

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2018.04.010

多路径网络编码的传输可靠性提高策略

陈书阳, 冯海林

(西安电子科技大学数学与统计学院, 西安 710126)

摘要: 为了提高无线传感器网络的传输可靠性, 提出在中间节点选择性编码的多路径传输策略. 该策略建立从源节点到汇聚节点的可相交多路径, 并在源节点对数据包进行编码后沿多路径传输, 中间节点接收并转发编码包. 如果中间节点是簇首节点, 则需对数据包重新编码后再发送给下一跳节点. 解析计算了路径的传输可靠性和标准化能耗, 并对所提传输策略下的网络传输可靠性和能耗进行仿真. 结果表明, 所提策略使得网络的传输可靠性有所提高, 而且能量有效性得到大幅改善.

关键词: 无线传感器网络; 网络编码; 多路径; 传输可靠性; 能量有效

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2018)04-0712-07

Transmission reliability enhancement strategy based on multi-path network coding

CHEN Shu-Yang, FENG Hai-Lin

(Department of Mathematics and Statistics, Xidian University, Xi'an 710126, China)

Abstract: In order to improve the transmission reliability of wireless sensor network (WSN), a new kind of transmission strategy is proposed. Based on multi-path and network coding, braided multipath to sink node are established for source node. The strategy encodes the packets at source node and transmits encoded packets on the established paths. Intermediate node is responsible for forwarding received packets. If intermediate node is a cluster head, it will recode the received packets and then transmit the encoded packets. Analyze, compute and simulate transmission reliability and energy consumption of WSN with the proposed strategy. Simulation results show that the strategy can improve transmission reliability and energy efficiency of WSN when compared with traditional multi-path method.

Keywords: Wireless sensor network; Network coding; Multipath; Transmission reliability; Energy efficiency

1 引言

在无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 中, 传感器节点的电池能量有限而又不易更换, 同时无线信道易受信号干扰导致链路质量较差, 这使得能量的有效利用和保证数据的可靠

传输成为无线传感器网络研究中的两个重要问题. 通常, 传输可靠性是指数据包正确并传输到目的节点的概率, 即源节点发送的一个数据包被目的节点成功接收的概率^[1,2]. 为保证 WSN 的传输可靠性要求, 现有研究已提出多种方法, 如多路径路由协议^[3,4]和网络编码技术^[5-7]. 一方面, 多条路径同时

收稿日期: 2017-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(71271165)

作者简介: 陈书阳(1991-), 女, 山东德州人, 硕士, 研究方向为无线传感器网络可靠性分析. E-mail: sychenny@163.com

通讯作者: 冯海林. 教授. E-mail: hlfeng@xidian.edu.cn

传输数据包减弱了链路失效对单路径传输带来的影响.另一方面,路径冗余会导致更多的能量消耗,缩短网络的生命周期.网络编码技术由 Ahlswede^[8]在2000年提出,可以用来提高网络可靠性和降低网络能耗.有研究提出将多路径路由协议与网络编码技术相结合,以实现 WSN 传输可靠性的提高和能量的有效利用^[9-13].

WSN 通常分簇工作,本文研究基于已有簇结构如何提高数据传输可靠性的问题.在相交多路径路由的基础上,提出在中间节点选择性编码的数据传输策略,使得网络的传输可靠性和能量有效性均有所提高.与文献[10]不同的是,本文只在中间簇首节点进行编码.利用成功传输率 SDR (Successful Delivery Rate)和标准化能耗 NEC (Normalized Energy Consumption)来评估新传输策略下网络的性能.利用全概率和条件概率等知识分析数据包的成功传输率.与文献[10]的能耗分析过程不同,本文结合标准化能耗的定义,先分别分析簇首节点和普通节点产生的总能耗,再计算标准化能耗值.

