一种WSN虚拟多路径可靠路由协议

张 霞 周 刚 于宏毅

(信息工程大学 信息工程学院, 郑州 450002)

摘 要: 针对无线传感器网络中的数据传输不可靠问题,提出虚拟多路径路由协议,该协议将路由优化和数据传输结合在一起,按需建立可行路径集合,在数据传输的过程中实时采集分组的累计传输次数,通过对累计传输次数均值的区间估计,评估各路径的质量,识别并淘汰质量显著低的路径,根据网络实时链路质量动态的进行路由优化. 在NS2平台上进行仿真,结果表明该协议能够适应带宽资源紧缺、链路不可靠且动态变化的无线传感器网络,在能量效率、分组递交率方面优于典型的路由优化和使用相分离的协议AODV_ETX.

关 键 词: 无线传感器网络; 路由协议; 可靠性; 多路径; 区间估计

中图分类号: TN 915.04

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2009)04-0403-04

Virtual multipath routing for reliable data delivery in wireless sensor networks

Zhang Xia Zhou Gang Yu Hongyi

(Information and Engineering College, Information and Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Aiming at reliable data delivery in wireless sensor networks, VMR (virtual multipath routing) protocol was proposed. It integrated path optimization into data transmission so that data delivery quality was guaranteed at very little control overhead. In this protocol, paths were constructed on demand, and data was delivered along multiple paths. Meanwhile ATT (accumulated transmission times) of each packet from source to sink along a path were collected. Path quality information was fed back to source where low quality paths were identified and filtered out via interval estimation on the expectation of ATT. Route optimization was achieved step by step in this way. Simulation in NS2 platform showed path selection converges to optimal or suboptimal solution fast. VMR is competent to deal with adverse, dynamic, bandwidth constrained WSN network and outperformed typical reliable routing protocol AODV_ETX in both energy efficiency and reliability.

Key words: wireless sensor networks; routing protocol; reliability; multiple paths; interval estimation

无线传感器网络WSN(Wireless Sensor Networks)作为一种新型的信息收集手段,在环境监测、精细农业、医疗监护、战场态势评估等方面具有广阔的应用前景. 实验研究指出[1-4], WSN中存在大量不可靠、非对称链路,大多数传统路由协议[5-6]以最小跳数作为路由优化目标,在WSN中将造成严重的分组丢失. 如何保证数据可靠传输成为WSN路由协议的重要问题.

解决数据传输可靠性问题的直接方法是设计反映可靠性的路由度量指标,从多条可行路径中选择可靠性最高的[4,6-7]. 文献[6]提出用信号强度描述链路可靠性,并设置信号强度门限,在建立路由时回避可靠性低的链路; 文献[4]指出测量信号强度的方法难以细致的区分各链路,而增加门限限制可能造成源节点和目的节点之间不连通; 提出以链路上成功传输一个分组(包含数据和确认)平均需要的传输次数ETX(Expected Transmission count)作为链路度量指标. 对于如何

收稿日期: 2008-04-17

基金项目: 国家973计划资助项目(2005CB321901); 国家自然科学基金资助项目(60472064)

作者简介: 张 霞(1979-),女,山东济南人,博士生, zhangxiaatzz@hotmail.com.

收集链路可靠性信息,文献[6]采用令所有节点在组网期在一跳范围内持续发送 helb消息,统计 hello成功率.文献[7]指出由于传感器网络中节点密度高,需要对 helb消息接入信道的过程进行调度,以降低由于探测分组碰撞造成的能量浪费.文献[6]和[7]获取链路可靠性信息的方法本质上是离线的(off-line).与之不同,文献[4]设计了在线(on-line)方法,在数据传输的同时发送探测消息 Probe,实时跟踪链路质量变化.

上述协议将建立可靠路径和传输数据看作2个独立的过程;需要发送大量探测消息收集链路质量信息,能量消耗很大;离线的方法仅仅在组网阶段进行探测,信息不能反映实时链路质量,而在线的方法又存在探测分组和正常的数据分组竞争信道、互相干扰的问题.

基于此,本文提出一种虚拟多路径路由协议.由于数据流实际上探测/使用了多条路径,因此将该协议称为虚拟多路径路由 VMR(Virtual Multipath Routing).为了便于分析,介绍本文的假设:节点布设密集;业务是传感器节点向 sink回传信息,采用事件触发的信息报告模式[8-9],数据分组长度固定.

