

Outage Probability and Energy Efficiency Analyses of Cooperative ARQ Protocol Based on Inter-Cluster Switching in Wireless Sensor Networks

Kai Zhang¹, Suoping Li^{1,2}, Fan Wang¹, Ke Wang¹

¹School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu

²School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu

Email: 571575995@qq.com, lsuop@163.com

Received: Nov. 20th, 2017; accepted: Dec. 4th, 2017; published: Dec. 12th, 2017

Abstract

In order to further improve the reliability of wireless transmission in sensor networks and obtain high energy efficiency, a CARQ protocol based on inter-cluster switching is proposed. The protocol first selects optimal relay in each cluster with the channel capacity as the index. Then, the steady-state selection probability of the link of the communication link S-R_i-D is analyzed. Finally, the sensor network is used as the research model, and the outage probability and energy efficiency of the system are analyzed when inter-cluster switch. The analysis and simulation show that the proposed protocol can better guarantee the transmission efficiency of the system. Especially when the number of members in each cluster increases, the performance of the system can be improved remarkably.

Keywords

Cooperative Communication, ARQ Technology, Relay Selection and Switching, Outage Probability

无线传感器网络中基于簇间切换的CARQ协议中断概率及能效分析

张 凯¹, 黎锁平^{1,2}, 王 帆¹, 王 珂¹

¹兰州理工大学计算机与通信学院, 甘肃 兰州

²兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州

Email: 571575995@qq.com, lsuop@163.com

收稿日期：2017年11月20日；录用日期：2017年12月4日；发布日期：2017年12月12日

摘要

为了进一步提高传感器网络中无线传输的可靠性以及获得较高的能量效率，提出了一种基于簇间切换的CARQ协议。该协议首先对每个簇内的多个中继进行以信道容量为指标的择优选取。然后对每个簇中选取的最优中继构成的中继链路S-R_i-D引入链路的稳态选择，分析了各个链路被选中的稳态概率。最后结合簇内选取的最优中继的链路中断概率，以传感器网络为研究模型，分析了两个簇之间进行切换的系统的中断概率和能量效率。通过分析和仿真证实了所提协议能够更好的保障系统的传输效率，特别是随着各个簇内成员数目增多时能显著的改善系统的性能。

关键词

协作通信，ARQ技术，中继选择与切换，中断概率，能量效率

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

无线传感器网络(WSN, wireless sensor networks)中，传感器节点一般被放置在没有基础设施的地方，具体的施放位置没法提前准确设定。由于环境的复杂性和具体应用场景的特殊性，使得传感器节点通常通信能力较弱且能量有限。协同传输技术允许 WSN 中节点机会地共享彼此的资源，能够获得分集增益和能效增益，是实现传输可靠性和高效能之间有效折衷的一种新技术[1]。

ARQ 技术(自动重传请求)就是一种很有效的差错控制技术，并且在所有无线通信系统中具有广泛地应用。结合协同传输的 ARQ 机制，综合利用协同传输技术和自动重传机制的优势，通过中继节点重传数据分组可以获得时间和空间上的分集增益，提高无线传输的可靠性[2]。许多现有的应用研究在实现高效的可靠传输上已经取得了一定的研究成果。从中继的应用来看，这些研究可以被分为三种：单中继重传、用户协同重传、多中继重传。在单中继重传协议中，负责重传的中继器是固定的或是从一组接收正确的中继器组里面被选择出来的。基于固定中继的 ARQ 协议可能会受到深度衰落的影响，并且由中继选择引起的开销和延迟可能会降低 ARQ 协议的能效。文献[3]提出了一个单中继协作 ARQ 重传策略。文中采用了马尔科夫分析的方法，但是没有考虑协同 ARQ 协议的传输性能和吞吐量。在用户协同重传协议中，协议通常取决于用户协作的过程，这就导致其很难扩展到中继网络中去。文献[4]提出了一个无线网络中双用户协作分集系统的 ARQ 协议，采用 Alamouti 时空编码，根据目的地的发送帧中不同的反馈调度，提高了双用户协作系统的吞吐量。但是当平均接收 SNR 很低时，吞吐量性能并没有得到改善，且文中协同编码方案复杂度高，对传感器节点处理能力要求也很高。在多中继重传协议中，大都采用通过协同时空编码、分集接收或者最大比合并等方式来获得协同分集增益，但是这些处理通常都需要较为复杂的硬件设备，对于小型低价的传感器节点不太合适，也不利于节省能耗。例如在文献[5]利用分布式空时编码，提出了一个中继增加的重传方案，显著的改善了系统能效。文献[6]研究了一个新中继结合重传组的想法，获得空间分集来实现低功耗高性能传输。文献[7]给出了协作中继节点之间切换与保持的重传方式，较好地实现了系统传输可靠性和能量效率之间的有效折衷。但对于如何在簇内如何选出用于重传的中继节点