2 多路径模型

2.1 网络模型

通常,多路径分为缠绕路径和不相交路径.本文在基于分簇的 WSN 中,建立新的缠绕多路径传输模型,如图 1.该模型的组成为:一个源节点 S 、一个汇聚节点 $Sink$ 和若干个中间节点.在图 1 中,中间节点接收并转发数据包给下一跳节点.如果中间节点为簇首节点,则需先对数据包进行编码处理后再通过多条路径发送给下一个簇内的节点.其中,每个簇内能够接收到数据包的普通传感器节点个数 n_i 由上一跳簇首节点的通信半径来决定.在第 i 个簇内, s_{ij} ($j=1, \dots, n_i$) 表示普通传感器节点, CH_i 则表示簇首节点.

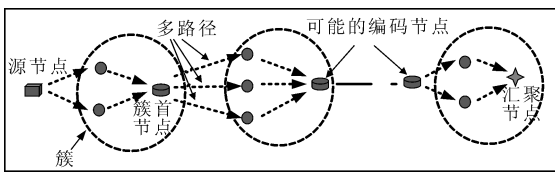


图1 多路径模型

Fig.1 Multipath model

2.2 能耗模型

为便于分析,假设所有传感器节点的通信半径 d 相同.考虑到传感器节点休眠和处理数据产生的能耗比较少,于是只考虑节点发送和接收数据包产生的能

耗,选择与文献[10]相同的传感器节点能耗模型.于是,传感器节点发送 l 比特信息产生的能耗为

$$E_{TX}(l, d) = l \times E_{TXelec} + l \times \epsilon_{amp} \times d^\gamma + E_{start} \quad (1)$$

其中, E_{TXelec} 为发送单位比特信息产生的能耗; ϵ_{amp} 为发射放大器电路在单位面积内传播单位比特信号产生的能耗; E_{start} 为初始传输产生的能耗.传感器节点接收 l 比特信息产生的能耗为

$$E_{RX}(l) = l \times E_{RXelec} + E_{start} \quad (2)$$

其中, E_{RXelec} 为接收单位比特信息消耗的能量.为便于分析,假设节点接收和发送单位比特信息消耗的能量相同,即

$$E_{TXelec} = E_{RXelec} = E_{elec} \quad (3)$$

3 多路径传输模型性能分析

3.1 传统多路径路由

本文所说的传统多路径传输方式,是引用文献[10,13]的说法,即指没有结合网络编码技术的多路径传输.在传统多路径传输方法中,当源节点需要传输数据时,首先建立到汇聚节点的缠绕多路径;然后,源节点 S 洪泛数据包给下一跳节点,接收到数据包的普通传感器节点将其转发给簇首节点,簇首节点再洪泛数据包给下一跳簇内的传感器节点.假设信息比特错误率为 BER ,则一个长度为 L 比特的数据包单跳成功传输率为

$$p = (1 - BER)^L, 0 \leq BER \leq 1 \quad (4)$$

我们记 i 为第 i 个簇, h 为缠绕多路径经过簇的个数,那么该路径模型一共有 $2h$ 跳.由于位于同一跳的节点成功接收到源节点发送包的概率是相同的,于是可以记 a_{ij} 为第 i 个簇内普通传感器节点 j 成功接收包的概率, a_i ($i=1, \dots, h$) 为第 i 个簇首节点成功接收包的概率.第一个簇内普通传感器节点成功接收源数据包的概率为

$$a_{1j} = p \quad (5)$$

由图 1 的多路径模型可知,普通传感器节点须将接收到的包转发给所属的簇首节点.为了计算第一个簇首节点成功接收源数据包的概率,首先应该得到第一个簇内的 n_1 个普通传感器节点一共接收到 m 个数据包的概率 $\varphi_{1,m}$.