1 VMR协议的设计

1.1 路由优化和数据传输一体化的设计模式

在分层的协议栈中,网络层完成2个主要功能:路由建立和维护 RSR(Route Setup and Repair),分组转发 PF(Packet Forwarder).传统协议将两者作为独立的模块.RSR通过发送路由控制消息获取网络拓扑信息(如,邻居节点之间链路传输可靠性),在一定的路由优化准则下建立最优路径,把路由计算的结果提供给 PF;PF沿选定的路径传输分组;RSR和 PF独立工作,仅在链路失效时,PF通知 RSR进行路由修复.把这种设计思路称为路由优化和使用相分离的模式,其工作过程如图1a所示.分离模式保持路由协议和数据转发模块的相对独立,但是为了建立可靠路由,路由协议需要发送控制分组进行路径质量探测,这不仅增加了节点的能耗,而且在节点密度大、带宽资源匮乏的 WSN中,大量发送探测消息可能影响路由建立、甚至阻塞正常的数据传输.

与之不同,VMR把路由优化和数据传输结合在一起,在数据传输的过程中动态的实现路由优化.如图1b所示,VMR首先探测从源到 sink的所有可行路径,构成可行路径集合,记作 $C_R = \{r_i, i = 1, \cdots, m\}$;当有数据要发送时,并不直接计算最优路径,而是给出路径选择矢量 $\boldsymbol{P}$,依概率选择一条路径、传输该分组;在数据传输过程中收集所选路径的质量信息,记录在数据分组中;sink节点从接收的数据中提取路径质量信息,周期的反馈给源节点;源节点据此调整 $\boldsymbol{P}$. VMR的路由优化过程是一个基于反馈的动态演进过程.

考虑到无线网络中一般采用 ARQ机制提高分组多跳传输条件下的可靠性,本文以一个分组从源到目的的传输过程中累积传输(包含重传)次数 ATT(Accumulated Transmission Times)来描述路径质量.由于无线传输受随机因素的影响,路径的 ATT是一个随机变量,路由优化的最终目标是选择 ATT均值最小的路径.

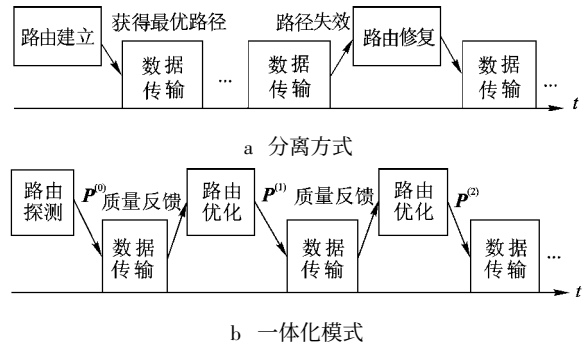


图1 分离和一体化设计模式的比较

1.2 基于差路径过滤的路由优化方法

VMR监测分组传输过程收集 ATT样本,据此推断 ATT的均值.当存在若干条质量较高且相近的路径时,希望通过传输少量数据分组识别出最优路径是十分困难的.而如果多条路径的质量存在明显差别,识别出其中质量显著低的一条路径则相对容易;过滤掉差路径后,源节点可以将数据分组集中在其余的路径上,这又加快了挑选最优路径的过程.因此,本文通过过滤差路径实现路由优化.

如何判定"路径质量显著低"是 VMR的一个难点.令 $\overline{X}_i$ 和 μ_i 分别表示第 i条路径 ATT的样本均值和 ATT的期望,在传输数据分组数量较少(即,ATT样本较少)时,$\overline{X}_i$ 和 μ_i 之间存在一定差异,直接比较 $\overline{X}_i$ 来判断路径质量优劣,易发生误判.为此,引入区间估计的方法.设 sink沿第 i条路径接收了 n_i 个分组,记第 j个分组中携带的累积传输次数为 X_{ij},则

$$\overline{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}}{n_i}$$

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \overline{X}_i)^2}{n_i - 1}$$

$\frac{\overline{X}_i - \mu_i}{S_i / \sqrt{n_i}}$服从参数为 $n_i - 1$的 t分布, 即

$$\frac{\overline{X}_i - \mu_i}{S_i / \sqrt{n_i}} \sim t(n_i - 1) \quad (1)$$

$t(n_i - 1)$不依赖于其他参数, 因此, 对于任何一个不大于 1的正数 α, 有下式成立:

$$P\left\{ -t_{\alpha/2}(n_i - 1) < \frac{\overline{X}_i - \mu_i}{S_i / \sqrt{n_i}} < t_{\alpha/2}(n_i - 1) \right\} = 1 - \alpha \quad (2)$$

由式 (2)得到 μ_i的置信度为 $1 - \alpha$的置信区间为

$$(\overline{X}_i - t_{\alpha/2}(n_i - 1)S_i / \sqrt{n_i}, \overline{X}_i + t_{\alpha/2}(n_i - 1)S_i / \sqrt{n_i}) \quad (3)$$

其中 $t_{\alpha/2}(n_i - 1)$是 t分布的$\frac{\alpha}{2}$分位点. 为了便于描述, 记 μ_i的置信区间上、下界分别为 u_i和 d_i.

