

基于综合链路质量评估的传感器网络重传机制研究^①

杜文振^{②*} 陈海明^{*} 李 栋^{*} 崔 莉^{③*}

(^{*} 中国科学院计算技术研究所 北京 100190)

(^{**} 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 为了提高环境监测传感网系统(WSNs)的性能,研究了传感网系统的数据传输战略;针对系统节点之间链路质量不稳定会造成丢包现象,采用重传机制提高数据传输可靠性会增加数据包的延迟和带来额外的能量开销的问题,提出了一种基于系统最低寿命的重传机制。首先,基于节点位置信息和链路相关性对节点进行分簇;其次,基于分簇节点丢包统计信息和接收信号强度指示(RSSI)综合评估链路质量;最后,根据综合评估获得的链路质量信息以及系统要求寿命和节点剩余时间,提出一种满足最低寿命要求的重传方法(EasiAR)。实际实验表明,EasiAR 能够在保证系统最低寿命要求的前提下,提高数据传输的可靠性,并降低数据包的传输延迟。

关键词 环境监测, 寿命要求, 重传方法, 链路质量, 分簇

0 引 言

环境监测传感器网络系统^[1,2]在水体监测、文物保护、古建筑保护等领域一直得到广泛使用。该类系统具有如下特点:(1)传感网络本身由许多具有数据采集及传输能力的传感节点和接入网关构成;(2)数据传输链路质量受到环境变化影响;(3)对系统的寿命有一定要求。并且要求系统能够可靠传输数据。此类系统中的传感节点负责收集感知数据并且通过射频发送到网关,在传输过程中会因为链路质量问题导致数据包的丢失。目前实际系统大都通过重传机制来实现数据的可靠传输^[3],但频繁的重传不仅会增大数据包的平均传输延迟,而且会导致节点的有效工作时间降低,从而影响系统的寿命。为了高效地实现传感网系统的可靠数据传输,首先需要选择合适的链路质量评估方法。合适的方法能够准确地反映当前链路质量,并且易于在

资源受限的节点上实现;其次需要根据系统的寿命要求和节点的剩余工作时间,使节点选择合适的数据包发送时机和发送频次,既使得节点的能量能够得到充分的利用,又使得数据包能尽快成功发送给下一跳节点。

对于链路质量,目前传感网系统主要根据接收信号强度指示(receive signal strength indicator, RSSI)、链路质量指示(link quality indicator, LQI)、信噪比(signal to noise ratio, SNR)等参数来评估^[4-9]。此类方法虽然实时性好,但是准确性差。还有一类通过发送控制分组来评估链路质量^[10-17],此类方法能较准确地反映链路质量,但是存在实时性差的问题。博物院展览观众人流对链路质量有很大的干扰^[3],此类系统无线链路之间的质量与人流因素有一定的相关性,而这两类方法无法准确实时地评估该类系统中的链路质量。还有一些链路质量评估方法^[12]采用复杂度很高的预测模型进行大量的计算,不适用于资源受限的节点。本文结合这两种方法,根据

① 国家自然科学基金(61502461)和 863 计划(2014AA093402)资助项目。
② 男,1989 年生,博士生;研究方向:物联网,无线传感器网络;E-mail: duwenzhen@ict.ac.cn
③ 通讯作者,E-mail: lcui@ict.ac.cn
(收稿日期:2016-04-28)

实际的应用场景,提出了一种基于位置信息和链路相关性的分簇方法,以簇为单位综合评估链路质量,以提高其实时性和准确性。

对于保证数据传输可靠性方面,目前主要采用自动重传或者针对错包比特位的纠正^[18-22]来恢复错误或丢失的数据包。这些方法多数只考虑数据传输的可靠性,并未考虑不同系统不同寿命需求的应用场景,以及实际系统中节点之间的链路存在的相关性,因此,可以提高的数据传输可靠性方面的性能有限,且不能完全保证系统的寿命需求。此外,这些方法并不易于在实际系统中实现,因为有的算法需要对系统硬件修改^[21],有的系统需要修改系统 MAC 层及以下层协议^[22]。本文利用节点链路相关性信息,结合系统的最低寿命要求,提出了一种基于系统最低寿命的重传机制,用于实现实际监测系统中数据的可靠传输。这一机制有以下创新点:(1)针对实际系统中存在的链路相关性特征,基于位置信息和链路相关性,提出了一种节点分簇方法。(2)基于提出的节点分簇方法,在分簇节点上进行丢包统计和采样 RSSI 值,提出了一种综合评估链路质量的方法。(3)基于综合评估链路质量的结果,结合系统最低寿命要求,提出了一种基于重传的可靠数据传输方法,通过实际系统验证了该方法能够在保证系统最低寿命的前提下,提高数据传输的可靠性,并降低数据包的传输延迟。

1 相关研究

1.1 时空相关链路质量评估

对于链路质量的估计主要分为两类:一类是根据采集到的链路参数(如 RSSI、LQI 和 SNR)来估计链路质量,另一类考虑数据包接收率(packet reception ratio, PRR)在时间或者空间上的相关性来估计链路质量,并采用一定的预测模型来估计未来的链路质量。

文献[4]提出的链路质量评估方法基于 RSSI 值,当测得的 RSSI 高于某一阈值时,几乎不会出现丢包。文献[5]利用多个 LQI 的均值来反映链路的质量,但是 LQI 会随着时间大幅度的变化。文