$$\varphi_{1,m} = \binom{n_1}{m} \times p^m \times (1-p)^{n_1-m} \quad (6)$$

于是,第一个簇首节点成功接收源数据包的概率为

$$a_1 = \sum_{m=1}^{n_1} \{ \varphi_{1,m} \times [1 - (1-p)^m] \} \quad (7)$$

当 $i \geq 2$ 时,第 i 个簇内的普通传感器节点成功接收源数据包的概率不仅受链路质量影响,而且与第 $i-1$ 个簇内簇首节点成功接收源数据包的概率相关.于是, a_{ij} 计算公式如下

$$a_{ij} = a_{i-1} \times p \quad (8)$$

在第 i 个簇内,假设有 m 个普通节点成功接收源数据包,并转发给簇首节点 i .那么要使得簇首节点成功接收源数据包,簇首节点必须成功接收至少一个普通节点的数据包.于是

$$a_i = \sum_{m=1}^{n_i} \varphi_{i,m} \times [1 - (1-p)^m] \quad (9)$$

其中, $\varphi_{i,m}$ 即为第 i 个簇内有 m 个普通传感器节点成功接收源数据包的概率.

同一个簇内,每个普通节点成功接收到源数据包的概率相等,均为 a_{ij} .簇 i 内成功接收到数据包的普通节点数目 m 服从概率为 a_{ij} 的二项分布 $N(n_i, a_{ij})$.

$$\varphi_{i,m} = \binom{n_i}{m} \times (a_{ij})^m \times (1-a_{ij})^{n_i-m} \quad (10)$$

源数据包成功传输到汇聚节点的概率 SDR 即等于 a_h ,由式(9)和式(10)有

$$SDR = a_h = \sum_{m=1}^{n_h} \varphi_{h,m} \times [1 - (1-p)^m] \quad (11)$$

标准化能耗 NEC 可以用来评估网络的能量消耗情况,等于总能耗与成功传输率的比值^[10].文献[10]在计算能耗时,认为只要成功发送一次数据包,就会成功接收 N 次.然而,在下一跳簇中不一定所有节点都能成功接收源数据包,因此认为文献[10]中的(3.1)式不准确.本文根据标准化能耗的定义,计算得出传统多路径传输方法下网络的标准化能耗 NEC .记 A 为所有簇首节点产生的能耗, B 为多路径模型中所有普通传感器节点产生的能耗.分别分析簇首节点和普通传感器节点发送和接收数据包的次数,再由式(1)和式(2),有

$$A = \left(1 + \sum_{i=1}^{h-1} a_i\right) \times E_{TX}(k, d) + \left(\sum_{i=1}^h \sum_{m=1}^{n_i} \left(\varphi_{i,m} \times \sum_{x=1}^m \left(x \times \binom{m}{x}\right) \times p^x \times (1-p)^{m-x}\right)\right) \times E_{RX}(k) \quad (12)$$

$$B = \left[\sum_{i=1}^h (n_i \times a_{ij})\right] \times [E_{TX}(k, d) + E_{RX}(k)] \quad (13)$$

由式(12)和式(13),传统多路径传输方法下 WSN 的标准化能耗可计算如下.

$$NEC = \frac{A+B}{SDR} = \frac{A+B}{\sum_{m=1}^{n_h} \varphi_{h,m} \times [1 - (1-p)^m]} \quad (14)$$

3.2 基于网络编码的多路径路由

本文用到的网络编码是指随机线性网络编码^[10-13].当源节点有数据包需要传输,先将数据包划分成 K 个子包.然后从伽罗瓦域中随机选择 $(K+n) \times K$ 个元素构成系数矩阵 M ,依据(15)式将 K 个子包编码成 $K+n$ 个编码包. $K+n$ 个编码包从源节点开始根据图 1 的多路径传输模型传输给汇聚节点.中间节点若为簇首节点,则将成功接收到的编码包重新按照(15)式进行随机线性网络编码后再发送给下一个簇.由线性代数知识可知,只要汇聚节点成功接收到至少 K 个不相关的编码包,即可解码得到源数据包.

$$\begin{pmatrix} m_{11} & \cdots & m_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{K+n,1} & \cdots & m_{K+n,K} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_{K+n} \end{pmatrix} \quad (15)$$

本文将伽罗瓦域大小设置为 256,那么可以保证向量系数的不相关性达到 0.996^[14,15].因此可以认为,汇聚节点只要成功接收到至少 K 个编码包,就可解码得到源数据包.