并没有予以讨论。

协作通信中,不同中继节点的选择会对接收端接收到的数据信息产生不同的影响。因此,中继协作网络中,如何在众多可以选择的中继节点中选出理想的节点从而使得数据的传输质量最佳,成为了协作通信中的热点研究问题。在已有的研究成果中,中继节点的选择算法大概分为四种:1)基于中断概率的选择算法。如文献[8]定义了不同效用函数,它们是基于各个节点不同的功率消耗要求,但最终目的都是使得中断概率最小。该算法提出了利用效用函数值的大小来选择中继的思想;2)基于端到端错误比特概率的选择算法。如文献[9]提出了在用户的中继节点集合中查找使其端到端错误概率最小的那个中继节点作为协作中继节点。使得将物理层调制方式和终端信号合并方式考虑进来,更加贴近现实;3)基于瞬时信道状态的选择算法。如文献[10]提出了基于解码重传下的被动式最佳协作选择准则。文献[11]提出了一种空时编码协作中的中继选择与功率分配联合方案,避免了通过中继之间的信息交互进行中继选择的冲突;4)基于能量分配的选择算法。如文献[12]中为了延长AF协作网络的生存空间,提出了联合中继选择和功率分配策略。文献[13]在多用户协作通信网络中,提出了分布式的买卖博弈论方案来刺激协作。这些中继选择算法中,基于中继概率的选择算法保证通信过程更可靠,不容易中断。但是盲目的追求低中断概率会导致采用多节点中继,造成资源的浪费。基于端到端错误比特概率的选择算法更贴近实际,当中继数量增多时会使得误码率降低,需要联合优化。基于瞬时信道状态的选择算法自适应较好,比较灵活,选择出的中继节点的信道状态很好,但是可能会发生碰撞,从而导致无法正确的选择到中继节点。基于能量分配的选择算法节省能量,有效延长网络生命周期,其复杂度较高。

为了降低无线传感器网络实际应用中中继选择算法的复杂度、提高系统的传输效率,本文提出了一种基于簇间切换的CARQ协议,该方案在无线传感器网络中不需要特别复杂的硬件设备,非常有利于网络中节点节省能耗。主要做了下面几个工作:1)通过基于最大信道容量的选择算法在簇内选出最优中继用来进行协作重传;2)提出簇间切换的CARQ模型,通过计算其中断概率,当信道条件较好时,尽量保持不变。当信道条件不能保证通信质量时迅速进行簇间切换,从而最大限度地减少系统的能耗;3)给出了上述模型的系统中断概率的精确表达式,并分析了系统的能量效率。与传统的ARQ协议进行了分析比较。

2. 系统模型与 CARQ 协议描述

2.1. 系统模型

系统模型如图1所示。由1个源节点 S 、簇1内 M 个中继节点 R 、簇2内 N 个中继节点 R 以及目的节点 D 组成。假设任意两个节点之间的信道相互独立,且所有信道均为独立同分布的瑞利慢衰落信道。节点 i 和节点 j 之间信道响应 $h_{i,j}(i \in (S,R), j \in (R,D))$ 的均值为0,方差为 $\sigma_{i,j}^2$ 。假设噪声为高斯白噪声,均值为0,方差为 N_0 。所有节点采用半双工的工作方式,中继节点在接收数据分组的时候不能同时发送数据分组。假设每个从中继节点和目的节点传来的反馈信息能够完全被正确接收。文中认为源节点和中继节点发送数据时有完美的同步性,即一个数据分组恰能在该时隙内发送完,且所有节点能保持完全同步。

于是源节点 i 到目的节点 j 之间的瞬时信噪比(SNR, signal noise ratio)可以表示为:

$$\gamma_{i,j} = \frac{|h_{i,j}|^2 E}{N_0}$$

其中 E 是指每个发送节点 i 的平均发射功率,在后面的分析中,假设每个节点的平均发射功率相同。 N_0 为AWGN噪声的方差, $h_{i,j}$ 在一个传输时隙里保持不变。

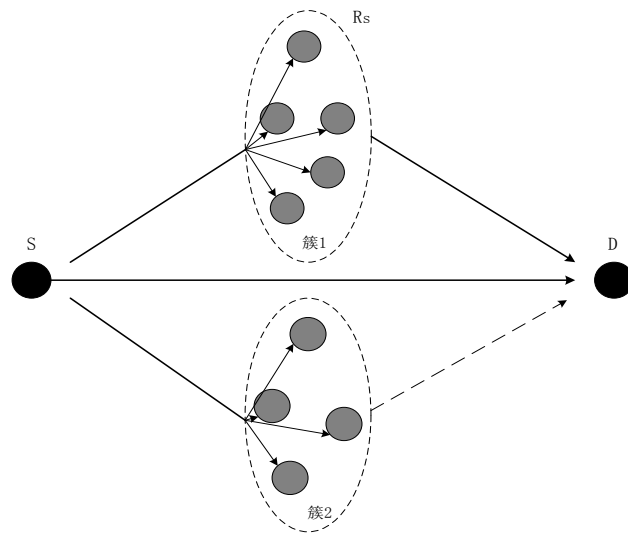


Figure 1. System model based on inter-cluster switching
图 1. 基于簇间切换的系统模型

在所提协议中，定义如果信道容量大于最小发送速率时，则表示数据分组被正确译码，即：

$$C_{i,j} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{|h_{i,j}|^2 E}{N_0} \right) \geq R_h$$

