

# 无线传感器网络基于通信距离的协作 ARQ 策略

靳 勇<sup>1</sup> 白光伟<sup>2</sup> 常晋义<sup>1</sup>

(常熟理工学院计算机科学与工程学院 常熟 215500)<sup>1</sup>

(南京工业大学计算机科学与技术系 南京 210009)<sup>2</sup>

**摘 要** 提出了一种适用于无线传感器网络的基于通信距离的多中继协作 ARQ 策略,从而为无线数据传输提供了可靠性,同时获得了较高的吞吐率和能量效率。首先根据 ARQ 机制和在链路层将数据包分割为若干个数据帧的规律,建立一种马尔科夫链模型;在此基础上,分析饱和吞吐率、数据包丢弃概率、平均时延和能效的性能随通信距离的变化规律;最后提出了基于通信距离的协作 ARQ 策略。针对线性无线传感器网络,分析比较了所提协作 ARQ 与传统 ARQ 的通信性能。数学分析结果表明,所提协作 ARQ 能获得比传统 ARQ 更优的饱和吞吐率、可靠性和能效。

**关键词** 无线传感器网络,协作通信,自动请求重传,马尔科夫链,性能分析

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Cooperative ARQ Mechanism Based on Communication Distance for Wireless Sensor Networks

JIN Yong<sup>1</sup> BAI Guang-wei<sup>2</sup> CHANG Jin-yi<sup>1</sup>

(School of Computer Science & Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China)<sup>1</sup>

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)<sup>2</sup>

**Abstract** This paper proposed a cooperative automatic repeat request (ARQ) mechanism with multiple relays based on communication distance, in order to achieve high energy efficiency, saturation throughput rate and reliable transmission simultaneously. Considering the characteristics of traditional ARQ mechanism and division of network layer packets into link layer frames, a Markov chain model was built for analyzing the characteristics of the saturation throughput rate, packet dropping probability, average delay and energy efficiency with the different communication distance. On the other hand, a cooperative ARQ based on the Markov model was established for performance analysis and evaluation of the mechanism proposed in this work. Especially, a linear WSNs model was considered. The mathematical analyses show that compared with the traditional ARQ the proposed cooperative ARQ can perform better in terms of saturation throughput rate, reliability and energy efficiency.

**Keywords** Wireless sensor networks, Cooperative communication, Automatic repeat request, Markov chain, Performance evaluation

## 1 引言

在无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)中,信息的感知、收集和处理等任务完全由单个传感器节点承担,会严重影响网络通信性能和生命周期。而无线通信系统融合多种异构网络关键技术的下一代协作通信技术<sup>[1]</sup>,可以在提供可靠性<sup>[2]</sup>的同时也不占用额外带宽和消耗过多能量<sup>[3]</sup>,通过共享节点资源,依靠传感器节点间的相互协作来完成以上操作。因此在数据传输可靠性和高能效之间寻求一种数据发送模式和差错控制策略,以提高 WSNs 有限资源的利用率和通信性能得到了学术界和工业界的广泛关注,并已经取得了一系列成果<sup>[4-13]</sup>。

然而已有的差错控制策略仍然存在一些问题。文献[4]基于 Kalman 滤波器预测当前的网络状态,提出一种用于多跳无线传感器网络数据传输的数据链路层自适应混合 FEC/ARQ 控制策略。文献[5]设计了一种 RBC 网络编码算法,并开发了一种 ACK-less 的基于协作策略的数据传输方法来有效地使用网络资源。文献[6]在 Nakagami\_m 信道上推导了适用于任意中继数的 CARQ(Cooperative ARQ, CARQ)误帧率表达式,证明了 CARQ 比传统 ARQ 获得了更好的性能。文献[7]提出的协作 HARQ 对两用户增加冗余帧,采用物理层网络编码,然后将其发送至基站,并只需较少的硬件和带宽资源。但是前期研究结果表明<sup>[8]</sup>,当点到点通信距离小于一定值时 ARQ 能效几乎保持一条直线,大于该值后会急剧下

到稿日期:2011-12-21 返修日期:2012-03-16 本文受国家自然科学基金(61073197),江苏省自然科学基金项目(BK2010548),江苏省科技支撑计划项目(BE2011186)资助。

