发送次数,但同时增加了网络延时,也会影响到网络的操作运行。而一些重建策略^[12-13]是基于反馈机制,当检测到路径出错或者数据丢失,再开始重新发现其他可用的路由资源。这种基于反馈机制的重建策略需要探测路径故障信息或者丢包反馈信息,会产生较大的时延。

本文提出基于网络编码的分簇结构传感器网络链路容错策略。利用网络编码,把簇头收集到的数据根据编码分组进行编码即把簇内属于同一个编码分组的信息进行编码再转发。本策略实现了对簇内任意一条链路的容错,在不增加数据传输时延的条件下比1+1数据保护模式降低了网络中数据通信信息量,从而降低网络节点的能量消耗。

2 问题描述

本章首先介绍本文所采用的网络模型,然后阐述利用网络编码来实现链路容错的策略思想。

2.1 网络模型

网络以分簇的形式组织节点,网络中有三种节点:簇头(Cluster Head, CH)、普通节点和汇聚(DS)节点。CH节点和普通节点的配置相同,其发射功率以及节点的能量均有限,DS节点我们认为发射功率和能量是无限的。

考虑由 N 个随机部署的传感器节点形成的网络,节点集合为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$, $|S| = N$, 其应用场景为周期性的数据收集。我们假设:

- 1) 传感器节点部署后基本不发生位置移动,每个节点都有一个唯一的标识。
- 2) 网络中传感器节点是同构的,簇头承担更加重要的功能,簇头节点之间以及簇头与基站的通信链路更加稳定。
- 3) 链路是对称的,网络中每个簇成员至少能与两个簇头通信。

在分簇结构中,普通节点属于一个主簇,同时还有也能和一个副簇簇头通信,即每个普通节点都有一个簇头节点 belong_head 和一个副簇簇头 second_head,相邻簇的簇头之间能直接通信,簇头之间利用较大的功率通信,其链路是稳定的,簇头发送到汇聚(sink)节点的信息是通过多跳传输。簇头经过一定的周期根据剩余能量大小进行轮换,来延长网络生存时间。

2.2 编码算法及链路容错思想

簇头节点根据簇成员与簇头的连边关系,对簇成员按照极大线性无关组进行编组,簇头节点对簇成员进行编码分组编号,簇头对同一个编号的簇成员发过来的数据进行编码发送,不同编码分组编号的数据不进行编码。

簇成员相同编码编号的节点向它的簇头节点 belong_head 和副簇簇头 second_head 组播数据,簇头节点收到数据后,把相同编码编号节点发过来的数据进行编码,再进行转发至 sink 节点。

如图1,其中 Ha、Hb、Hc、Hd、He 是簇头节点, S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 是属于 Hc 簇的具有相同编码标号的一组簇成员节点,其中 Ha 是 S_1 的副簇头, Hb 是 S_2 的副簇头, Hd 是 S_3 的副簇头, He 是 S_4 的副簇头, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别是 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 要发送的数据。簇头 C 把具有相同编码编号的四个数据进行编码,

再发送至 sink 节点。其所形成的五个方程的矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ Y \end{bmatrix}$$

其系数矩阵 $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ 中任意 $n-1$ 个行向量都是线性无

关的,也就是在簇成员节点与簇头之间任意一条链路失效,接收方仍然可以解出 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 的信息。

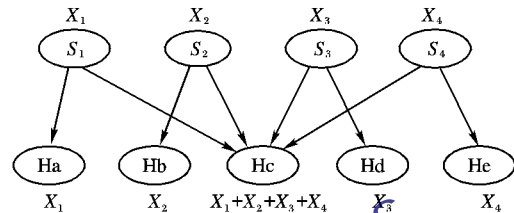


图1 编码示例

3 数据编码及解码

3.1 数据结构

本文中在网络中传输的数据包格式采用如下格式。

是否编码	所属簇	编码编号	同个编码分组个数	要发送的数据
------	-----	------	----------	--------

3.2 编码过程

对簇内数据编码在2.2节中提到过,簇头把收集到的簇内成员的数据根据编码编号,把具有相同编码编号的数据进行编码操作后转发。下面介绍簇成员进行编码编号算法。

不同簇之间的数据不能进行编码。

每个簇成员都向簇头报告自己的 associate_head 节点,每个簇的簇头收集完簇内节点的 associate_head 信息后根据 Find_Group() 算法对簇内节点进行分组。伪代码涉及的符号如下所示:

簇头编号为 head_id;

所有簇成员所属的副簇头集合为 second_head[];

某个簇内属于某个副簇头的簇成员为 second_head[].

second_member;

簇内成员编码编号为 coding_label。

Find_Group() 算法如下所示。

```

1) for each node N in cluster head_id
2)   for each second head H in second_head[]
3)     if N == H
4)       add N into H.second_member[]
5)       H.num_second_member++;
6)     end if
7)   end for
8) end for
9) int coding_label = 0;
10) for each second head H in second_head[]
11)   for each node N in H.second_member[coding_label]
12)     if H.num_second_member > coding_label
13)       N.coding_label = coding_label;
14)     end if

```

```

15)     end for
16)   coding_label + +;
17) end for

```

Find_Group 算法伪代码中第 1~8 行是对所有簇成员按照其副簇头进行归类存放到 second_head[] . second_member[] 中。第 10~17 行是每次对所有的 second_head[] 中取出一个 second_member 赋予相同的编码编号 (coding_label)。当 Find_Group 运行完后所有簇成员都有一个编码编号,簇成员也根据编码编号分成若干个编码分簇。

3.3 解码策略

Sink 节点收集完一轮的数据后根据收到的数据,根据节点所在的簇、编码编号,同个编码分簇的个数来确定。解码算法中涉及符号意义如下所示:

是否编码为 if_coding;
 所属簇为 belong_head;
 编码编号为 coding_label;
 同个编码分簇个数为 num_coding_label;
 某个具体的簇为 Head;
 某个具体编码编号为 coding_label;
 要恢复的数据为 recover_data。
 解码算法 (decoding) 如下所示:

```

1)  int count = 0;                                //用来记录
2)  data[] 赋空                                   //数组,用来存放数据
3)  coding_data                                   //用来存放编码数据
4)  for each data X in receive data
5)    if X.belong_head == Head
6)      if X.coding_label == Coding_label
7)        if X.if_coding == false
8)          data[ count] ← X
9)          count + +;
10)         else coding_data ← X
11)       end if
12)     end if
13)   end if
14) end for
15) if count == coding_data.num_coding_label
16)   discard coding_data
17) end if
18) if count == coding_data.num_coding_label - 1
19)   for each data X in data[]
20)     recover_data = coding_data.data - X.data
21)   end for
22) end if

```

解码过程伪代码中,第 4~14 行是簇头收到的数据按照其所属的簇及编码编号进行归类。第 6~12 行是对某一个簇 Head 内发过来的同一个编码编号数据进行统计。第 15~16 行如果收到通一个编码编号全部原始数据,则丢弃编码数据。第 18~22 行是收到的原始的数据比原先发送的原始数据少一个情况下接收方可以根据接收的数据进行解码,恢复出丢失的数据。

4 性能分析

4.1 理论分析

为了方便描述,如图 2 所示。

本文采用节点均匀分布的规则分布模型,分簇结构为规则的六边形蜂窝模型,簇头节点位于簇的中心位置,图 2 中大

的六边形为簇结构,六边形中间圆表示簇头节点,位于簇的中心位置。在簇 A 中,把簇 A 虚拟分成 6 个子区域 $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ 落在 S_1 区域中的节点其副簇头为 B,落在 S_2 区域中的节点其副簇头为 C,落在 S_3 区域中的节点其副簇头为 D,落在 S_4 区域中的节点其副簇头为 E,落在 S_5 区域中的节点其副簇头为 F,落在 S_6 区域中的节点其副簇头为 G。假设簇 A 中有 n 个传感器节点,在网络节点均匀分布的情况下,落在每个子区域的节点数目相同,即 $n/6$ 个节点。根据 Find_Group 算法,簇 A 中的 n 个节点可以分成 $n/6$ 个极大线性无关组,每组节点有相同的编码编号,每个极大线性无关组中有 6 个节点。每个节点向其簇头节点和副簇头节点组播数据。簇 A 的成员节点需要发送 n 次数据,每组线性无关组发送的数据数为节点数加 1。网络中簇头需要转发簇成员数据为 $(n/6) \times (6 + 1) = 7n/6$ 次。传统的 1+1 容错模式,每个数据都要进行两次转发,一个簇内的 n 个节点的数据要进行 $2n$ 次的转发。利用网络编码可以很大降低网络的通信代价。利用网络编码,可以容忍簇内一个线性无关组内的任意一条链路出错;同时,一个簇内有 $n/6$ 个极大线性无关组,即一个簇内可以容忍同时 $n/6$ 条不在同个编码分簇的链路出错。