其中 R_h 表示单位带宽下链路不中断的最小发送速率。

2.2. 协议描述

针对上述系统模型，本文给出的基于簇间切换的 CARQ 协议可以描述为：

- 1) 源节点 S 以广播的形式向所有中继节点和目的节点发送数据分组，簇 1 和簇 2 内的中继节点 R 各自进行译码并选出簇内的最优中继。
- 2) 如果 D 正确接收，则反馈 ACK，其它各节点接收到 ACK 信号后丢弃该数据分组，同时指示下一个时隙开始由源节点 S 发送新的数据分组。状态返回至(1)。
- 3) 如果 D 没有正确接收，则：
 - a) 如果簇 1 (不妨先设为簇 1) 内有 R 正确接收了该数据分组，则由簇 1 内选取的最佳中继 D 重传该数据。根据 D 是否正确接收状态返回至 1) 或跳转至状态 b)。
 - b) 如果簇 1 内没有中继正确接收了数据分组或者簇 1 重传之后 D 仍没有正确接收，则反馈 NACK 后迅速切换至由簇 2 负责重传。根据 D 是否正确接收状态返回至 1) 或跳转至状态 c)。
 - c) 如果簇 2 内没有中继正确接收数据分组或者簇 2 重传之后 D 仍没有正确接收，则反馈 NACK 表示此次重传失败，在下个时隙重新进行数据传送。如果簇 2 重传之后 D 正确接收了则反馈 ACK 并状态返回至 1)。

3. 性能分析

本节将对单簇内的中断概率和进行簇间切换时系统的中断概率进行分析。系统模型中簇 1、簇 2 内分别有 M 和 N 个中继节点，首先需要在簇内选出信道容量最大的中继节点作为协作中继，只有当源节点到协作中继节点以及协作中继节点到目的节点的链路都不发生中断时，整条链路的协作传输才可以成功。

通过对单簇内链路中断概率的分析, 可以得知簇内中继个数对中断概率的影响。在进行簇间切换重传时引入稳态选择概率, 即每条链路参与重传时的稳态概率, 最后推导出系统中中断概率的精确表达式。

3.1. 单簇内中断概率分析

首先, 在第 1 时隙源节点 S 以广播的形式向所有中继节点和目的节点发送数据分组, 在每簇内, 选择从源节点 S 到该簇内信道容量最大的节点作为该簇内的最优中继, 记 $R_0^{C_1}$ 、 $R_0^{C_2}$ 分别为簇 1、簇 2 内的最优中继。

$$R_0^{C_1} = \arg \max_{m=1}^M C_{S,C_1} \quad (1)$$

$$R_0^{C_2} = \arg \max_{n=1}^N C_{S,C_2} \quad (2)$$

其中 M , N 分别表示簇 1 (C_1), 簇 2 (C_2) 内中继的个数。

则从源节点 S 到 $R_0^{C_1}$ 、 $R_0^{C_2}$ 的瞬时信道容量为

$$I_{S,R_0^{C_1}} = \max_{m=1}^M C_{S,C_1} = \max_{m=1}^M \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{|h_{S,R_m^{C_1}}|^2 E}{N_0} \right) \quad (3)$$

$$I_{S,R_0^{C_2}} = \max_{n=1}^N C_{S,C_2} = \max_{n=1}^N \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{|h_{S,R_n^{C_2}}|^2 E}{N_0} \right) \quad (4)$$

$R_m^{C_1}$, $R_n^{C_2}$ 分别表示簇 1 (C_1), 簇 2 (C_2) 内第 m , n 个中继。

在单簇(不妨设为 C_1)内, 我们主要分析簇内中继节点个数对中断概率的影响。簇内中继链路的的中断概率为

$$\begin{aligned} P_{out} &= P_r \left[\max_{m=1}^M \left[\min \left(|h_{S,R_m}|^2, |h_{R_m,D}|^2 < r_{th} \right) \right] \right] \\ &= \prod_{m=1}^M P_r \left[\min \left(|h_{S,R_m}|^2, |h_{R_m,D}|^2 < r_{th} \right) \right] \\ &= \prod_{m=1}^M \left[1 - P_r \left[\min \left(|h_{S,R_m}|^2, |h_{R_m,D}|^2 > r_{th} \right) \right] \right] \end{aligned} \quad (5)$$

其中,

$$\begin{aligned} P_r \left[\min \left(|h_{S,R_m}|^2, |h_{R_m,D}|^2 > r_{th} \right) \right] &= P_r \left(|h_{S,R_m}|^2 > r_{th}, |h_{R_m,D}|^2 > r_{th} \right) \\ &= P_r \left(|h_{S,R_m}|^2 > r_{th} \right) P_r \left(|h_{R_m,D}|^2 > r_{th} \right) \\ &= \exp \left(-\frac{r_{th} \lambda_{S,R_m} \lambda_{R_m,D}}{\lambda_{S,R_m} + \lambda_{R_m,D}} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

所以将式(6)带入式(5)可得中继链路的中断概率为

$$P_{out} = \prod_{m=1}^M \left[1 - \exp \left(-\frac{r_{th} \lambda_{S,R_m} \lambda_{R_m,D}}{\lambda_{S,R_m} + \lambda_{R_m,D}} \right) \right] \quad (7)$$