靳 勇(1981-),男,硕士,讲师,主要研究方向为无线传感器网络、协作通信、差错控制、性能分析, E-mail: njutjinyong@yahoo.com.cn; 白光伟(1961-),男,博士,教授,主要研究方向为网络体系结构和协议、性能分析与评价;常晋义(1955-),男,教授,主要研究方向为空间决策支持系统、数据库安全技术。

降,因此可以考虑在此基础上建立协作机制。接着,文献[9]提出了一种基于切换与保持节点选择的协同 ARQ,并在一种广泛使用的能耗模型上建立了一种马尔科夫链模型。研究结果表明,所提协议能获得相比传统 ARQ 更优的吞吐量和能效性能。然而该马尔科夫链模型只是分析了系统吞吐量,对于丢包率、时延和能效未做深入研究。随后,文献[10]在无编码两跳中继网中研究了考虑各节点的最大传输次数受限的一种交互层协同设计。文献[11]提出的基于相邻节点协作的 WSNs 可靠传输方案通过选择成功监听到数据传输的相邻节点来承担协作传输任务以降低重传次数,提高了传输效率并有效降低了端到端的传输时延。Lee 等<sup>[12]</sup>针对基于译码转发的协作 ARQ 中继机制进行了性能分析,并给出了基于信道质量的能量分配算法。同时 Harsini 等<sup>[13]</sup>发现信道相关性对基于自适应调制编码的 HARQ 性能具有重要影响而且该协议在空间相关衰弱信道上也具有良好的表现。但是网络层数据包在链路层一般会被分割为若干个链路层数据帧。文献[10-13]均忽略了链路层数据帧传输对通信性能的影响。

本文的主要工作包括:(1) 根据 ARQ 机制和在数据包分割为若干个链路层数据帧的基础上,建立一种适用于传统 ARQ 和协作 ARQ 的二维马尔科夫链数学模型;(2) 针对(1)中建立的数学模型分析了传统 ARQ 的饱和吞吐率、数据包丢弃概率、时延和能效规律,并据此建立基于通信距离的协作 ARQ 策略;(3) 针对线性 WSNs,对所提协作 ARQ 与传统 ARQ 在饱和吞吐率、数据包丢弃概率和能效等方面进行性能分析与测试,数学分析验证了所提协作 ARQ 的高能效和高可靠性的结论。

## 2 网络模型和马尔科夫链模型

### 2.1 网络模型

为了便于分析且不失一般性,考虑一个如图 1 所示的线性 WSNs 平台。其中共有 6 个节点、4 个辅助性中继节点,它们采用半双工信道,用于接收监听数据和发送协作数据,同时在正交无线链路上实现,所以中继节点之间相互无干扰。采用两种数据传输模式:(1) 直接传输方式下采用传统 ARQ;(2) 协作传输方式,即数据帧丢失或出错时选择相邻节点作为中继节点重传数据帧。

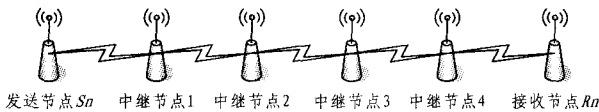


图 1 线性 WSNs 网络拓扑结构

设  $D_j$  表示发送节点与接收节点间端到端通信距离, $j$  为每个数据帧的重传次数, $H_{\max}$  为最大重传次数。此外前期研究结果表明<sup>[8]</sup>,当发送节点与下一跳接收节点间通信距离小于 40 米时传统 ARQ 能效几乎为一条直线,大于 40 米后能效急剧下降,因此给出直接传输时端到端通信距离的门限值,记为  $D_0$ ;节点发送数据帧时在任意传输阶段端到端的通信距离可用式(1)计算。

$$D_j = \begin{cases} D_0, & D_j < D_0; j=1 \\ jD_0, & D_j \bmod D_0 = 0; j = D_j / D_0 \\ jD_0, & D_j \bmod D_0 \neq 0; j = [D_j / D_0] + 1 \end{cases} \quad (1)$$

### 2.2 马尔科夫链模型

当数据包在无线链路上传输时由于无线链路高误码率特

性,使得部分数据包出错或丢失,发送节点将重传该数据包;同时每一个数据包在链路层被分割为若干个数据帧存储在缓冲区队列中。假设每个数据包被分割为  $m$  个数据帧,编号为  $1, 2, 3, \dots, m$ ;每次按编号从大到小依次发送。因此采用直接传输方式时,根据数据包分割为数据帧的个数和重传次数建立一种适用于传统 ARQ 的马尔科夫链模型。