献[6]根据 SNR 值判断链路质量,并且得到和文献[4]类似的结论,当测得的 SNR 值高于某一阈值时,系统会保持很高的数据接收率。文献[9]利用 RSSI 和 LQI 的强相关性,通过这两个指标值的下界表示 PRR 的下界,以此为标准实时地评估网络链路的通信质量。以上文献中提出的链路质量评估方法采用 RSSI、LQI、SNR 等信息来评估系统的链路质量。该类方法简单、开销小、实时性高,但是不能完全准确地反映链路的质量,准确性较差。

文献[10]提出了 ETX 方法,它通过周期性地发送控制分组来统计链路质量。文献[11]根据实验结果统计随时间不停变化的 PRR 值来判断链路质量的突发性。文献[12]通过对周期性的障碍物影响分析,根据分组丢失情况建立预测模型,预测未来一段时期的链路质量。这类方法采用分组丢失情况来衡量链路质量,能准确地判断链路质量,但是存在以下问题:如果统计周期短,则会带来较大的控制开销,如果统计周期长则不能实时反映链路质量的变化情况。

文献[13]采用跨层次的链路相关性来提高链路质量的预测准确性。文献[14]和文献[15]分别通过统计连续的丢包次数和数据包丢失率的变化情况,把链路之间的时间相关性考虑在内。文献[16]考虑空间相关性带来的一致性干扰问题,实现数据的快速传输。文献[17]在 ETX 基础上,考虑链路之间时空相关性,提高了丢包识别率。

本文根据节点之间链路的时间和空间相关性,针对具体的应用环境,结合 RSSI 值来综合评估链路质量,一方面提高链路质量评估准确性,另一方面也降低了传感节点发送控制分组的能量消耗。

1.2 可靠数据传输

在保证可靠数据传输方面,现有工作主要采用以下两种方法:错误数据包的恢复和数据包的重传。

文献[18-20]通过在每个数据包添加额外的前向纠错(forward error correction, FEC)码的方法来修正比特错误,该方法需要额外的资源去识别和修正错误比特,在比特错误率高的场合下,FEC 能有效地修正比特位错误,但是在比特错误率低的场合下,会造成资源的浪费。文献[21]添加了额外的硬件来

达到和 FEC 基本相同的目标,减少数据包的重传,但是添加硬件不具有通用性。文献[22]结合自动重传请求 (automatic repeat-request, ARQ) 提出了一种优于 ARQ 的错误包修正方法。但是以上方法都未考虑节点链路之间存在的相关性,单纯的从单个链路来考虑丢包问题,不能准确地反映系统中链路质量的整体情况,同时未考虑在最低寿命要求的实际应用场景下,因此这些方法都不能保证在满足寿命要求的前提下降低数据传输延迟。

本文结合系统最低寿命要求,在实际应用场景下,基于提出的综合评估链路质量方法,建立了一种基于系统最低寿命的重传控制方法。

2 环境监测传感网系统概述

2.1 系统架构

系统整体架构和网关结构如图 1 所示,系统中由传感节点 (包含路由节点)、网关和服务端组成。其中,传感节点周期性的采集周围的温度、湿度、光照等传感信息,并且通过传感网传输到服务器端。在实际的环境监测系统中,每个节点通过分层路由算法建立起以各个网关为顶点的层次网络,节点通过自组织的方式传输数据。

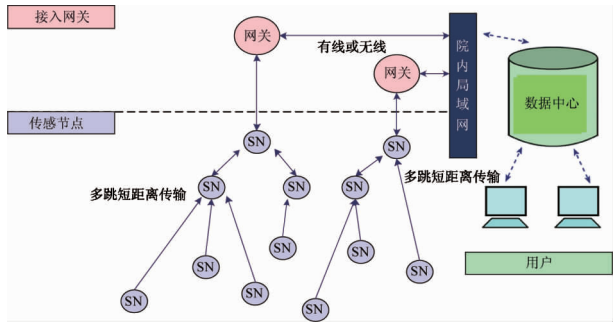


图 1 环境监测传感网系统架构及网关结构示意图

2.2 应用模型

为不失一般性,给出了实际应用的一个文物监测系统节点部署形式,如图 2 所示。该系统共部署了 17 个传感节点和 4 个路由节点 (节点号从 251 到 254)。该部署环境是一个工字型展厅,展厅内部署 6 个密闭恒温恒湿展柜,节点位置如图 2 中标识。节点 201、202、203 部署在展柜 1 中,节点 204、205、

207 部署在展柜 2 中,节点 208 到 213 号节点以此类推。节点 214、215 和节点 216、217 分别放在展柜 5 和展柜 6 中。

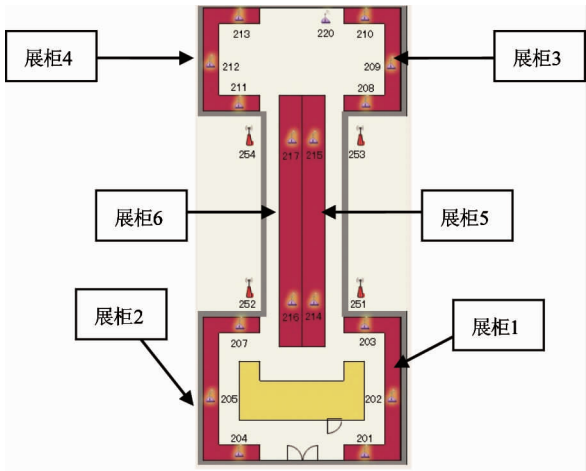


图 2 文物监测系统节点部署位置图

本文中使用的符号信息如表 1 所示。

表 1 本文用到的参数信息

符号	含义
N_i	传感网节点 i
$L_i(t)$	丢包率因子
$pl_i(t)$	节点 N_i 在时间 t 的丢包率
$Rpl_i(t)$	节点 N_i 在时间 t 的丢包率级别
$rs_i(t)$	节点 N_i 在时间 t 的 RSSI 值
$Rsr_i(t)$	节点 N_i 在时间 t 的 RSSI 级别
La	节点位置信息
$Lday_i(t)$	节点 N_i 在 t 时刻的剩余工作时间
cnt	在训练周期内采集丢包率的次数
$cnt(i, j)$	节点 N_i 和节点 N_j 丢包率级别相同的次数
$Rday$	网关能够恢复工作的时间
$R_i(t)$	剩余时间因子
Tw	系统已经工作时长
T	系统要求寿命
Pt	训练样本周期