其中 $r_{ih} = \frac{2^{2R_{ih}-1}}{SNR}$, SNR 为发送节点 i 和接收节点 j 之间的平均信噪比, 定义 $SNR = \frac{E}{N_0}$. $\lambda_{i,j}$ 为 $|h_{i,j}|^2$ 服从指数分布的参数。

中继链路的中断概率如图 2, 所有节点采用固定功率发射, 设最小发送速率 R_{ih} 为 2, $\lambda_{S,R_m} = \lambda_{R_m,D} = 1$ 。从图中可以看出簇内中继节点的个数越多时, 中继链路的中断概率越小, 链路的质量也就越好, 不容易发生中断。但实际中, 过多的中继重传也会带来更多的系统开销和时延, 从而影响系统能效, 所以多中继重传时, 应该实现可靠性和低时延之间的有效折衷。

3.2. 链路的稳态选择

从协作传输协议的描述可以知道, 只有当源节点到中继节点以及中继节点到目的节点之间的链接都不发生中断时, 协作传输才会成功。

定义协作链路 1: {S-簇 1-D}; 协作链路 2: {S-簇 2-D}, 它们的等效增益为:

$$|h_1|^2 = \arg \max_{m=1}^M \left[\min \left(|h_{S,R_m^{C1}}|^2, |h_{R_m^{C1},D}|^2 \right) \right] = \min \left(|h_{S,R_0^{C1}}|^2, |h_{R_0^{C1},D}|^2 \right) \quad (8)$$

$$|h_2|^2 = \arg \max_{n=1}^N \left[\min \left(|h_{S,R_n^{C2}}|^2, |h_{R_n^{C2},D}|^2 \right) \right] = \min \left(|h_{S,R_0^{C2}}|^2, |h_{R_0^{C2},D}|^2 \right) \quad (9)$$

因为 $\gamma_{i,j} = |h_{i,j}|^2$ 的概率密度函数为 $f_\gamma(x) = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x}{\lambda}}$, 并记 $|h_{S,R_0^{C1}}|^2$ 、 $|h_{S,R_0^{C2}}|^2$ 、 $|h_{R_0^{C1},D}|^2$ 、 $|h_{R_0^{C2},D}|^2$ 所服从分布的参数分别为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 , 则 $|h_1|^2$ 、 $|h_2|^2$ 服从参数为 $\frac{\lambda_1\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_3}$ 、 $\frac{\lambda_2\lambda_4}{\lambda_2 + \lambda_4}$ 的指数分布。

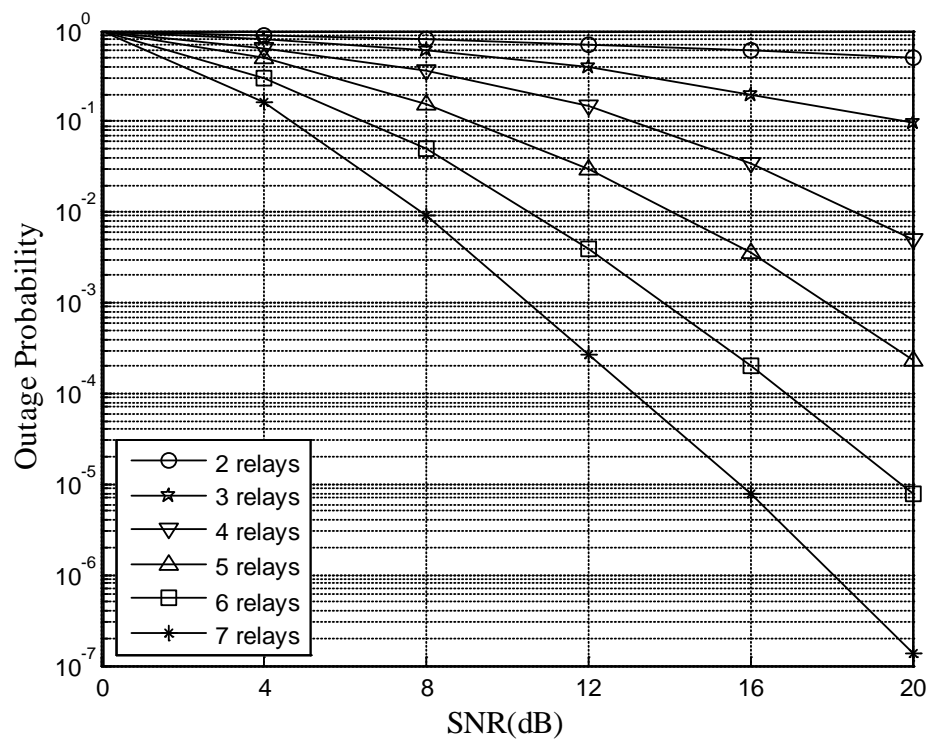


Figure 2. Outage probability as the number of relay increases

图 2. 单簇内中继个数增多时, 中断概率的比较

当协作重传发生时，选择链路 1 或 2 的稳态概率为：

$$P_1 = \frac{P_2^{out}}{P_1^{out} + P_2^{out}} = \frac{1 - \exp\left(-\frac{\lambda_2 + \lambda_4}{\lambda_2 \lambda_4} r_{th}\right)}{2 - \exp\left(-\frac{\lambda_1 + \lambda_3}{\lambda_1 \lambda_3} r_{th}\right) - \exp\left(-\frac{\lambda_2 + \lambda_4}{\lambda_2 \lambda_4} r_{th}\right)} \quad (10)$$