设  $H(t)$  表示传感器节点在  $t$  时刻数据帧的重传次数, $F(t)$  表示传感器节点在  $t$  时刻发送的数据包在链路层分割后的数据帧。由于无线链路中断与数据帧丢失是一个相互独立的随机过程,将来的无线链路中断与过去的的数据帧发送情况无关,因此  $\{H(t), F(t)\}$  构成了一个离散的二维马尔科夫链模型。

数据帧发送过程中,各种单步状态转移概率可以计算如下:

$$\begin{cases} P\{j, k | j, k+1\} = 1 - P_{\text{ARQ}} \\ P\{0, k | j, 0\} = (1 - P_w) / D_j \\ P\{0, k | H_{\max}, 0\} = 1 / D_j \\ P\{j+1, k | j, k\} = P_{\text{ARQ}}^j \end{cases} \quad (2)$$

式中,记  $P\{j_1, k_1 | j_0, k_0\} = P\{H(t) = j_1, F(t) = k_1 | H(t) = j_0, F(t) = k_0\}$ , $P_{\text{ARQ}}$  表示 ARQ 的误帧率。图 2 为马尔科夫链状态转移图,从中可以看出当重传次数达到最大后,如果再发生数据帧丢失,则主动丢弃该数据帧,同时其所属的数据包将会丢弃, $P_w$  表示数据包丢弃概率。

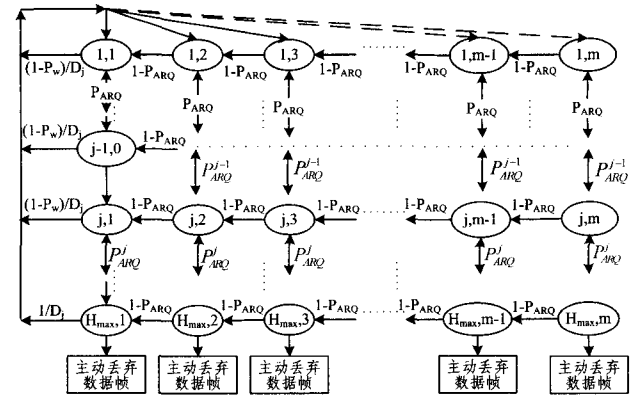


图 2 二维马尔科夫链状态转移图

记  $b_{j,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{H(t) = j, F(t) = k\}$  为马尔科夫链的稳态概率分布,由马尔科夫链相关性可得如下关系:

$$b_{j,1} = P_{\text{ARQ}} b_{j,1,1} \quad j \in [1, H_{\max}] \quad (3)$$

$$b_{j,k} = \frac{m-k}{m} \frac{1}{1 - P_{\text{ARQ}}} b_{j,1} \quad j \in [1, H_{\max}] \quad k \in [1, m] \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{H_{\max}} \sum_{k=1}^m b_{j,k} = 1 \quad (5)$$

式中, $b_{1,1}$  表示数据包中的编号为 1 的数据帧第 1 次重传时的稳态概率; $b_{j,1}$  表示数据包中编号为 1 的数据帧经过  $j$  次重传时的稳态概率。

由式(3)~式(5)可以得出:

$$b_{1,1} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{H_{\max}} \left(1 + \frac{1}{1 - P_{\text{ARQ}}} \frac{m}{2}\right) P_w^j} \quad (6)$$

因为节点发送数据包只会数据帧编号为 1 时才认为是成功发送,所以数据包成功发送概率为:

$$P_S = (1 - P_{\text{ARQ}}^{H_{\max}+1})^m \quad (7)$$

在传感器节点物理属性、端到端通信距离、数据包分割为

数据帧的个数等参数已知情况下,可由式(1)~式(7)计算出  $H_{\max}$ ,  $P_s$  值且唯一。

当采用协作通信方式时,辅助性中继节点承担转发或重传数据的任务。设  $H(t)$  表示传感器节点在  $t$  时刻的数据帧协作传输跳数,  $j$  为每个数据帧所采用的协作传输跳数且  $j=1$  表示直接传输,  $H_{\max}$  为根据端到端通信距离所计算得到的最大协作传输跳数,每选择一个中继节点传输数据帧就等价于重传一次数据帧。 $\{H(t), F(t)\}$  构成了一个适用于协作传输方式的马尔科夫链模型。此外,  $b_{1,1}$  表示数据包中的编号为 1 的数据帧采用直接传输方式时的稳态概率;  $b_{j,1}$  表示数据包中编号为 1 的数据帧经过  $j$  跳协作传输时的稳态概率。采用该马尔科夫链数学模型分析协作传输方式下的通信性能时做如下假设:如果发送节点向接收节点靠近,则每次发送新的数据包时,协作传输跳数从 1 开始逐渐增大至  $H_{\max}$ ;如果发送节点离接收节点越来越远,则每次发送新的数据包时,协作传输跳数从  $H_{\max}$  开始逐渐减小至 1。