记 $a_{ij,k}$ 为 s_{ij} 从 CH_{i-1} 成功接收 k 个包的概率.源节点发送 $K+n$ (令 $K' = K+n$) 个编码包给第一个簇内的节点,每个节点成功收到一个编码包的概率为 p ,且各自接收包的过程互不影响.那么第一个簇内普通节点 s_{ij} 成功接收 k 个编码包的概率为

$$a_{1j,k} = \binom{K'}{k} \times p^k \times (1-p)^{K'-k} \quad (16)$$

记第 i 个簇首节点 CH_i 成功接收 k 个编码包的概率为 $a_{i,k}$.簇内所有接收到编码包的普通传感器节点都转发包给簇首节点,于是 CH_1 成功接收到 k 个编码包的概率为

$$a_{1,k} = \sum_{k_j \in \{0, \dots, k\} \text{ s.t. } (\sum_{j=1}^{n_i} k_j) = k} \prod_{j=1}^{n_i} a_{1,j,k_j} \quad (17)$$

其中, a_{1,j,k_j} 表示簇首节点 CH_1 从簇内第 j 个普通节点 s_{1j} 成功接收到 k_j 个编码包的概率.假设 s_{1j} 从源节点成功接收到 l 个编码包,那么 CH_1 从 s_{1j} 成

功接收数据包数目 k 服从概率为 p 的二项分布 $N(l, p)$. 故有

记事件 $S: S_{ij}$ 成功接收到 l 个包; 事件 $T: CH_i$ 从 S_{ij} 成功接收 k 个包. 则

$$P(S \cap T) = P(S)P(T/S) = a_{ij,l} \times \binom{l}{k} \times p^k \times (1-p)^{l-k} \quad (18)$$

于是 $a_{1,j,k}$ 的计算公式如下

$$a_{1,j,k} = \sum_{l=k}^{K'} a_{1,j,l} \times \binom{l}{k} \times p^k \times (1-p)^{l-k} \quad (19)$$

记至少有 K 个编码包被第 i 个簇首节点成功接收的概率为 SDR_i . SDR_1 可由(20)式得到.

$$SDR_1 = 1 - \sum_{k=0}^{K-1} a_{1,k} \quad (20)$$

只要簇首节点成功接收至少 K 个编码包, 就可以对其重新编码为 K' 个新的编码包并发送下一个簇. 于是, 每个普通节点 s_{ij} 能否接收到数据包受簇首节点 CH_{i-1} 成功接收源数据包个数的影响. 若 CH_{i-1} 成功接收至少 K 个编码包, 则发送 K' 个新编码包给簇 i ; 否则不发送. 那么 s_{ij} 成功收到编码包的个数 k 服从二项分布 $N(K', p)$. s_{ij} 成功接收 k 个数据包的概率 $a_{ij,k}$ 为

$$a_{ij,k} = SDR_{i-1} \times \binom{K'}{k} \times p^k \times (1-p)^{K'-k} \quad (21)$$

簇首节点 CH_i 从簇内普通传感器节点 s_{ij} ($j=1, \dots, n_i$) 成功接收 k_j 个数据包, 那么 CH_i 成功接收到的 k 个数据包是和为 k 的 n_i 个 k_j 的集合. 于是, CH_i 成功接收到 k 个数据包的概率 $a_{i,k}$ 计算公式为(22), 其中 $a_{i,j,k}$ 由(23)式得到.

$$a_{i,k} = \sum_{k_j \in \{0, \dots, k\} \text{ s.t. } (\sum_{j=1}^{n_i} k_j) = k} \prod_{j=1}^{n_i} a_{i,j,k_j} \quad (22)$$

$$a_{i,j,k} = \sum_{l=k}^{K'} \left[a_{ij,l} \times \binom{l}{k} \times p^k \times (1-p)^{l-k} \right] \quad (23)$$