$$P_2 = \frac{P_1^{out}}{P_1^{out} + P_2^{out}} = \frac{1 - \exp\left(-\frac{\lambda_1 + \lambda_3}{\lambda_1 \lambda_3} r_{th}\right)}{2 - \exp\left(-\frac{\lambda_1 + \lambda_3}{\lambda_1 \lambda_3} r_{th}\right) - \exp\left(-\frac{\lambda_2 + \lambda_4}{\lambda_2 \lambda_4} r_{th}\right)} \quad (11)$$

由上式可知，在进行簇间切换重传时，由{S-簇 1-D}构成的协作链路 1 和{S-簇 2-D}构成的协作链路 2 参与切换重传的稳态概率分别为 P_1 、 P_2 。

3.3. 系统中断概率

在第一跳中，S 以广播的形式同时向 D 以及簇 1，簇 2 内的所有中继节点发送数据分组。

链路 S-D 发生中断的概率 $P_{S,D}^{out}$ 可以表示为：

$$P_{S,D}^{out} = P_r \{C_{S,D} < R_{th}\} = P_r \left\{ |h_{S,D}|^2 < r_{th} \right\} \quad (12)$$

链路 S-簇 1 发生中断的概率 P_{S,C_1}^{out} 可表示为：

$$\begin{aligned} P_{S,C_1}^{out} &= P_r \{C_{S,C_1} < R_{th}\} = P_r \left\{ \max_{m=1}^M \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{|h_{S,R_m^{C_1}}|^2 E}{N_0} \right) < R_{th} \right\} \\ &= P_r \left\{ \max_{m=1}^M |h_{S,R_m^{C_1}}|^2 < r_{th} \right\} = \prod_{m=1}^M P_r \left\{ |h_{S,R_m^{C_1}}|^2 < r_{th} \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

由于 $F_{\gamma_{C_1}}(x_m)$ 独立同分布，可以得到为：

$$P_{S,C_1}^{out} = \prod_{m=1}^M P_r \left\{ |h_{S,R_m^{C_1}}|^2 < r_{th} \right\} = \prod_{m=1}^M F_{\gamma_{C_1}}(r_{th}) = \left(1 - e^{-\frac{r_{th}}{\lambda_1}} \right)^M \quad (14)$$

同理可以得到：

$$P_{S,C_2}^{out} = \prod_{n=1}^N P_r \left\{ |h_{S,R_n^{C_2}}|^2 < r_{th} \right\} = \prod_{n=1}^N F_{\gamma_{C_2}}(r_{th}) = \left(1 - e^{-\frac{r_{th}}{\lambda_2}} \right)^N \quad (15)$$

在第 2 跳中，由簇 1 内选取的最优中继 $R_0^{C_1}$ 或簇 2 内选取的最优中继 $R_0^{C_2}$ 向 D 重传该数据分组，则对应的中断概率为：

$$P_{R_0^{C_1},D}^{out} = P_r \{C_{R_0^{C_1},D} < R_{th}\} = P_r \left\{ \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{|h_{R_0^{C_1},D}|^2 E}{N_0} \right) < R_{th} \right\} = P_r \left\{ |h_{R_0^{C_1},D}|^2 < r_{th} \right\} = 1 - e^{-\frac{r_{th}}{\lambda_3}} \quad (16)$$

$$P_{R_0^{C_2},D}^{out} = P_r \{C_{R_0^{C_2},D} < R_{th}\} = P_r \left\{ \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{|h_{R_0^{C_2},D}|^2 E}{N_0} \right) < R_{th} \right\} = P_r \left\{ |h_{R_0^{C_2},D}|^2 < r_{th} \right\} = 1 - e^{-\frac{r_{th}}{\lambda_4}} \quad (17)$$

综上所述,可以得到所提协议的中断概率为:

$$P^{out} = P_{S,D}^{out} \left\{ P_1 \left[P_{S,C_1}^{out} + (1 - P_{S,C_1}^{out}) P_{R_0^{C_1},D}^{out} \right] + P_2 \left[P_{S,C_2}^{out} + (1 - P_{S,C_2}^{out}) P_{R_0^{C_2},D}^{out} \right] \right\} \quad (18)$$

结合上述式可得:

$$P^{out} = \left(1 - e^{-\frac{r_{th}}{\lambda}} \right) \frac{1 - B}{2 - (A + B)} \left[\left(1 - e^{-\frac{r_{th}}{\lambda_1}} \right)^M e^{-\frac{r_{th}}{\lambda_3}} + \left(1 - e^{-\frac{r_{th}}{\lambda_3}} \right) \right] + \left(1 - e^{-\frac{r_{th}}{\lambda}} \right) \frac{1 - A}{2 - (A + B)} \left[\left(1 - e^{-\frac{r_{th}}{\lambda_2}} \right)^N e^{-\frac{r_{th}}{\lambda_4}} + \left(1 - e^{-\frac{r_{th}}{\lambda_4}} \right) \right] \quad (19)$$

$$\text{其中 } A = \exp\left(-\frac{\lambda_1 + \lambda_3}{\lambda_1 \lambda_3} r_{th}\right), \quad B = \exp\left(-\frac{\lambda_2 + \lambda_4}{\lambda_2 \lambda_4} r_{th}\right)。$$