3 基于最低寿命的传感网系统重传机制的设计与实现

本节详细介绍基于最低寿命的传感网系统重传机制的设计和实现。3.1 节介绍了基于位置信息和链路相关性的分簇算法。3.2 节在分簇算法的基础

上,介绍了基于系统最低寿命的节点可靠传输算法EasiAR。

3.1 基于位置信息和链路相关性分簇算法

在本节中重点讨论节点之间的链路质量相关性,为了提高链路评估的准确性和降低链路探测的能量消耗,根据位置信息和链路质量相关性把节点分簇。首先以实际部署在博物馆一个宫殿的文物展陈环境监测系统为例,分析从2015年9月到2015年11月各节点采集到的监测数据情况。

节点的位置信息如图2所示,其中节点203和214,216和217,214和215在位置上都具有相关性,并且216和217,214和215分别放在同一个展柜中。在此系统中,节点周期性地采集数据并将数据发送给展柜外的路由节点。当出现丢包时,节点会执行重传机制,由于人流等环境因素的影响,节点的丢包数与发送的数据包的数量呈现正相关的关系。图3~图5分别给出了三组节点在不同时间点统计获得的它们发送数据包的变化趋势。从图5中可以看出位置相近的节点214和节点215包序随着时间变化呈现一致性,而从图3和图4看出位置相近的节点203和节点214,节点216和节点217随着时间变化未呈现明显的一致性。为了进一步验证节点214和节点215链路质量的变化是否存在相关性,本文进一步分析了节点214和215的电压随着时间的变化趋势,如图6所示。从图6可以看出214和215的电压变化存在一致性。结合图5和图6可以得出节点214和节点215存在链路质量相关性。

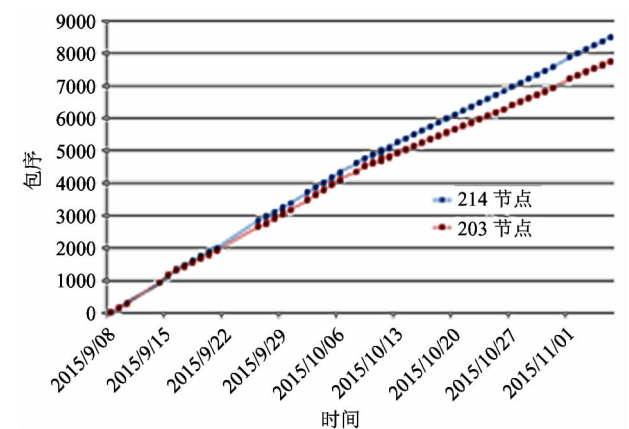


图3 节点203和214包序随时间变化关系图

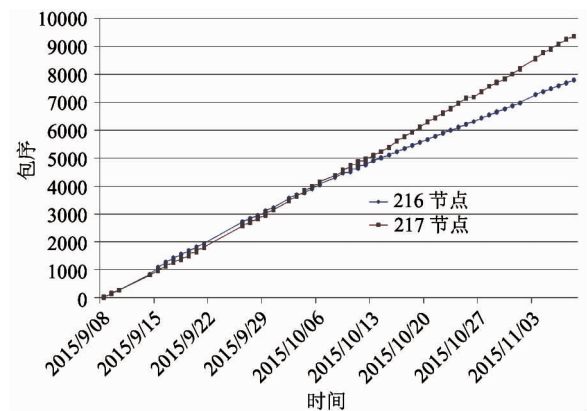


图4 节点216和217包序随时间变化关系图

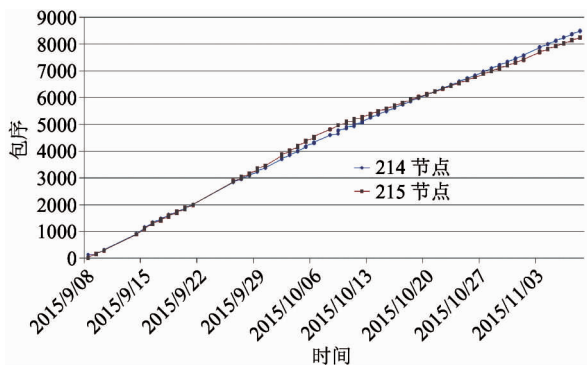


图5 节点214和215包序随时间变化关系图

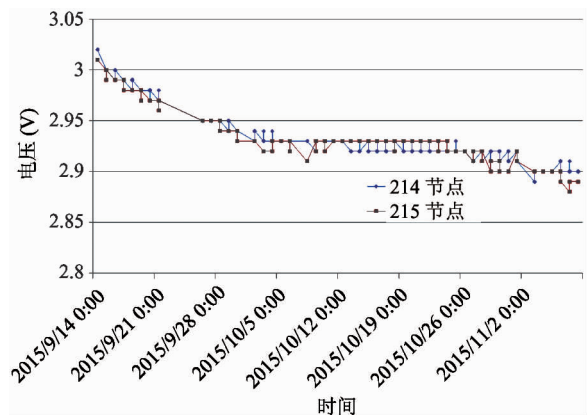


图6 节点214和215电压随时间变化图

为了确定链路质量与空间位置的相关性,本文提出了自适应的链路相关性学习算法。为不失一般性,本文定义了丢包率级别如下:

定义 1: $pl_1(t), pl_2(t), \dots, pl_j(t), \dots, pl_m(t)$ 分别代表丢包率阈值,其中 $0 < pl_1(t) < pl_2(t) < \dots < pl_j(t) < \dots < pl_m(t) < 1$

定义 2: $Rpl_1(t), Rpl_2(t), \dots, Rpl_i(t), \dots, Rpl_n(t)$

分别对应 n 种不同的丢包率级别。其中： $m = 2n - 2$ 。

在本节中,为不失一般性,定义 1 和定义 2 中定义了丢包率级别,级别划分依据如图 7 所示。为了使确定节点的丢包率相关性更贴合实际,相邻两个丢包率级别存在交叠区间。设立重叠区间是为了处在丢包级别临界区的丢包率能够更加准确确定丢包率级别归属。每个节点在初始阶段根据自身测得的丢包率值确定自身所在的丢包率级别。同理,可定义节点的所处的 RSSI 级别如下:

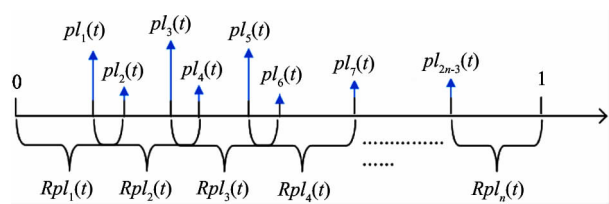


图 7 丢包率级别划分示意图

定义 3: $Rrs_i(t)$ 对应系统中节点 N_i 在 t 时刻的 RSSI 级别。

节点相关性算法是为了确定链路质量存在相关性的节点。将链路质量存在相关性的节点作为一个簇,根据簇内节点的数据包成功发送率对链路质量做出判断,一方面可以减少单个节点发送探测包的数量,另一方面可以提高链路质量评估的准确性。在此算法中,首先根据节点丢包率级别查找具有一致链路质量变化情况的节点,然后根据确定的相关节点,结合节点位置信息对节点进行分簇。具体算法如算法 1 所示。

算法 1. 基于位置信息和链路相关性的分簇算法	
1	初始化节点位置信息 Li 和节点相关性次数 $cnt(i, j)$
2	FOR $Pt \neq 0$
3	FOR $N_i, La = N_j, La$
4	节点采集丢包率 $pl_i(t)$ 和 $pl_j(t)$
5	获得此时节点的丢包率级别 $Rpl_i(t)$ 和 $Rpl_j(t)$
6	IF $Rpl_i(t) = Rpl_j(t)$
7	$(N_i, N_j) \leftarrow 1$
8	$cnt(i, j) \leftarrow cnt(i, j) + 1$
9	END IF

10	END FOR
11	END FOR
12	IF $cnt(i, j)/cnt > \partial$
13	N_i, N_j 加入同一个簇
14	END IF

算法 1 首先在训练周期 Pt 内对处在同一位置区间内的节点进行丢包率统计,如果两个节点的丢包率级别相同,则把 $cnt(i, j)$ 计数加 1 直到搜寻周期结束。当搜寻周期结束时,计算节点之间丢包率相同次数占训练次数的比例,如果该比例大于设定的阈值 ∂ , 则把此两个节点加入同一个簇中,分簇算法结束。

3.2 基于系统最低寿命的节点重传算法 EasiAR

对传感网中的节点基于位置信息和链路质量相关性进行分簇之后,为了在保证满足最低系统寿命的前提下,使得数据的延迟最低,我们提出了一种高效的节点重传机制 EasiAR。本节对 EasiAR 的设计进行详细介绍。

3.2.1 算法参数

根据当前系统的发送速率和采用电池情况,根据历史信息估计该环境下节点的剩余工作时间 $Lday_i(t)$ 。以 150s 工作周期为例,本文采用实验室开发的 EZ240 节点^[23]来采集数据,采用两节 1.6V5 号碱性电池串联来进行供电,图 8 展示了 EZ240 节点电池电压随着时间的变化曲线。

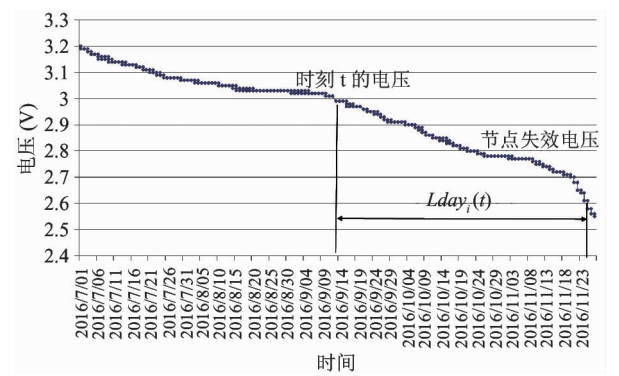


图 8 网关电压变化示意图

定义 4: 节点 N_i 在时刻 t 的剩余时间因子为 $R_i(t) = (T - Tw(t))/Lday_i(t)$ (1)

性质 1: $R_i(t)$ 越小,则该节点剩余时间越充足。

性质 2: 当 $R_i(t)$ 大于等于 1 时,该节点没有多余的能量来执行丢包情况下的重传。

定义 5: 节点 N_i 在 t 时刻的丢包率因子为

$$L_i(t) = \begin{cases} 1 - S_i(t)/A_i, & A_i > k, k = 1, 2, 3, \dots \\ R_{rs_i}(t), & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