簇首节点 CH_i 成功接收到源数据包, 即成功接收至少 K 个编码包的概率 SDR_i 为

$$SDR_i = 1 - \sum_{k=0}^{K-1} a_{i,k} \quad (24)$$

经过以上分析, 汇聚节点成功接收到源数据包的概率 SDR 等于 SDR_h 的值, 即

$$SDR = SDR_h = 1 - \sum_{k=0}^{K-1} a_{h,k} \quad (25)$$

所有簇首节点接收和发送数据包产生的能耗 A' 和所有普通传感器节点接收和转发数据包产生的能耗 B' 分别为式(26)和式(27).

$$A' = \left[K' + \sum_{i=1}^{h-1} (SDR_i \times K') \right] \times E_{TX}(k, d) + \sum_{i=1}^h \left(\sum_{k=1}^{K'} (a_{i,k} \times k) \right) \times E_{RX}(k) \quad (26)$$

$$B' = \left[\sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{K'} (a_{i,j,k} \times k) \right] \times [E_{TX}(k, d) + E_{RX}(k)] \quad (27)$$

于是由式(26)和(27), 网络的标准化能耗如下

$$NEC = \frac{A+B}{SDR \times K} \quad (28)$$

4 仿真分析

本节通过 MATLAB 仿真软件对提出的中间节点选择性编码的多路径传输策略进行性能评估, 主要考察其在传输可靠性和能量消耗两方面的性能. 200 个传感器节点均匀部署于 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 的正方形区域内. 其中, 汇聚节点位于 $(200, 200)$ 处, 且假设汇聚节点完全可靠. 源节点需要传输的数据包总长度为 $L=1024$ bits, 数据包划分成长度相等的 4 个分组, 将这 4 个分组随机线性网络编码为 6 个子包. 其他仿真参数见表 1.

表 1 主要仿真参数

Tab. 1 The main parameters of simulation

参数	数值
网络面积	$200 \times 200 \text{ m}^2$
E_{elec}	50 nj/bit
E_{start}	2500 nj/packet
节点通信半径 d	10 m
路径损失系数 γ	2.0
ϵ_{amp}	2

WSN 的无线链路之间相互独立, 为了简化, 假设每条链路上传输数据包的比特错误率是相同的, 记为 BER . 在仿真实验中, 以数据包单跳成功传输率 p 来衡量链路质量, 其中 $p = (1 - BER)^L$. 在仿真图中, 以 BER 为横坐标, 分别观察随着比特错误率的增大, 网络中数据包成功传输率以及标准化能耗的变化情况.

4.1 网络编码与否对网络性能的影响

假设多路径模型有 5 个簇, 即 $h=5$. 每个簇内能接收到数据包的普通传感器节点个数分别设置为 3, 2, 2, 3, 2.

图 2 表明, 无论是提出的多路径网络编码传输

策略,还是传统多路径传输方法,随着链路质量的降低,数据包成功传输率都有所降低.但是,前者的成功传输率受链路质量影响较小些.

一方面,图 3 表明,与传统多路径传输方法相比,基于网络编码的多路径传输策略的标准化能耗更低.另一方面,网络编码技术之所以能够提升网络的传输可靠性,是因为其增加了冗余包传输数目.然而,网络中传输数据包数目的增加必然导致更多的能耗,结合图 3 看似有些矛盾.而实际上,NEC 是网络总能耗与成功传输率的比值,描述能量的有效性.于是,图 3 表明多路径网络编码策略能量利用率相对较高.