3.4. 能效分析

在无线传感器网络中,如果节点直接将数据发送给汇聚节点,那么对所需能量要求会过高,并且对普通节点的传输性能会有过高的要求。对于大多数的普通传感器节点,短距离的通信相对更节省能量,也有利于提高传输的可靠性。

无线传感器网络中的系统能耗主要有传输能耗、接收能耗、电路能耗和计算能耗等。在无线传感器网络中计算能耗通常远远小于传输能耗,所以本文的能耗模型主要考虑其传输能耗、接收能耗。

根据文献[14],在距离为 d 内节点 i 向节点 j 传输 k 比特数据产生的传输能耗 E_t 可以表示为

$$E_t = kE_{elec} + k\varepsilon_{amp}d^2 \quad (20)$$

其中 E_{elec} 为电路能耗,是由于模数转化能耗、过滤器能耗、混合器能耗、频率放大器能耗等组成的,与传输路径的长度无关,基本保持不变。 ε_{amp} 为发射放大器向单位面积发射 1 比特数据的功耗。从上式可以看出, E_t 的大小依赖于节点 i 和节点 j 之间传输距离以及所传输数据量的大小。接收能量消耗 E_r 可被定义为:

$$E_r = kE_{elec} \quad (21)$$

从传输能耗和接收能耗的公式可以看出,接收数据分组所产生的能耗也是很大的,所以协议中不仅要尽量避免节点之间的长距离传输,并且要尽量提高传输可靠性来避免重传过多的数据量。

那么,数据分组经第一次直传结束后整个传输过程所消耗的平均能量可以表示为:

$$E_{T_1} = (1 - P_{S,D}^{out})(E_t + E_r) \quad (22)$$

数据分组进行簇间切换整个传输过程所消耗的平均能量可以表示为:

$$E_{T_2} = \left[2P_{S,D}^{out}(1 - P_{S,C_1}^{out}) \left(1 - P_{R_0^{C_1},D}^{out} \right) + 2P_{S,D}^{out}(1 - P_{S,C_2}^{out}) \left(1 - P_{R_0^{C_2},D}^{out} \right) \right] (E_t + E_r) \quad (23)$$

结合式(20)、(21)、(22)、(23),则可得本文所提协议中传输一个数据分组所消耗的总能量 E_T 为:

$$E_T = E_{T_1} + E_{T_2} = \left[(1 - P_{S,D}^{out}) + 2P_{S,D}^{out}(1 - P_{S,C_1}^{out}) \left(1 - P_{R_0^{C_1},D}^{out} \right) + 2P_{S,D}^{out}(1 - P_{S,C_2}^{out}) \left(1 - P_{R_0^{C_2},D}^{out} \right) \right] (2kE_{elec} + k\varepsilon_{amp}d^2)$$

其中 k 表示一个数据分组中有 k 比特数据。

结合上述的能耗模型,定义系统的能量效率 η 为单位能量下目的节点正确接收的平均数据分组个数则所提协议中系统的能量效率 η 为

$$\eta = \frac{1 - FER}{E_T} = \frac{1 - P_{S,D}^{out} \left(P_{S,C_1}^{out} + (1 - P_{S,C_1}^{out}) P_{R_0^{C_1},D}^{out} \right) \left(P_{S,C_2}^{out} + (1 - P_{S,C_2}^{out}) P_{R_0^{C_2},D}^{out} \right)}{\left[(1 - P_{S,D}^{out}) + 2P_{S,D}^{out} (1 - P_{S,C_1}^{out}) (1 - P_{R_0^{C_1},D}^{out}) + 2P_{S,D}^{out} (1 - P_{S,C_2}^{out}) (1 - P_{R_0^{C_2},D}^{out}) \right] (2kE_{elec} + k\epsilon_{amp}d^2)}$$

4. 仿真分析

本小节以中断概率和系统能效为参考指标进行了仿真分析，研究了传感器网络中基于簇间切换的 CARQ 系统性能。通过仿真比较了簇 1 簇 2 内中继节点个数的增加对所提协议性能的影响。

在瑞利慢衰落信道条件下，设最小发送速率 $R_{th} = 1$ 时，所有发射节点有相同的功率，定义 $SNR = \frac{E}{N_0}$ ，

采用 BPSK 调制， $|h_{S,R_0^{C_1}}|^2$ ， $|h_{S,R_0^{C_2}}|^2$ ， $|h_{R_0^{C_1},D}|^2$ ， $|h_{R_0^{C_2},D}|^2$ 对应的参数 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$ ， $\lambda_3 = \lambda_4 = 2$ 。图 3 给出了簇 1，簇 2 内参与协作的中继节点个数分别为 $M = N = 1$ ， $M = N = 2$ ， $M = N = 3$ 时增加时系统的中断概率曲线图。整体来看，簇内节点越多时，这种簇间切换重传系统的中断概率就越小。特别是 SNR 较高时，可以看出所提协议中断概率得到很明显的下降。从图中可以看出，之前的理论推导值和仿真值之间吻合得很好，进一步验证了所给中断概率表达式的正确性，理论的分析值可以作为实际情况的有效估计。