基于对 μ_i的区间估计来定义“路径质量显著低”.

定义　对路径 a和 b的 μ_a和 μ_b的均值进行区间估计, 得到置信度 α的置信区间分别为 (d_a, u_a)和 (d_b, u_b), 如果 $d_b \geqslant u_a$(或 $d_a \geqslant u_b$), 则认为路径 b的质量显著低于路径 a(或路径 a的质量显著低于路径 b); 如果置信区间 (d_a, u_a)和 (d_b, u_b)有重叠, 则认为 2条路径没有明显差异.

由定义可得路径过滤规则: 对于 C_R 中的路径进行区间估计, 如果发现路径 r_i的质量显著低于其他路径, 就将其状态置为“挂起”; 对于 C_R 中其他路径, 由于它们的质量没有显著差别, 在后续的数据传输过程中以相等的概率选择每一条路径.

考虑到 WSN 中链路质量在网络运行一段时间后可能发生变化, 路径的相对优劣也随之改变. 因此, 在把路径的状态置为“挂起”的同时, 启动“挂起”状态计时器, 时间长度为 T_{hangup}, 计时器有效的时间内, 该路径不再参与传输数据; 计时器超时, 则路径的状态自动恢复为激活, 参与数据传输.

1 3　重 路 由

源节点利用 sink发送的反馈信息, 监视网络内的数据传输质量. 用 $d^{(r)}$描述了最近 t_0 时间内数据分组传输可靠性, 即

$$d^{(r)} = \frac{\sum_{i=1}^{m} n_i}{R t_0} \quad (4)$$

其中, n_i是最近 t_0时间内 sink从路径 r_i 接收的分组数; R 是源节点产生数据分组的速度. 如果和上一轮相比, 分组递交率的下降超过预设门限 D_{th}, 即 $\delta = \frac{d^{(r-1)} - d^{(r)}}{d^{(r-1)}} > D_{th}$, 则认为链路质量发生了较大变化, 源节点清空 C_R 中的记录, 启动多路径探测模块, 重新计算可行路径. D_{th}反映协议对环境变化的敏感程度.

2　性能仿真

2 1　仿真环境设置和评价指标

在 NS2平台上对 VMR 进行仿真分析. 环境设置如下: N 个节点均匀随机布设在 $L \times L$ 的矩形区域内; 源节点和 sink分别位于矩形对角线的两端; 采用阴影衰落路径损耗模型模拟无线链路上信号的衰减[10]; 以恒比特率业务模拟数据回传, 分组产生速率是 G, 分组长度固定; 物理层数据传输速率是 B; 采用文献[11]的能耗模型, 发送和接收单位比特消耗的能量分别为 $e_t = \alpha_1 + \alpha_2 d^2$ 和 $e_r = \alpha_1$, 其中 α_1和 α_2 分别是电路能耗和功放的能耗系数; 节点通信半径为 d; 发送功率固定. 仿真参数设置如表 1.

表 1　VMR协议仿真环境设置

	参数项	数值
场景	$L \times L$ /m^2	150× 150
	R /m	20
节点数量	N	800
信道	B /(kbit• s^{-1})	40
	G /(pkt• s^{-1})	1
业务	分组长度 /Byte	20, 40
节点能耗参数	α_1 /(nJ• bit^{-1})	50
	α_2 /(pJ• m^2• bit^{-1})	10

本文用分组递交率和平均每分组能耗来评估协议的性能, 其定义为:

分组递交率是指 sink成功接收到的分组数量占源节点发送分组的比例;

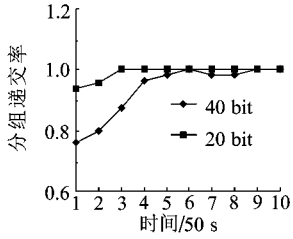
平均每分组能耗是 sink每成功接收一个分组整个网络消耗的能量.

为了比较“分离”和“一体化”2种协议设计模式的差别, 仿真了路由优化和使用相分离的可靠路由协议 AODV _ETX[12]. AODV _ETX 以周期发送 Probe消息的方式收集链路可靠性信息 ETX, 以典型的按需路由协议 AODV 建立和维护路由, 选择路径上所有链路的 ETX之和最小的路径; 实时监视链路可靠性, 当发现链路失效时进行路由维护. 算法实现中节点广播 Probe分组的周期为 5 s.