### 3 基于通信距离的协作 ARQ 策略

基于第 2 节中建立的马尔科夫链模型,本节给出饱和吞吐量、数据包丢弃概率、平均时延和能效等性能的分析模型;然后通过分析直接传输的性能变化规律,得出两个点到点通信距离门限值,据此提出具有两种不同级别可靠性的协作 ARQ 策略。

#### 3.1 饱和吞吐量分析

设  $S_1$  和  $S_2$  分别表示数据包有效载荷和总传输数据(单位:字节),如式(8)和式(9)所示;  $\eta_T$  表示饱和吞吐量,如式(10)所示。

$$S_1 = mT \frac{L_{payload}}{L_{DATA} + L_{ACK}} (1 - P_{ARQ}^{H_{\max}+1})^m \quad (8)$$

$$S_2 = mT \left( \frac{1 - P_{ARQ}^{H_{\max}+1}}{1 - P_{ARQ}} \right) \frac{L_{payload}}{L_{DATA} + L_{ACK}} \quad (9)$$

$$\eta_T = \frac{S_1}{S_2} = (1 - P_{ARQ}) (1 - P_{ARQ}^{H_{\max}+1})^{m-1} \quad (10)$$

#### 3.2 数据包丢弃概率分析

由图 2 可知,数据帧丢弃只会发生在  $\{H_{\max}, 0\}$  阶段即重传次数或协作传输跳数达到最大。如果数据帧再发送失败,则该数据帧将会丢弃。因此数据帧丢弃概率  $P_{LLF\_LOST}$  如式(11)所示,由此可得到数据包丢弃概率,如式(12)所示。

$$P_{LLF\_LOST} = P_{ARQ}^{H_{\max}+1} \quad (11)$$

$$P_w = 1 - (1 - P_{ARQ}^{H_{\max}+1})^m \quad (12)$$

#### 3.3 平均时延分析

每个数据帧的平均重传次数或协作传输跳数  $N_{avg}$  可以计算如下:

$$N_{avg} = p_{ARQ} + p_{ARQ}^2 + p_{ARQ}^3 + \dots + p_{ARQ}^{H_{\max}} \quad (13)$$

因此数据包平均往返时延如式(14)所示。

$$T_{Packet} = mT \frac{1 - P_{ARQ}^{H_{\max}+1}}{1 - P_{ARQ}} \quad (14)$$

式中,  $T$  表示链路层传输一个数据帧所需的往返时延。直接传输时每个数据帧重传次数或协作传输过程中每一个数据帧协作传输跳数不同且为  $N_{avg} + 1$ 。

#### 3.4 能效分析

根据前期研究结果<sup>[8]</sup>可知传统 ARQ 能效  $\eta_p$ ,如式(15)表示。

$$\begin{aligned} \eta_p &= \frac{E_{eff}}{E} (1 - P_{ARQ}) \\ &= \frac{(I_{tr} + I_{re}) V_{radio} L_{payload} T_r}{(I_{tr} + I_{re}) V_{radio} (L_{DATA} + L_{ACK}) T_r} (1 - P_{ARQ}) \\ &= \frac{L_{payload}}{L_{DATA} + L_{ACK}} (1 - P_{ARQ}) \end{aligned} \quad (15)$$

式中,  $T_r = 1/R_{radio}$  是 Mica2 型节点的 CC1000 射频模块传输 1 比特数据所用的时间。

#### 3.5 端到端通信性能

针对第 4 节所述的无线传感器网络平台,根据前文给出的端到端通信性能分析模型,图 3 给出了直接传输方式下采用 ARQ 时,端到端通信距离在不同的  $H_{\max}$  和  $m$  时对端到端通信性能的影响。从图 3(a)可以看出,  $D_j \in [0, 40]$  米时,吞吐率均为 1;  $D_j \in [50, 100]$  米时,吞吐率均约为 0.99,  $H_{\max}$  和  $m$  对于饱和吞吐量影响不大。当  $D_j$  大于 100 米后饱和吞吐率开始急剧下降,  $H_{\max}=5$  且  $m=3$  时比其他情况下的饱和吞吐率要好一些。表明远距离通信直接传输方式无法提供高吞吐率,必须考虑协作传输,以便有效地提高吞吐率。