性质 3: $0 \leq L_i(t) \leq 1$; 且链路质量越好, $L_i(t)$ 的值越小。

在式(2)中, $L_i(t)$ 由节点 N_i 所在的簇的丢包率和此刻的 RSSI 情况决定。如果节点 N_i 所在簇的节点数目满足一定要求,则采用该簇的丢包率来计算 $L_i(t)$, 否则采用节点此刻的 RSSI 级别 $R_{rs_i}(t)$ 来计算 $L_i(t)$ 。

定义 6: 节点 N_i 在时刻 t 的重传决定因子为 $Rp_i(t)$,

$Rp_i(t)$ 由 $R_i(t)$ 和 $L_i(t)$ 共同决定:

$$Rp_i(t) = \begin{cases} \alpha R_i(t) + \beta L_i(t), & R_i(t) < 1 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

在式(3)中, $0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1$, 这两个参数的选择与结点所处的环境和具体的应用需求相关。

3.2.2 算法设计

众所周知,节点的能量消耗主要集中在传输数据,以本文采用的 EZ240 节点为例节点休眠电流为 $20 \sim 30 \mu A$, 而发送数据包的电流为 $120 mA$ 左右。为了节省能量和降低数据包延迟,在保证数据传输可靠性的前提下,可以减少数据包的传送次数。在实际系统中,减少的次数和系统要求的寿命相关。

EasiAR 算法是一种灵活的算法,它根据系统寿命要求和节点剩余电量动态调节节点的重传速率,从而使节点在满足系统寿命的前提下,保证数据传输的可靠性。换言之,如果节点剩余工作时间大于系统寿命要求,则可充分利用这部分多余能量来提高数据传输的可靠性,并降低数据包的传输延迟。此算法主要求解一个问题:如何高效地利用剩余能量进行丢失数据包的重传。为此,需要判定节点此时是否可以利用多余能量提高数据的重传速率,EasiAR 根据事先的节点工作时间经验值和系统寿命要求计算节点剩余电量,如发现有多余的能量可利

用,需要选择在何时去进行数据重发以保证数据传输的成功率。EasiAR 根据同一簇内节点的数据传输情况来判断当前的链路情况,根据当前链路情况以及多余电量情况做出是否重传数据包的决定。EasiAR 的具体实现如算法 2 所示。

算法 2. EasiAR 算法

```

15 IF 节点丢包
16     IF  $t < pt$ 
17         根据丢包率探测包重传
18     ELSE
19         计算  $Rp_i(t)$ 
20         IF  $Rp_i(t) = 1$ 
21             节点  $N_i$  休眠,隔一轮唤醒发数
22         ELSE IF  $m < Rp_i(t) < 1$ 
23             节点  $N_i$  休眠,下一轮唤醒发数
24         ELSE
25             节点  $N_i$  重传,根据  $Rp_i(t)$  设置重传次数
26         END IF
27     END IF
28 END IF

```

EasiAR 算法根据实际剩余工作时长和要求的的工作时长把重传机制分成不同的级别,同时根据上节中计算出的 $Rp_i(t)$ 作为评价指标,制定不同的重传级别,使得节点在保证系统要求最低寿命的基础上,充分利用剩余能量提高数据传输的可靠性,并降低数据包的传输延迟。

4 系统实验与性能分析

本节通过实验评价本文提出的节点可靠数据传输算法 EasiAR 的性能。一方面验证本文提出的可靠数据传输算法是否能够保证系统最低寿命要求;另一方面验证可靠数据传输算法的数据可靠性和实时性。

本文采用基于 CC2420 射频芯片、IEEE 802.15.4 标准的 EZ240 节点,该型号节点正常工作的最低电压要求为 $2.6 V$ 。本文实验地点选择中科院计算所七楼,实验场景和使用的节点分别如图 9 和图 10 所

示。除了本文提出的 EasiAR 算法,本文还实现了自动重传请求 (ARQ) 方法和链路自适应重传请求 (LRQ) 方法,用于性能比较。ARQ 方法的思想是当节点出现丢包时,自动重传该数据包直到数据包传送成功为止;LRQ 思想是当节点出现丢包,数据包不立即重传,节点休眠,未发送的数据包存入队列,待到下一轮数据包成功发送时再把队列里面的数据包一并发送。实验中放置节点的位置主要有两个柜子:A 柜和 B 柜。数据的发送周期设定为两分钟,预期的系统寿命要求为100天。实验中采用



图 9 实验场地



图 10 实验节点

了标号为 700 到 714 共 15 个节点。每种方法使用 5 个节点,这 5 个节点中 3 个放在 A 柜,另外 2 个放置在 B 柜。具体节点放置位置和使用的方法分配如表 2 所示。

表 2 实验节点位置和使用方法

方法	位置	
	A 柜	B 柜
LRQ	700,701,702	703,704
EasiAR	705,706,707	708,709
ARQ	710,711,712	713,714

4.1 满足最低寿命要求

在本实验中,系统部署日期为 2016 年 1 月 2 日到 4 月 5 日。本文截取了这一段时间的节点电压变化曲线,在图 11 中给出了节点 700,705,710 的电压变化曲线,分别对应采用方法 LRQ、EasiAR 和 ARQ 的电压变化曲线。从图中可以看出采用 LRQ 方法节点剩余电压在 2.8V 以上;采用 EasiAR 方法节点剩余电压为 2.64V;由于 ARQ 方法尽最大努力传送数据包,当遇到链路差的情况下会频繁的重传,所以耗电最快,最终节点剩余电压为 2.39V,此时 ARQ 方法不能满足系统最低寿命要求;EasiAR 方法会根据链路质量和剩余寿命综合考虑重传,所以耗电速度低于 ARQ 方法,最终剩余能量恰好接近用尽。