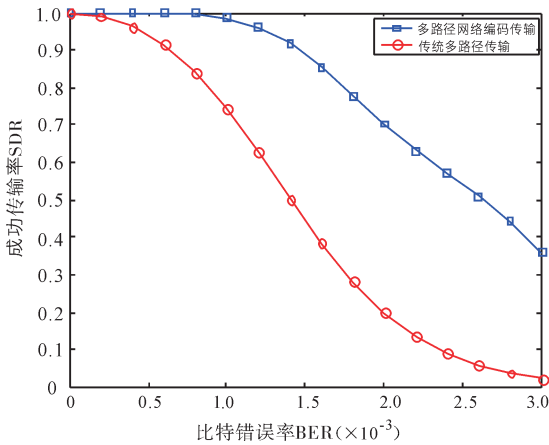


图 2 不同路径模型下的 SDR 对比结果
Fig. 2 Results of SDR in different multipath models

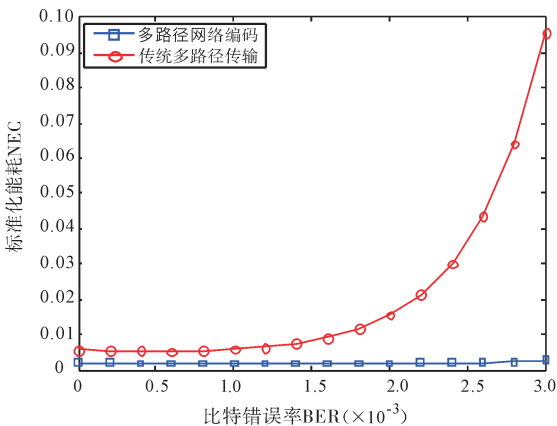


图 3 不同路径模型下的 NEC 对比结果
Fig. 3 Results of NEC in different multipath models

为便于对本文方法与文献[10]方法进行仿真对比,现设置每个簇内节点数均为 4,其他参数不变.由图 4 传输可靠性和图 5 标准化能耗的对比可以看出,虽然本文方法对应的传输可靠性不如文献[10],但是其对应的标准化能耗更低.在能量有限的 WSN 中,本文方法的能量有效性优势明显.

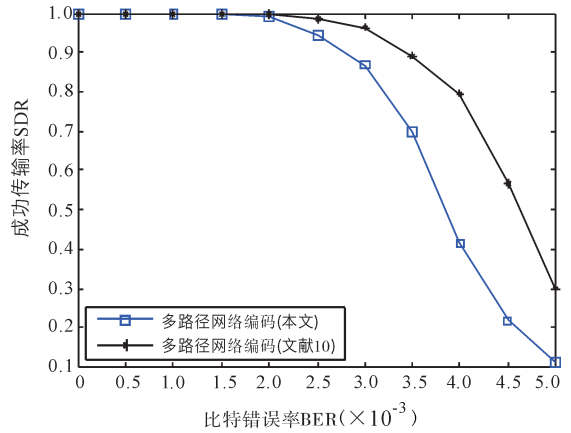


图 4 两种多路径网络编码模型下 SDR 对比结果
Fig. 4 Results of SDR in two NCMR models

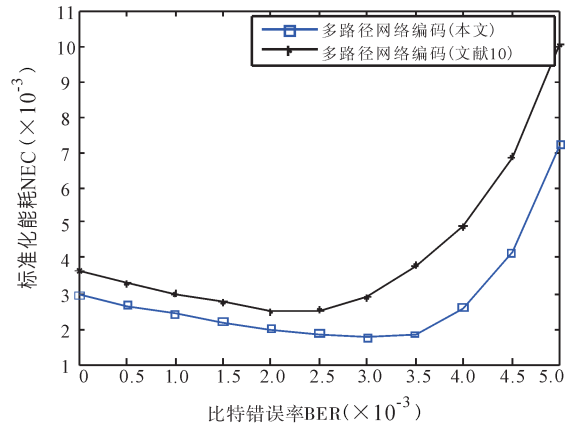


图 5 两种多路径网络编码模型下 NEC 对比结果
Fig. 5 Results of NEC in two NCMR models

4.2 n_i 对网络性能的影响

为了更好地分析参数 n_i 对网络传输可靠性及能耗情况的影响,考虑各个簇内普通节点数目相等的情况,即 $n_i = n$.如图 6 和图 7 所示,由多路径网络编码模型($n=2$)与传统多路径模型($n=3$)的对比可以看出,传统多路径模型即使具有更多的簇内普通节点,其对应的网络性能仍然比不上前者.因此,可以认为多路径网络编码策略可以减少簇内节点数目,却得到更优的传输可靠性与能量有效性.图中参数 n 设置为 2 或 3 并不意味着它们就是最佳参数,这仅仅是用来说明多路径网络编码模型确实能够减少簇内所需要的普通节点数目.