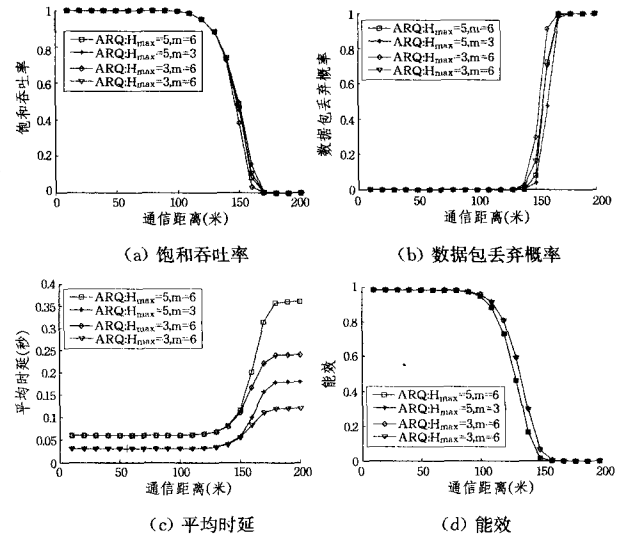


图 3 传统 ARQ 的端到端通信性能变化

图 3(b)给出了 4 种情况下数据包丢弃概率随通信距离的变化规律。可以看出,  $D_j \in [0, 100]$  米时,数据包丢弃概率均为 0;当  $D_j = 110$  米时,  $H_{\max}=3$  且  $m=6$  情况下的数据包丢弃概率为 0.000001,最先开始丢弃数据包,其它 3 种情况均为 0,  $H_{\max}$  和  $m$  对于数据包丢弃概率影响也不大。当  $D_j$  大于 140 米后,数据包丢弃概率开始急剧增大。发现重传次数越大,数据包分割为数据帧的个数越小,数据包丢弃概率就越小。这表明每次重传采用协作传输方式可以有效地降低远距离通信时数据包的丢弃概率,为 WSNs 无线传感器网络提供高可靠性。

4 种情况下端到端平均往返时延随通信距离的变化规律如图 3(c)所示。发现,  $D_j \in [0, 40]$  米且  $m=6$  时延均为 0.06 秒,  $m=3$  时均为 0.030003 秒;  $D_j \in [50, 100]$  米且  $m=6$  时延从 0.060001 秒增大至 0.060348 秒,  $m=3$  时从 0.030003 秒增大至 0.030174 秒,说明数据包被分割的数据帧个数越小,时延越小。此外,当  $D_j$  大于 100 米后  $m$  相同时,  $H_{\max}$  越大,时延越大,而且随着通信距离的增大不同  $H_{\max}$  情况下时延相差越来越大。这表明减小重传次数或协作传输跳数可以有效减小端到端平均往返时延。

图 3(d)给出了 4 种情况下能效随通信距离的变化规律。可以看出,能效与重传次数或协作传输跳数无关,只与数据包分割后的数据帧个数有关。分割后的数据帧个数越小,能效越高,因此短数据包在 WSNs 上采用多中继协作通信方式具有更优的性能,可以高效地使用传感器节点能量。

### 3.6 协作 ARQ 策略

通过分析传统 ARQ 马尔科夫链模型在饱和吞吐率、数据包丢弃概率、时延和能效随通信距离的变化规律,不仅验证了该数学模型有效性,而且表明数据帧丢失后不应由发送节点重传而应采用协作传输方式重传该数据帧能有效降低重传次数提高传输效率。此外,发现  $D_j \in [0, 40]$  米时各方面性能均达到最佳值,  $D_j \in [50, 100]$  米时性能略差,  $D_j$  大于 100 米后通信性能急剧下降。因此,可以设定两个通信距离门限值:  $D_0 = 40$  米和  $D_0^* = 100$  米,据此建立了一种适用于 WSNs 的具有两种不同可靠性优先级的协作 ARQ (CARQ)。工作流程描述如下:

(1) 根据通信业务需求选择不同级别的可靠性,设定通信距离门限值为  $D_0$  或  $D_0^*$  并结合式(1)计算出最大协作传输跳数  $H_{\max}$ 。