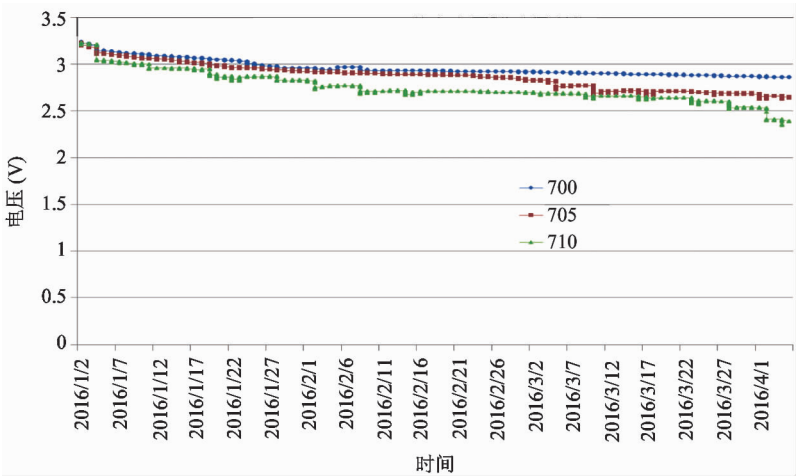


图 11 700、705、710 电压随时间变化

图 12 统计了在实验日期时间内,实验的 15 个节点的剩余电压情况。从图中可以看出,采用 LRQ 方法的节点电压都在 2.8V 以上,剩余电量最多;采用 EasiAR 方法的节点剩余电压接近节点正常工作电压 2.6V;采用 ARQ 方法剩余电压已经远低于节点正常工作电压,节点已经不能正常工作。

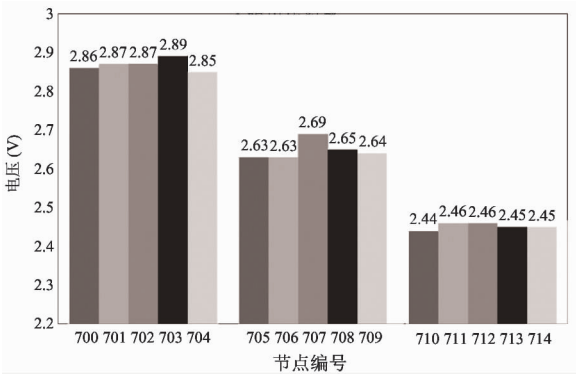


图 12 各组节点电压对比

以上结果表明,EasiAR 方法能够充分利用节点剩余能量,而 ARQ 方法剩余电量与链路质量相关,当链路质量差时,电量消耗比较快。LRQ 方法当链路质量差时,会增加节点传输时延(见 4.2 节分析)。

4.2 能量开销

在本节中重点分析节点重传数据包的能量开销。重传数据包的情况通过统计三种方法的数据包包序变化情况来看获得。数据包序的大小从侧面反映了节点能量的消耗,数据包序增长越快,表示能量消耗越大。图 13 显示了采用 EasiAR 算法的放在柜 A 中的节点 705、节点 706 和节点 707 随着时间变化

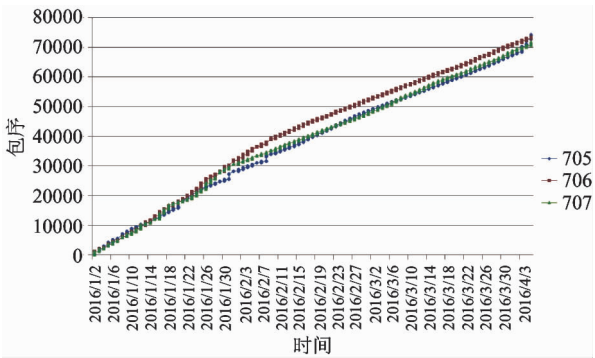


图 13 705、706、707 包序随时间变化

的包序变化曲线。通过 3.1 节所描述的分簇算法,这三个节点在同一个簇中,因此实验结果的包序变化基本一致,说明分簇算法符合要求。

图 14 比较了采用三种不同重传方法的节点发送的数据包的包序变化情况。由图中可以看出采用 ARQ 方法的节点 710 数据包序增长最快;采用 EasiAR 方法的节点 705 发送的数据包的包序略高于采用 LRQ 方法的节点 700。这三个节点的包序变化趋势与图 11 示的电压变化趋势一致。

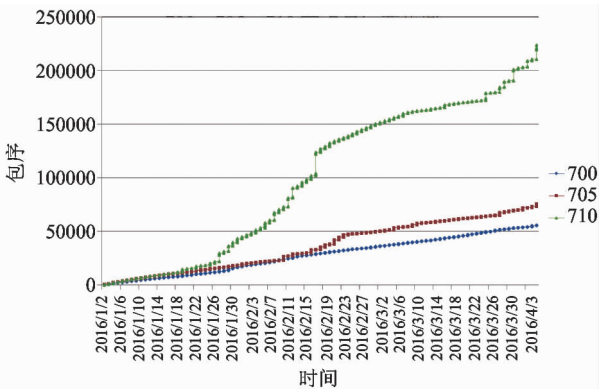


图 14 700、705、710 包序随时间变化

图 15 统计了在实验日期时间内,15 个节点最后发送的数据包的包序情况。从图中可以看出,采用 ARQ 方法发送的数据包的包序是其它两种方法的数倍,节点 713 和节点 714 发送的数据包的包序甚至是采用其它两种重传方法的节点发送的数据包的包序的 5 倍以上。采用 EasiAR 方法的节点发送的数据包的包序比采用 LRQ 方法的节点所发送的数据包的包序大约高 40%。