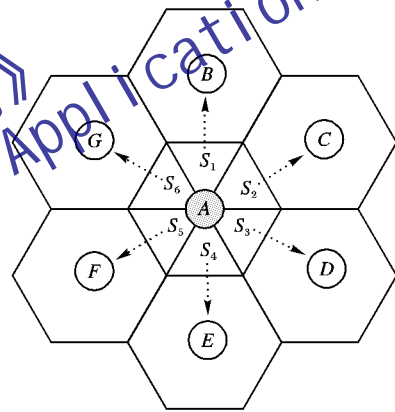


图2 网络分簇结构

定理 1 根据 Find_Group 算法进行分组编码发送数据,对任意一条簇成员节点和簇头节点之间的链路失效, sink 节点都可以恢复出原来的数据。

证明 每个簇成员节点都属于一个编码分组,在一个编码分组中,可以容忍任意一条簇成员节点与簇头节点之间的链路失效。把每个数据都看作一个变量,每个簇头节点表示一个方程,把簇成员节点传过来的数据进行异或操作。根据 Find_Group 算法进行分组,在每个编码分组中,簇头的个数 = 簇成员个数 + 1; 即记分组中簇头个数为 N_{CH} , 簇成员节点个数为 N_{node} , 即 $N_{CH} = N_{node} + 1$, 其方程的个数等于变量的个数加 1。设一个编码分组中变量集合 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 建立的方程组为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \\ Y \end{bmatrix}$$

其中 $Y = \sum_{i=1}^n X_i$, 其系数矩阵是 $(n+1) \times n$ 的矩阵, 看成 $n+1$ 维行向量。当任意一条链路失效有两种情况:

1)与所属簇的簇头之间的链路失效时,仅影响到第 $n+1$ 个行向量,sink节点会收集到全部的 X 集合中的原始数据,丢弃编码数据包无需解方程组恢复。

2)与副簇头之间的链路失效时,仅影响到前 n 个行向量中的一个。假设第 $i(1 \leq i \leq n)$ 个向量出错,即sink节点收到的此编码分组的数据为 $X_1, \dots, X_{i-1}, X_{i+1}, \dots, X_n, Y, X_i$ 数据丢失。sink节点可以根据 $X_i = Y - \sum_{j=1}^{i-1} X_j - \sum_{j=i+1}^n X_j$ 恢复出 X_i 的数据。

综上所述,定理1成立。

4.2 仿真分析

仿真系统采用VC++6.0开发,初始化网络是在 500×500 的范围内随机产生 num_node 个节点,每个节点都赋予相同的初始能量和相同的最大通信半径 $Range$,两节点之间的距离小于 $Range$ 才可互相通信。网络分簇模型采用2.1节中介绍的分簇模型,簇头与簇头间可以直接通信,每个簇成员节点可以与两个簇头通信。

节省的数据发送比例 $ratio$ 按式(1)计算:

$$ratio = \frac{Number_packet_{1+1} - Number_packet_{coding}}{Number_packet_{1+1}} \times 100\% \quad (1)$$

其中 $Number_packet_{1+1}$ 是传统1+1保护模式下网络中需要传输的数据包数量, $Number_packet_{coding}$ 是本策略中基于网络编码容错策略下网络中需要传输的数据包数量。