(2) 如果  $D_j$  小于  $D_0$  或  $D_0^*$ , 采用直接传输方式(传统 ARQ), 否则根据 RSSI 测距技术<sup>[8]</sup> 选择通信距离小于  $D_0$  或  $D_0^*$  的节点作为下一跳接收节点即中继节点 1, 采用协作传输方式。

(3) 在中继节点  $i$  上 ( $i = 1, 2, \dots, H_{\max} - 1$ ), 分析判断该节点到接收节点  $R_n$  间端到端通信距离  $D_j(i)$ , 并根据式(1)计算出最大协作传输跳数  $H_{\max}(i)$ 。

(4) 如果  $D_j(i)$  小于  $D_0$  或  $D_0^*$ , 采用直接传输方式(传统 ARQ), 否则根据 RSSI 测距技术选择通信距离小于  $D_0$  或  $D_0^*$  的节点作为下一跳接收节点即中继节点  $i+1$ , 采用协作传输方式。

(5) 在  $H_{\max} - 1$  个中继节点上重复执行步骤(3)和步骤(4)直至数据帧成功发送至接收节点  $R_n$  或者主动丢弃该数据帧。

## 4 性能分析与评价

基于 Crossbow 公司使用的 Atmega-128L 处理器和 CC1000 射频模块的 Mica2 型节点的无线传感器网络平台进行研究, 无线信道采用对数距离路径损耗模型, 其它参数见表 1。

表 1 参数设置

符号	名称	数值
$\alpha$	MHR 和 FCS 长度之和	11 字节
$l_{ACK}$	ACK 包长	7 字节
$V_{radio}$	CC1000 电压	3 伏
$I_{tr}$	CC1000 发射端电流	8.5 毫安
$I_{re}$	CC1000 接收端电流	7 毫安
$BN$	噪声带宽	30 千赫兹
$R_{radio}$	发射数据速率	38.4 千波特
$T$	链路层传输一帧所需的往返时延	0.01 秒

在该模型中, 传感器节点的接收功率为

$$P_r(D_j) = P_t - P(d_0) - 10\beta g\left(\frac{D_j}{d_0}\right) \quad (16)$$

式中,  $\beta$  表示路径损耗参数且  $\beta = 3$ 。  $d_0$  表示近地参考距离, 取 30 米。由此得到接收端的信噪比  $\gamma_{dB}$ , 如式(17)所示。

$$\gamma_{dB} = P_r(d) - P_n \quad (17)$$

式中,  $P_n$  表示噪声功率。 Mica2 节点使用非相关 FSK 解调, 其误码率(BER; Bit Error Rate)  $P_b$  由式(18)给出。

$$P_b = \frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{2N_0}} \frac{E_b}{N_0} = \gamma \frac{B_N}{R_{radio}} \quad (18)$$

式中,  $\gamma$  是接收端的信噪比<sup>[8]</sup>,  $B_N$  是噪声带宽,  $R_{radio}$  是 CC1000 的数据发射速率。 ARQ 的误帧率  $P_{ARQ}$  可由式(19)得到。

$$P_{ARQ} = 1 - (1 - P_b)^{l_{DATA} + l_{ACK}} \quad (19)$$

式中,  $l_{DATA} = \alpha + l_{ACK}$  是数据帧长,  $l_{payload}$  表示负载长度,  $\alpha$  是帧头(MHR)和帧校验位(FCS)长度之和,  $l_{ACK}$  是 ACK 帧长。

设  $H_{\max}$  为协作传输跳数, 根据端到端的通信距离可由式(1)得到, 则结合式(8)至式(14)可获得所提 CARQ 的饱和吞吐率、数据包丢弃概率和平均时延。此外, 所提 CARQ 能效  $\eta$  可由式(20)求得。

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^m (H_i \eta_i)}{m} \quad (20)$$

式中,  $H_i$  表示编号为  $i$  数据帧的协作传输跳数,  $\eta_i$  表示编号为  $i$  数据帧的能效, 根据式(21)得到。

$$\eta_i = \begin{cases} \eta_0, & D_i \geq D_0 \\ \eta_0^*, & D_i < D_0 \end{cases} \quad (21)$$