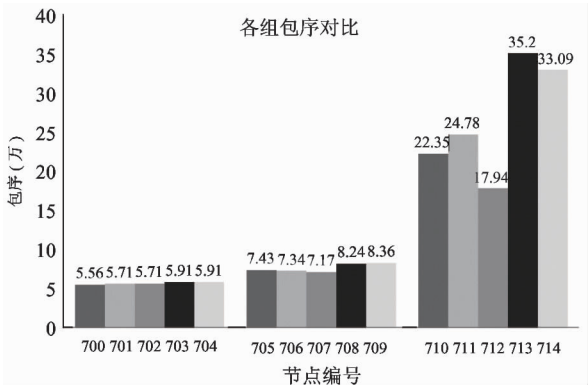


图 15 各组节点包序对比

图 12 统计了在实验日期时间内,实验的 15 个节点的剩余电压情况。从图中可以看出采用 LRQ 方法的节点剩余能量最高,采用 EasiAR 方法的节点的剩余能量接近正常工作电压的临界值,而采用 ARQ 方法的节点的剩余能量已经远低于节点正常工作能量。

4.3 传输的可靠性和实时性

为了进一步的分析采用三种方法所带来的数据包的传输可靠性和时延,本文以工作周期为时间单位,统计实验中在实验时间内各节点成功发送数据包的比例和实际花费的周期数,如表 3 和表 4 所示。为了统计方便,本文设定的节点 700 到节点 709 的理论工作周期是 55000。由于节点 710 到节点 714 在规定的系统寿命时间内工作电压已经低于正常工作电压以下,我们看到节点的理论工作周期大概为 45000。

本文统计了实验的 15 个节点的数据成功发送率,实验所在的环境链路质量相对比较差,即便采用 ARQ 方法的节点 710 到节点 714 成功发送率也都在 50% 左右。采用 EasiAR 方法的成功发送率平均为 40% ;采用 LRQ 方法的 5 个节点平均成功发送率

不到 20%。另外,在本实验中节点 705 到节点 707 采用了位置相关性分簇方法。除了本身链路质量因素之外,同样采用 EasiAR 方法,采用分簇机制的节点 705 到节点 707 的成功发送率比节点 708 和节点 709 的高大约 8 个百分点。采用分簇机制的 EasiAR 方法的节点 705 到节点 707 的成功发送率比采用 LRQ 方法的高 20%。

表 4 统计了实验的 15 个节点的延迟情况,实验所在的环境链路质量相对比较差,采用 ARQ 方法的节点 710 到节点 714 平均时延在 7 周期左右。采用 LRQ 方法的 5 个节点的平均时延为 5.74;采用 EasiAR 方法的 5 个节点平均时延为 2.67。相比采用 LRQ 方法,采用 EasiAR 方法的时延平均减少 3 个周期。另外,在本实验中节点 705 到节点 707 采用了位置相关性分簇方法。除了本身链路质量因素之外,同样采用 EasiAR 方法,采用分簇机制的节点 705 到节点 707 的时延比节点 707 和节点 708 的时延低大约低 1.4 个周期。采用分簇机制的 EasiAR 方法的节点 705 到节点 707 的时延比采用 LRQ 方法的节点延迟降低 3.74 周期。

表 3 实验节点数据包成功发送率统计

节点号-重传机制	理论发送数据包	实际收到数据包	成功发送率
700-LRQ	55000	12078	0.22
701-LRQ	55000	10080	0.18
702-LRQ	55000	11700	0.21
703-LRQ	55000	7648	0.14
704-LRQ	55000	10848	0.20
705-EasiAR	55000	24652	0.45
706-EasiAR	55000	21054	0.38
707-EasiAR	55000	25806	0.47
708-EasiAR	55000	17532	0.35
709-EasiAR	55000	19204	0.35
710-ARQ	45000	27997	0.35
711-ARQ	45000	25038	0.56
712-ARQ	45000	24527	0.55
713-ARQ	45000	27735	0.62
714-ARQ	45000	27998	0.62

表 4 实验节点时延统计

节点号-重传机制	理论工作周期	实际花费周期	时延 (单位:周期)
700-LRQ	12078	55616	4.60
701-LRQ	10080	59149	5.87
702-LRQ	11700	59112	5.05
703-LRQ	7648	59137	7.73
704-LRQ	10848	59152	5.45
705-EasiAR	24652	49648	2.01
706-EasiAR	21054	52346	2.49
707-EasiAR	25806	45894	1.78
708-EasiAR	17532	64868	3.70
709-EasiAR	19204	64396	3.35
710-ARQ	27997	150803	5.39
711-ARQ	25038	173202	6.92
712-ARQ	24527	118993	4.85
713-ARQ	27735	253865	9.15
714-ARQ	27998	236722	8.45

本节中的分析可以得出采用 EasiAR 在保证系统寿命的前提下,能够保证数据传输的可靠性,并有效降低节点的时延。此外,从算法 2 的描述可以看出,EasiAR 的时间复杂度是线性的,适合在资源受限节点执行。

5 结 论

传感网监测系统在文物保护、古建筑保护等领域得到了广泛应用。本文考虑到这些系统的寿命要求,从保证数据传输可靠性和降低数据传输延迟的角度出发,提出了传感网监测系统的基于综合链路质量评估方法的重传方法 EasiAR。实验验证表明,EasiAR 算法在保证系统最低寿命的前提下,能够提高数据传输的可靠性,并有效降低系统的延迟。

未来的研究工作将进一步考虑结合 RSSI 提高链路质量评估的准确性,以进一步降低节点的能量消耗,并将进一步优化 EasiAR 算法的参数,以充分利用剩余的能量,进一步降低系统的传输延迟。