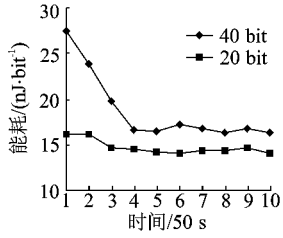
2 2　准静态网络环境下的仿真

在准静态的网络环境下对 VMR协议进行仿

真,图 2是协议运行过程中每 50 s的分组递交率和平均每分组能耗的统计结果,仿真中采用的误码率是 5×10^{-3}. 随仿真时间增加,长度为 20 bit和 40 bit的数据传输可靠性分别从 0.94和 0.76提高到 1;200 s时平均每分组能耗分别比仿真开始时降低了 13.6%和 41.6%;200 s后分组递交率和平均每分组能耗不再有明显变化. 图 2说明 VMR在传输数据过程中不断优化路径;长分组相对于短分组更容易受不可靠链路的影响,随仿真时间的增加,协议性能优化效果也更明显.



a 分组递交率随时间的变化



b 平均分组能耗随时间的变化

图 2 协议性能随时间的变化

在不同误码率下对 VMR和 AODV_ETX进行比较,结果如图 3 在数据传输速率比较高时,AODV_ETX的性能略好于 VMR;随数据传输速率的降低,AODV_ETX的分组递交率急剧降低,而 VMR协议的性能没有明显变化. 这是由于 AODV_ETX通过专门发送探测分组收集链路质量,其对带宽资源的需求量很大;而 VMR协议将路径质量收集结合到数据传输过程中,除了少量的反馈分组外没有额外的控制分组.

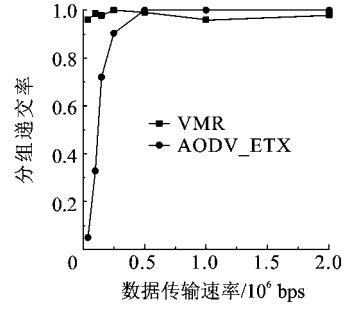


图 3 不同数据速率下协议递交率的比较

2.3 动态网络环境下的仿真

对 VMR协议跟踪网络中链路质量变化的能力进行了初步的仿真. 造成无线链路质量变化的原因十分复杂,目前还没有统一的模型来刻画[13]. 本文采用下面的方式模拟链路质量的变化:T 时刻在点 (x_0, y_0)处出现障碍物,影响范围是以该点为中心、半径为 R_0 的区域,在该区域内相邻节点之间的链路上分组递交率 P降低为 $P\times(1-\beta)$,其中 β是在 0~β_0之间的一个随机数. 仿真中设 $T=1\,000$ s,$x_0=75$,$y_0=75$,$R_0=50$ m,$\beta_0=0.3$.

把沿最优路径传输的性能作为比较基准,分别仿真 $D_{th}=0.5$,$T_{hangup}=1\,000$ s和 $D_{th}=0.2$,$T_{hangup}=1\,000$ s时的协议性能. VMR中,重路由和路径挂起-激活是应对链路动态性的 2种机制,图 4反映了它们在处理链路质量变化时不同的效果. D_{th}设置的较小(如图中 $D_{th}=0.2$时),重路由机制容易被触发,这相当于系统复位,协议可以收敛到最优路径上,在此过程中协议性能有较大的下降;D_{th}设置的较大,重路由机制不易被触发,路径挂起-激活机制起主要作用,以缓和的方式应付链路质量:挂起计时器超时后,重新激活的路径参与路由,由于先前被挂起的路径在链路质量变化后可能变好,协议可能收敛到最优路由,但是时间较长. 合理的设置 D_{th}和 T_{hangup},令重路由和路径挂起-激活机制相互配合可以取得较好的效果.

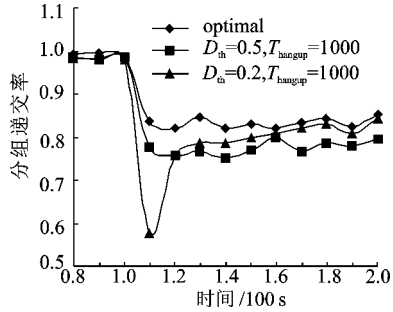


图 4 动态环境下协议的性能

3 结束语

本文提出一种路由优化和数据传输一体化的可靠路由协议 VMR. 该协议通过对数据传输过程的监测收集路径可靠性信息,据此调整选择各条路径的概率,动态的实现路由优化. NS2平台上的仿真表明,VMR能够适应链路不可靠且链路质量动态变化的无线传感器网络,在分组递交率和能量有效性方面优于路由优化和数据传输相分离的协议 AODV_ETX. 在今后的研究中,将进一步研究如何提高协议的收敛速度以及对动态环境的适应性.