式中,  $\eta_0$  和  $\eta_0^*$  可由式(18)、式(19)结合式(15)求得。

假设发送节点  $S_n$  与接收节点  $R_n$  之间端到端通信距离为 200 米,  $S_n$  以 10 米每秒的速度向  $R_n$  直线匀速移动, 其它节点静止, 因此  $S_n$  于 20 秒时与  $R_n$  重合, 此时停止发送数据, 分别采用所提 CARQ 和传统 ARQ 为无线传输提供端到端服务质量保障, 在此协作传输方式下, 根据通信距离门限值进行中继选择, 性能测试结果如图 4 所示。

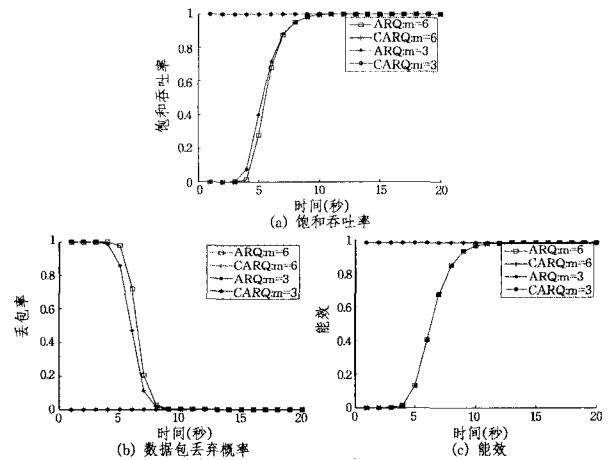


图 4 协作 ARQ 与传统 ARQ 的端到端通信性能对比

因为在协作传输方式下获得了分集增益、复用增益和路径损耗增益, 在 4 个辅助性中继节点中根据通信距离门限值  $D_0$  选择能保持最佳端到端通信性能的传感器节点作为中继节点重传数据帧, 所以通信性能始终保持最佳状态, 而且有效地扩大了无线传感器网络的覆盖范围, 使得远距离通信时也能够获得较好的通信性能。数据包被分割为 6 个和 3 个链路层数据帧时, 所提 CARQ 均能获得优于 ARQ 的通信性能, 表明所提 CARQ 可以为长数据包和短数据包在无线传感器网络上的通信提供有效的保障。此外, 在 10 秒之前端到端通信距离大于  $D_0$ , 传统 ARQ 的通信性能均弱于所提 CARQ, 之后开始

短距离通信,所提 CARQ 依然可以获得采用直接传输方式的 ARQ 的优越性。综上所述,所提 CARQ 不仅显著提高了传感器节点能量的使用效率,最大化了网络的寿命,而且为端对端的无线传输提供了有效的服务质量保障。

**结束语** 本文针对 WSNs 在数据传输过程中高可靠性和高能效的需求,提出了一种基于通信距离的多中继协作 ARQ 策略,以在提供有效传输可靠性的同时提高网络资源利用率。在 ARQ 机制和数据包在链路层分割为若干个数据帧的规律基础上建立了一种马尔科夫链模型,并给出了直接传输和协作传输方式下饱和吞吐量、数据包丢弃概率、平均时延和能效的分析模型,该模型能有效、准确地分析网络端到端通信性能;并在此基础上提出了一种协作 ARQ 策略。针对一种普适的线性移动无线传感器网络拓扑对所提策略与传统 ARQ 进行了性能测试,分析结果证实了所提 CARQ 相比传统 ARQ 具有更高的吞吐量、更低的数据包丢弃概率和更优的能效性能。这进一步表明,所提 CARQ 策略是一种非常适用于 WSNs 的具有高能效的可靠数据传输策略。

下一步工作是建立一种有效的测距技术,提高端到端和点到点通信距离测量的准确性和实时性;其次考虑一种能够充分考虑网络拓扑的动态变化和无线链路时变特性的协作中继选择算法;然后进一步优化发送节点和各中继节点的功能模块,降低协作 ARQ 传输数据过程的总体计算复杂度以提高其工作效率。