图 4 显示了在簇 1 内中继节点数目固定为 2，簇 2 内中继节点数目 N 分别为 1, 2, 3, 4, 5 时，系统中中断概率的分析。比较了当 $SNR = 0$ ， $SNR = 5$ 和 $SNR = 10$ 三种状态下的系统中中断概率。从图中可以看出，簇 2 内节点数目 N 增大时，中断概率会下降。尤其是 SNR 越大时，增大 N 的个数会使得中断概率下降的更明显。

图 5 讨论了 SNR 增大时，系统的能量效率性能。从图中可以看出随着 SNR 增大，系统的能效先迅速增加然后缓慢变化。这是因为根据本文协议，如果中继节点没有正确接收或者 S-D 直传成功时，不考虑中继节点的能耗。当 SNR 较小时，直传失败的概率较大。而当 SNR 较大时，直传成功比例增大，因为直传比中继重传能效要高，所以能效随之缓慢变化。

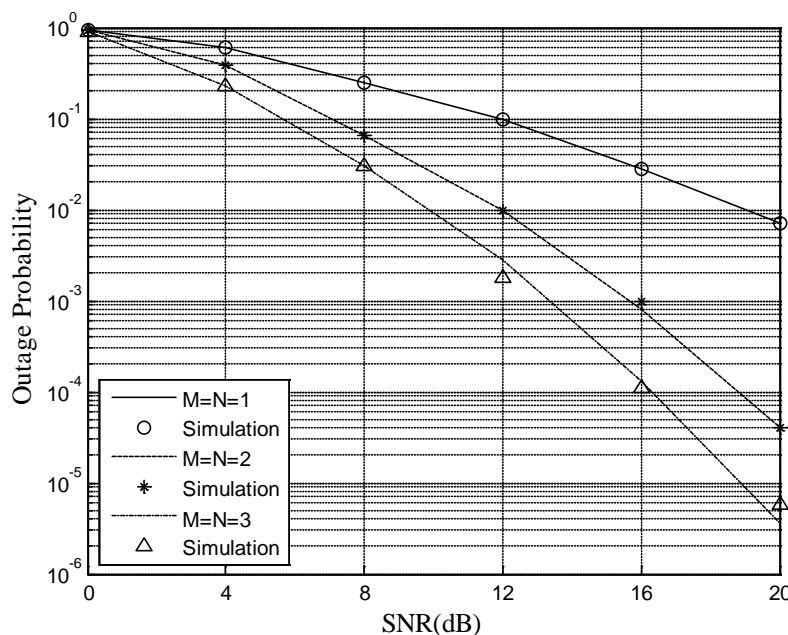


Figure 3. Outage probability as the number of relay is different

图 3. 簇内中继个数不同的系统中中断概率比较

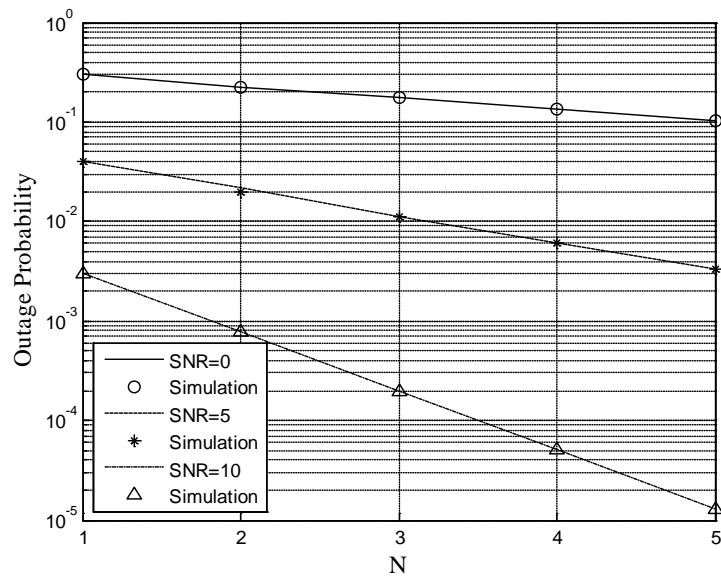


Figure 4. Outage probability as N increases ($M = 2$)