为了更清晰地展示簇内节点数 n 对多路径网络编码模型性能的影响,在参数 n 不同取值($n = 2, 3, 4, 5$)的情况下,分别对网络的传输可靠性和标准化能耗画出仿真图像,如图 8 和图 9.由图 8 可以看出,网络成功传输数据的概率随着链路质量的降低而减小,随着簇内节点数目的增加(必

然有路径条数增加)而增大. 由图 9, 随着链路质量的降低, 网络总体能耗增加; 而在链路质量较好时, 簇内节点数目小的多路径网络编码模型对应的网络能量利用率较高; 链路质量较差时则相反.

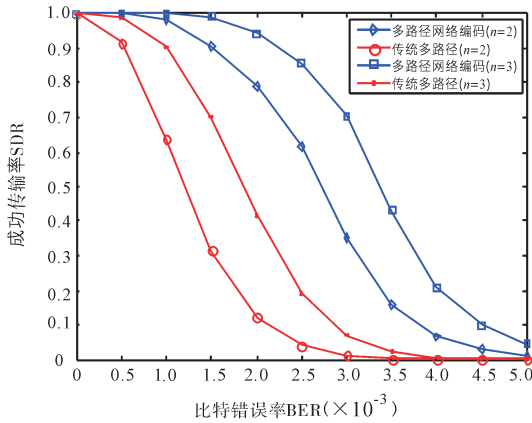


图 6 n_i 对不同多路径模型可靠性的影响

Fig. 6 Influence of n_i on SDR in different multipath models

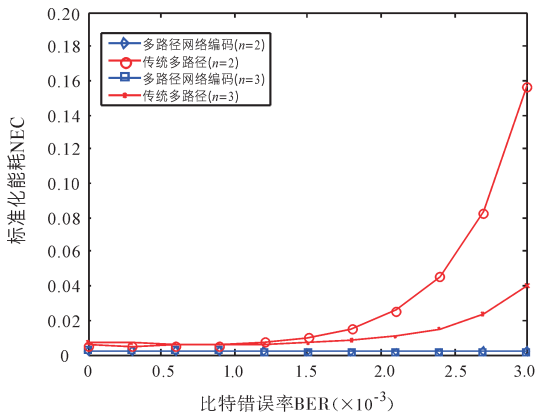


图 7 n_i 对不同多路径模型能耗的影响

Fig. 7 Influence of n_i on NEC in different multipath models

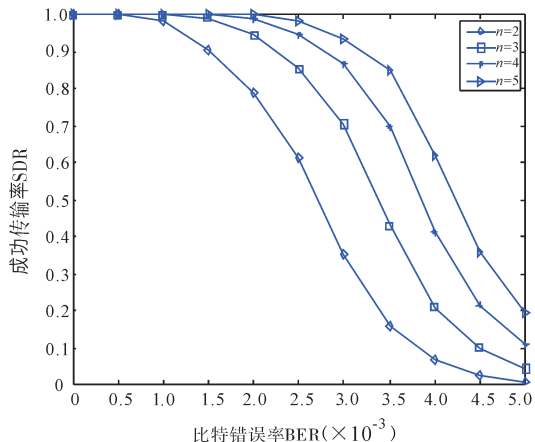


图 8 n_i 对多路径网络编码模型可靠性的影响

Fig. 8 Influence of n_i on SDR in the model based on multipath network coding

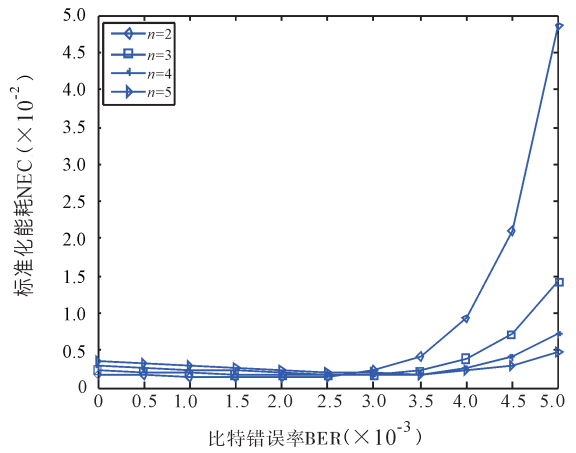


图 9 n_i 对多路径网络编码模型能耗的影响

Fig. 9 Influence of n_i on NEC in the model based on multipath network coding

5 结论

本文研究了在基于分簇的 WSN 中如何提高传输可靠性和能量有效性的方法, 提出一种在中间节点选择性编码的多路径传输策略. 该策略将缠绕多路径和网络编码技术相结合, 在源节点对数据包进行网络编码, 并在已建立好的缠绕多路径上传输. 若中间节点为簇首节点, 则对数据包重新编码. 通过增加冗余包的传输数目提高了网络的传输可靠性. 仿真表明, 该策略能够实现 WSN 能量有效性的提升.

参考文献:

- [1] Ding X, Sun X J, Huang C, *et al.* Cluster-level based link redundancy with network coding in duty cycled relay wireless sensor networks[J]. *Comput Netw*, 2016, 99: 15.
- [2] Sun B L, Gui C, Song Y, *et al.* A novel network coding and multi-path routing approach for wireless sensor network [J]. *Wirel Pers Commun*, 2014, 77: 87.
- [3] Sepulcre M, Gozalvez J, Coll-Perales B. Multipath QoS-driven routing protocol for industrial wireless networks [J]. *J Netw Comput Appl*, 2016, 74: 121.
- [4] Park J, Jo M, Seong D, *et al.* Disjointed multipath routing for real-time data in wireless multimedia sensor networks [J]. *Int J Distrib S*, 2014, 2014: 1.
- [5] Tassi A, Chatzigeorgiou I, Lucani D E. Analysis and optimization of sparse random linear network coding for reliable multicast services [J]. *IEEE*

- Trans Commun, 2016, 64: 285.