## 参考文献

- [1] Nosratinia A, Hunter T E, Hedayat A. Cooperative communication in wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10): 74-80
- [2] Laneman J N, Tse D N, Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080
- [3] Elhawary M, Hass Z J. Energy-Efficient Protocol for Cooperative Networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2011, 19(2): 561-574
- [4] 靳勇, 乐德广, 白光伟, 等. 多跳无线传感器网络自适应链路层 FEC/ARQ 控制策略[J]. 计算机科学, 2010, 37(8): 114-119
- [5] 张书奎, 樊建席, 崔志明. 无线传感器网络中可靠的数据协作传输机制[J]. 通信学报, 2010, 31(11): 30-40
- [6] 徐文波, 林家儒, 牛凯, 等. 多中继协作 ARQ 在 Nakagami-m 信道中的性能分析[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(2): 74-77
- [7] 孙岳, 李颖, 王新梅. 基于网络编码的协作 HARQ 协议[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(10): 2326-2331
- [8] 靳勇, 乐德广, 白光伟, 等. 无线传感器网络跳数和通信距离自适应差错控制策略[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(4): 596-600
- [9] 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, 31(11): 17-24
- [10] 孟庆民, 马宝萍, 高西奇, 等. 协同分集和截断 ARQ 在单中继无线网的使用: 一种交互层研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(11): 2593-2598
- [11] 方维维, 钱德沛, 刘轶. 一种相邻节点协作的无线传感器网络可靠传输方案[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(2): 33-37
- [12] Lee S, Su W F, Batalama S N, et al. Cooperative Decode-and-Forward ARQ Relaying: Performance Analysis and Power[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(8): 2632-2642
- [13] Harsini J S, Lahouti F, Levorato M. et al. Analysis of Non-Cooperative and Cooperative Type II Hybrid ARQ Protocols with AMC over Correlated Fading Channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(3): 877-889
- [10] Bohacek S, Hespanha J P, Obraczka O K, et al. Enhancing security via stochastic routing[C]//Proceeding of Computer Communications and Networks, 2002. Eleventh International Conference, 2002: 58-62
- [11] Brumbaugh-Smith J P, Shier D R. Minimax models for diverse routing[J]. INFORMS Journal on Computing, 2002, 14(1): 81-95
- [12] 杨超, 刘念祖. RepTrust: P2P 环境下基于声誉的信任模型[J]. 计算机科学, 2011, 38(3): 131-135
- [13] 姚寒冰, 胡和平, 卢正鼎, 等. 一种基于主观逻辑理论的 P2P 网络信任模型[J]. 计算机科学, 2006, 52(5): 30-35
- [14] 袁禄来, 曾国荪, 王伟. 基于 Dempster-Shafer 证据理论的信任评估模型[J]. 武汉大学学报: 理学版, 2006, 33(6): 29-31
- [15] Georgiadis L, Georgatsos P, Floros K, et al. Lexicographically optimal balanced networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(6): 818-829
- [16] 毛华, 毛晓亮, 李斌. 网络最大流部分割矩阵算法[J]. 计算机科学, 2011, 38(12): 229-231
- [17] Goldberg A V, Tarjan R E. A new approach to the maximum flow problem[J]. Journal of the ACM, 1988, 35(4): 921-940
- [18] Lee P C, Misra V, Rubenstein D. Distributed Algorithms for Secure Multipath Routing in Attack-Resistant Networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(6): 1490-1501
- [19] 王浩云, 张顺颐, 李君. 一种基于节点主观信任度的分布式多路径路由协议[J]. 南京邮电大学学报, 2009, 29(1): 33-37

(上接第 59 页)

- [2] Liang J, Kumar R, Ross K W. The FastTrack overlay: A measurement study[J]. Elsevier Computer Networks Journal, 2006, 50(6): 842-858
- [3] Kho W, Abdul B S, Henning S. Skype relay calls: Measurements and experiments[C]//IEEE INFOCOM Workshops. Phoenix: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008: 1-6
- [4] 陈福, 杨家海, 杨扬, 等. P2P/Web Service 与网格资源发现服务研究[J]. 计算机科学, 2008, 35(4): 16-19
- [5] 苏瀚, 汪芸. P2P 环境中基于信任度的服务路由系统的研究[J]. 计算机应用, 2006, 9(5): 230-233
- [6] Lu Y, Sebastien V. Peer-to-Peer Media Steaming Application Survey[C]//Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies, 2007. UBIKOM'07, 2007: 139-148
- [7] Maxemchuk N. Dispersy routing [C]// International Communications Conference, 1975: 10-13
- [8] Lou W, Liu W, Fang Y. SPREAD: Enhancing data confidentiality in mobile ad hoc networks[C]// Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2004: 2404-2413
- [9] Yuan L, Meng C X, Dan Y. Disjoint multi-path QoS routing in ad hoc networks[C]// International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, New York: IEEE, 2005: 739-742