参考文献

- [1] Zhang L, Zhao Z, Li D, et al. Wildlife monitoring using heterogeneous wireless sensor networks. *Ad hoc & Sensor Wireless Networks*, 2013, 18(3-4): 159-179
- [2] Li D, Zhao Z, Cui L, et al. A cyber physical networking system for monitoring and cleaning up blue-green algae blooms with agile sensor and actuator control mechanism on lake Tai. In: Proceedings of the 1st International Workshop on Cyber-Physical Networking Systems (CPNS 2011) in Conjunction with INFOCOM 2011, Shanghai, China, Apr, 2011
- [3] 黄庭培, 李栋, 张招亮等. 突发性链路感知的自适应链路质量估计方法. *通信学报*, 2012, 33(6): 30-39
- [4] Lu M, Steenkiste P, Chen T. Design, implementation and evaluation of an efficient opportunistic retransmission protocol. In: Proceedings of the 15th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, New York, USA, 2009. 73-85
- [5] Fonseca R, Gnawali O, Jamieson K, et al. Four-bit wireless link estimation. In: Proceedings of the 6th ACM Workshop on Hot Topics in Networks, New York, USA, 2007. 1-6
- [6] Lal D, Manjeshwar A, Herrmann F, et al. Measurement and characterization of link quality metrics in energy constrained wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2003 IEEE Global Communications, San Francisco, USA, 2003. 446-452
- [7] Srinivasan K, Levis P. Rssi is under appreciated. In: Proceedings of the 3rd Workshop on Embedded Networked Sensors, Cambridge, USA. 2006. 3031:239242
- [8] Polastre J, Szewczyk R, Culler D. Telos: enabling ultra-lowpower wireless research. In: Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, Piscataway, USA, 2005. 364-369
- [9] Lin S, Zhang J, Zhou G, et al. ATPC: Adaptive transmission power control for wireless sensor network. In: Proceedings of the ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), New York, USA, 2006. 223-236
- [10] Couto D S J, Aguayo D, Bicket J, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. *Wireless Networks*, 2005, 11(4): 419-434
- [11] Srinivasan K, Kazandjieva M A, Agarwal S, et al. The β -factor: measuring wireless link burstiness. In: Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems, Raleigh, USA, 2008. 29-42
- [12] 张乐, 李栋, 崔莉. EasiTOD: 一种降低传感器网络时延障碍物干扰的检测调节机制. *计算机研究与发展*, 2009, 46(12): 2003-2013
- [13] Zhao Z, Dong W, Guan G, et al. Modeling link correlation in low-power wireless networks. In: Proceedings of the 2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), Hong Kong, China, 2015. 990-998
- [14] Cerpa A, Wong J L, Potkonjak M, et al. Temporal properties of low power wireless links: modeling and implications on multi-hop routing. In: Proceedings of the 6th ACM International Symposium on Mobile ad Hoc Networking and Computing, Urbana-champaign, USA, 2005. 414-425
- [15] Koksai C E, Balakrishnan H. Quality-aware routing metrics for time-varying wireless mesh networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(11): 1984-1994
- [16] Doddavenkatappa M, Chan M C, Leong B. Splash: Fast

- data dissemination with constructive interference in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 10th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 13), Lombard, USA, 2013. 269-282
- [17] Kim S M, Wang S, He T. cETX: Incorporating spatio-temporal correlation for better wireless networking. In: Proceedings of the 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Seoul, Korea, 2015. 323-336
- [18] Schmidt D, Berning M, Wehn N. Error correction in single-hop wireless sensor networks: a case study. In: Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe, Nice, France, 2009. 1296-1301
- [19] Liang C J M, Priyantha N B, Liu J, et al. Surviving wi-fi interference in low power zigbee networks. In: Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Zurich, Switzerland, 2010. 309-322
- [20] Jeong J, Cheng T E. Forward error correction in sensor networks. University of California at Berkeley, 2003
- [21] Jamieson K, Balakrishnan H. PPR: Partial packet recovery for wireless networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2007, 37(4): 409-420
- [22] Mandel T, Mache J. Practical error correction for resource-constrained wireless networks: unlocking the full power of the CRC. In: Proceedings of the 11th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Rome, Italy, 2013. 3
- [23] Ez240v3. <http://www.easinet.cn/cn/index.htm>; 中国科学院计算技术研究所传感器实验室, 2012

Research on WSNs' retransmission strategy based on comprehensive assessment of link quality

Du Wenzhen^{***}, Chen Haiming^{*}, Li Dong^{*}, Cui Li^{*}

(^{*} Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(^{**} University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract

To improve the performance of wireless sensor networks for environment monitoring, the networks' data transmission strategies were studied, and a retransmission mechanism considering the minimum system life was proposed to solve the problems of packet loss caused by the unstable link quality among nodes as well as increasement of packet delay and additional energy cost caused by adopting retransmission to improve the reliability of data transmission. The research was conducted according to the steps below. Firstly, the nodes were clustered based on their location information and link relevance. Secondly, the link quality was assessed comprehensively based on the statistics of packet loss and the receive signal strength indicator (RSSI) in intra-cluster nodes. Finally, according to the link quality information from the comprehensive assessment, as well as the lifetime requirement of the system and the remaining work time of the node, a retransmission method (EasiAR) meeting the requirement of minimum lifetime of the system was proposed. The practical experiments indicate that EasiAR can achieve reliable packet transmission and reduce transmission delay while ensuring minimum lifetime of the system.

Key words: environment monitoring, the lifetime requirement of the system, retransmission method, link quality, cluster