图 4. 簇 1 内中继个数 M 固定为 2, 簇 2 内中继个数 N 增大时, 系统中断概率的比较

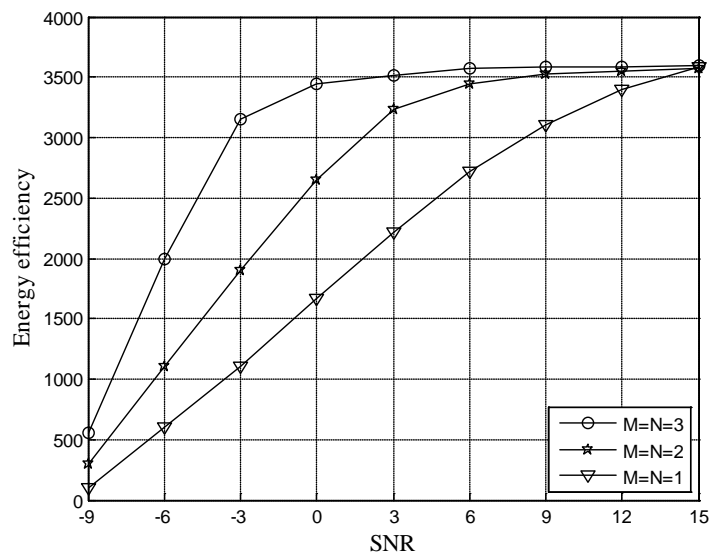


Figure 5. Energy efficiency as the number of relay increases

图 5. 簇内中继个数不同的系统能量效率性能比较

5. 结束语

本文首先针对无线传感器网络环境下需要高能效和高可靠性的需求, 提出了一种基于簇间切换的 CARQ 协议。该算法不仅拥有较高的系统能效, 还能保证传输的可靠性, 因而具有很强的实用参考价值。该方案在无线传感器网络中不需要特别复杂的硬件设备, 非常有利于网络中的节点节省能耗。文中给出了不同簇之间切换时系统中断概率的分析模型, 该模型能够分析在簇内中继节点发生变化时系统中断概率的变化趋势。以传感器网络为研究模型, 分析了两个簇之间进行切换的系统的中断概率和能量效率。从理论分析和仿真证实, 本文所提的协议能够很好的吻合实际系统的中断概率, 从而指导实际情况的有效估计。

基金项目

国家自然科学基金项目资助(61663024)。

参考文献 (References)

- [1] 匡哲君. 无线传感器网络节能策略的研究[D]: [博士学位论文]. 吉林: 吉林大学, 2014.
- [2] Li, S.P., Zhou, Y.Q. and Zhou, Y. (2014) Delay and Energy Efficiency Analysis of Multicast Cooperative ARQ over Wireless Networks. *Acta Informatica*, **51**, 51-60. <https://doi.org/10.1007/s00236-013-0192-4>
- [3] 胡映波, 蔡跃明, 龚坚. 无线传感器网络中基于放大转发的机会协同 ARQ 协议吞吐量及能效分析[J]. 电路与系统学报, 2012, 17(3): 102-109.
- [4] Byun, D., Rhee, Y. and Sang, J. (2008) Performance Analysis of a Decode-and-Forward based Hybrid-ARQ Protocol. *IEEE Military Communications Conference (MILCOM'08)*, 1-5, 16-19.
- [5] Nguyen, H.T. and Nguyen, H.H. (2008) Power-Efficient Cooperative Coding with Hybrid-ARQ Soft Combining for Wireless Sensor Networks in Block-Fading Environment. *International Journal of Sensor Networks*, **4**, 3-12. <https://doi.org/10.1504/IJSNET.2008.019247>
- [6] Zhang, C., Zhang, J., Wei, G. and Ren, P. (2012) An Efficient Cooperative ARQ Protocol for Wireless Relay Networks. *Computer Communications*, **36**, 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2012.08.002>
- [7] 胡映波, 蔡跃明. 无线传感器网络中基于切换与保持节点选择的协同 ARQ 协议[J]. 通信学报, 2010(11): 17-24.
- [8] Zhang, Q.Q., Gao, W.D., Peng, M.G. and Wang, W.B. (2008) Partner Selection Strategies in Cooperative Wireless Networks with Optimal Power Distribution. *Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, **15**, 47-50, 58. [https://doi.org/10.1016/S1005-8885\(08\)60106-5](https://doi.org/10.1016/S1005-8885(08)60106-5)
- [9] Chen, G.J., Tian, Z. and Gong, Y. (2014) Max-Ratio Relay Selection in Secure Buffer-Aided Cooperative Wireless Networks. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, **4**, 719-729. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2014.2307672>
- [10] Lin, S. and Ma, S.X. (2011) Fast Relay Selection Algorithm Based on Symbol Error Probability. *Journal of Computer Applications*, **31**, 613-616. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1087.2011.00613>
- [11] 孙立悦, 赵晓晖, 魏明. 基于中断概率的协作通信中继选择与功率分配算法[J]. 通信学报, 2013, 34(10): 84-91.
- [12] 徐建成, 史浩山, 王结太. 无线传感器网络中分集传输的 ARQ 协议能耗分析[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(7): 4-7.
- [13] Cui, H.Y., Song, L.Y. and Jiao, B.L. (2014) Weighted Bidirectional Relay Selection for Outdated Channel State Information. *IEEE Transactions on Communications*, **62**, 500-509. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2014.010414.120940>
- [14] Jamshidi, A. and Nasiri-Kenari, M. (2008) Performance Analysis of Transmitter-Side Cooperative-Receiver-Side-Relaying Schemes for Heterogeneous Sensor Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Tech*, **57**, 1548-1563. <https://doi.org/10.1109/TVT.2007.909299>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8801, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: csa@hanspub.org