(下转第 467页)

6 结　论

当循环寿命在安全寿命范围内时,关键件危险性发动机影响预期发生的概率,不超过定义的很少可能的概率(小于 10^{-7}次/发动机飞行小时).而随着循环数超出安全寿命数的增加,其风险也逐步增加,超过很少可能,甚至是一般可能的概率水平,而这种概率水平将导致零件在服役期间可能发生几次危险性故障,其结果对于断裂关键件是不允许的.

从风险评估的角度对某轮盘关键件的延寿进行了可行性分析.结果表明,当延寿至 834 h,其失效率为 $\lambda(t)=1.366\times10^{-7}$/飞行小时,达到很少可能的概率要求.进一步的分析表明,延寿至 751 h,其失效率为 $\lambda(t)=3.46\times10^{-8}$/飞行小时.达到极少可能的概率水平,可以不必进一步的概率分析.满足安全性要求.

参考文献 (References)

[1] European Aviation Safety Agency. Certification specification for engines[S]

[2] FAR PART33. Airworthiness for standards aircraft engines[S]

[3] Def Stan 00-970. Design and airworthiness requirement for service aircraft part 11-engine[S]

[4] Boyed-Lee A D, Harrison G F. The development of life extension methods for fracture critical aero-engine components[C]// The RTO AVT IWorkshop on Qualification of life Extension Scheme for Engine Components. NATO, RTO-MP-17. Corfu, Greece: [s.n.], 1998

[5] Harrison G F, Shepherd D P. Lifing philosophies for aero engine facture critical parts[C]// Aero Engine Reliability, Integrity and Safety. Proceedings of the Conference. Bristol, United Kingdom: Royal Aircraft Establishment, Farnborough, 1991

[6] Blum l P, Broede J. Critical part's life extension based on fracture mechanics[C]//The RTO AVT IWorkshop on Qualification of Life Extension Scheme for Engine Components. Corfu, Greece: [s.n.], 1998

(责任编辑:张　嵘)

(上接第 406页)

参考文献 (References)

[1] Kim Y J, Ramesh G, Brad K, et al. Geographic routing made practical[C]//Proc 2nd Symposium on Network Systems Design and Implementation 2005. Boston: IEEE, 2005: 217-230

[2] Chiranjeeb B, Divy A, Subhash S. Search-quality tradeoffs for routing in non-ideal wireless networks[C]//Proc IEEE SECON 2006. Virginia: IEEE, 2006: 10-19

[3] Marco Z, Bhaskar K. An analysis of unreliability and asymmetry in low-power wireless links [J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2007, 3: 1-34

[4] DeCouto D S J, Aguayo D, Bicket J, et al. A high throughput path metric for multi-hop wireless routing[C]//Proc ACM MobiCom 2003. San Diego: IEEE, 2003: 134-146

[5] Johnson D B, Maltz D A. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks[J]. Mobile Computing, 1996, 1: 153-181

[6] Chin K W, John J, Aidan W, et al. Implementation experience with MANET routing protocols [J]. ACM Computer Communications Review, 2002, 32(5): 49-59

[7] Abtin K, Elif U B, Falk H, et al. Energy-efficient link assessment in wireless sensor networks[C]//IEEE Infocom 2004. Hong Kong: IEEE, 2004: 1751-1761

[8] Arati M, Dharma P, Agrawal. APTEEN: a hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks[C]//Proc IPDPS 2002. Florida: IEEE, 2002: 195-202

[9] Tilak S, Abu-Ghazaleh N B, Heinzelman W. A taxonomy of wireless micro-sensor network models [J]. Mobile Computing and Communications Review, 2002, 1(2): 1-8

[10] 张贤达,保铮. 通信信号处理 [M]. 北京:国防工业出版社, 2000: 54-55
Zhang Xianda, Bao Zheng. Communication signal processing [M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 2000: 54-55(in Chinese)

[11] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]//33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii: IEEE, 2002: 3005-3014

[12] Perkins C, Royer E M. Ad hoc on-demand distance vector routing[C]//Proceedings of the IEEE WMCSA'99. New Orleans: IEEE, 1999: 90-100

[13] Amit P, Jardosh, Elizabeth M, et al. Real-world environment models for mobile network evaluation [J]. IEEE Journal on selected Areas In Communications, 2005, 3(23): 622-632

(责任编辑:吴　琼)