- [6] 周婷, 岳鹏. 基于数据有效投递率的代间网络编码参数研究 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2016, 53: 764.
- [7] Sudha G, Prakash R, Balaji G A. Network coding based real time wireless sensor network for environmental monitoring [C]//Proceedings of 2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking. [s. l.]: IEEE, 2016.
- [8] Ahlswede R, Cai N, Li S Y R, *et al.* Network information flow [J]. IEEE Trans Inform Theory, 2000, 46: 1204.
- [9] Mohammadi R, Ghaffari A. Optimizing reliability through network coding in wireless multimedia sensor networks [J]. Indian Sci Techn, 2015, 8: 834.
- [10] Wang L, Yang Y W, Zhao W. Network coding-based multipath routing for energy efficiency in wireless sensor networks [J]. EURASIP J Wireless Commun Netw, 2012, 2012: 115.
- [11] Hu P, Song X Q. An adaptive strategy for network coding based reliability transmission mechanism [C]// Proceedings of IEEE 5th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies. [s. l.]: IEEE, 2014.
- [12] Niu T, Zhuang Y. Reliable data transmission scheme based on network coding in wireless sensor network [J]. Adv Mater Res, 2014, 1046: 339.
- [13] Gunjal M S, Shaikh S A. Energy efficient wireless sensor network using network coding based multipath routing protocol for multicast network [J]. Int J Eng Res Appl, 2014, 4: 78.
- [14] Wang D, Zhang Q, Liu J C. Partial network coding: theory and application for continuous sensor data collection [C]. //Proceedings of IEEE 14th International Workshop on Quality of Service. [s. l.]: IEEE, 2006.
- [15] 丁进, 林基明, 周继华, 等. 一种低通信开销联合时钟同步和定位算法 [J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2016, 28: 30.

引用本文格式:

- 中文: 陈书阳, 冯海林. 多路径网络编码的传输可靠性提高策略 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2018, 55: 712.
- 英文: Chen S Y, Feng H L. Transmission reliability enhancement strategy based on multi-path network coding [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2018, 55: 712.