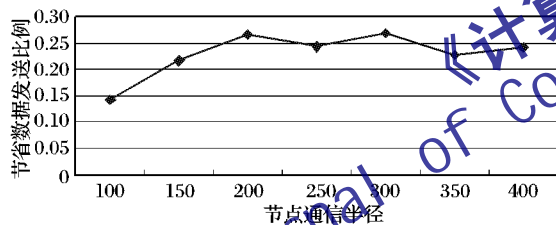


图3 500个节点,不同通信半径情况下节省的传输数据比例

如图3所示,当节点半径为100时,网络中要保持簇头间能互相通信把网络划分的簇的个数较多,簇内成员节点较少,网络中簇成员节点个数与簇内编码组数之比较低,所以节省的传输数据比例较少。随着通信半径的增大,网络中簇成员节点个数与簇内编码组数之比增大,节省的传输数据比例也增大。当节点的通信半径大于200时,网络中簇成员节点个数与簇内编码组数之比相对固定,其节省的传输数据比例为25%左右。

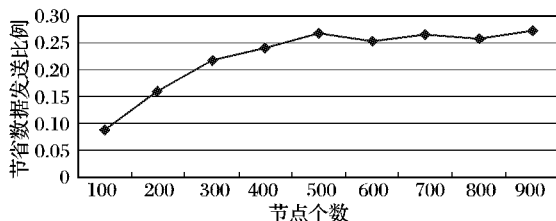


图4 节点通信半径200,不同节点密度下节省的数据传输比例

如图4所示,当节点个数为100时,网络中要保持簇头间能互相通信把网络划分的簇的个数较多,簇内成员节点较少,网络中簇成员节点个数与簇内编码组数之比较低,所以节省的传输数据比例较少。随着通信半径的增大,网络中簇成员节点个数与簇内编码组数之比增大,节省的传输数据比例也

增大。当节点个数大于200时,网络中簇成员节点个数与簇内编码组数之比相对固定,其节省的传输数据比例为26%左右。

5 结语

本文提出的基于网络编码的分簇结构传感器网络链路容错策略,其主要思想是利用簇头对簇成员发送的数据根据编码分组进行编码转发,理论分析表明该策略可以实现对簇内成员节点与簇头节点之间的任意一条链路容错,仿真实验表明,本策略比传统地利用1+1数据报数模式节省了25%左右的传输数据比例,减少了网络中节点由于转发数据而消耗的能量。

参考文献:

- [1] 崔莉,鞠海玲,苗勇,等. 无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 147-163.
- [2] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [3] ESTRIN D. Wireless sensor networks tutorial part IV: Sensor network protocols[C]// Proceedings of the ACM Mobile Computing and Networking (MobiCom). New York: ACM, 2002: 23-28.
- [4] AHLWEDE R, CAI N, LI S Y R, et al. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [5] LI S Y R, YEUNG R W, CAI N. Linear network coding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(2): 371-381.
- [6] SRINIVAS A, MODIANO E. Minimum energy disjoint path routing in wireless Ad-Hoc networks[C]// Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2003: 122-133.
- [7] LUN M D, EROS M. On coding for reliable communication over packet networks[EB/OL]. [2009-04-15]. <http://www.broadinstitute.org/~dlun/publications/LIDS-2741.pdf>.
- [8] LI N, HOU J C. Floss: A fault-tolerant topology control algorithm for wireless networks[C]// Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2004: 275-286.
- [9] ROUAYHEB C G S, SPRINTSON A. Simple network codes for instantaneous recovery from edge failures in unicast connections[EB/OL]. [2009-04-18]. <http://www.ece.tamu.edu/~salim/snci-refuc.pdf>.
- [10] XUE GUOLIANG, TANG JIAN, ZHANG WEIYI. Energy efficient survivable broadcasting and multicasting in wireless Ad Hoc networks[C]// 2004 IEEE Military Communications Conference. New York: IEEE, 2004: 1165-1171.
- [11] REMONDO D, DOMINGO M C, LEN O. A simple routing scheme for improving Ad Hoc network survivability[C]// 2003 IEEE Global Telecommunications Conference. New York: IEEE, 2003: 718-723.
- [12] DONG M Q, BANERJEE S, MISRA A. Minimum energy reliable paths using unreliable wireless links[C]// Proceedings of the 6th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York: ACM, 2005: 449-459.
- [13] SIVAKUMAR R, PARK S, VEDANTHAM R, et al. A scalable approach for reliable downstream data delivery in wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 5th Acm International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York: ACM, 2004: 78-89.