

基于质量可靠事件协议的无线传感器网络拥塞控制^①

赵国强, 张宏建

(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

摘要: 无线传感器网络中基于数量可靠的事件协议已经被提出应用于可靠事件监测系统。这种方法通过提高源节点到节点数据发送成功的数量达到事件可靠传输的目的。但是, 由于在有限的数据传输路径上数据拥塞造成数据冲突和缓冲溢出频繁的现象, 数据包丢失后, 基于数量可靠的事件协议就难以达到期望的数据发送量。基于质量可靠的事件协议可以较好的解决这一问题。从传输数据的性质出发, 根据监测环境的影响将不同的传感器节点采集的数据划分为相应的贡献度, 贡献度的大小决定传感器节点转发数据的情况。同时, 提出基于贡献度的有效的缓存管理策略平衡了各传感器节点拥塞量。仿真结果说明了这种方法的优越性。

关键词: 无线传感器网络; 贡献度; 可靠事件协议; 拥塞控制

Quality-Based Event Reliability Congestion Control in Wireless Sensor Network

ZHAO Guo-Qiang, ZHANG Hong-Jian

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: Quantity-based event reliability protocols have been proposed to reliable event detection system. This method can obtain event reliability transmission by enhancing the quantity from source node to sink node. However, the quantity-based event reliability protocols can hardly achieve the expectance number due to data packets loss, since many data collisions and buffer drop frequently happen as data congestions of limited data transmission paths. Quality-based event reliability protocol can solve this problem. According to environmental conditions devided the packet data that sensor node collected to different contribution degree which deterring data forward consider this data property. It still balances traffics among sensor node and mitigates congestion based on contribution degree by effective buffer management. Simulation results show superiority of this manner.

Key words: wireless sensor networks; contribution degree; event reliability protocol; congestion control

无线传感器网络的一个重要应用是事件监测, 比如在军事侦察和入侵检测^[1]。这种事件监测遵循事件驱动模式, 传感器节点检测到事件的发生产生不同但相关的事件报告。因此, sink 节点可靠的事件监测基于多个节点信息收集^[2]。换句话说, sink 节点只有在收集到比期望数据包更多的数据时才能可靠预测事件的发生。

因此, 为了在 sink 节点收集到比期望值更多的数据, 很多研究都提出了可靠的方法。比如事件到 sink 节点可靠传输法(ESRT)^[2]通过控制数据报告频率补偿

传输误差, MAC 层感知能量可靠算法(MERT)^[3]通过分散数据传输路径改善拥塞情况。总之, 为提高事件监测可靠性上述方法目的就是成功接受更多数据。但是由于传感器节点的能量限制和存储时数据冲突产生的数据丢失、缓存溢出, sink 节点很可能接收不到期望的数据量。本文提出的质量可靠事件协议(QERP)可以很好解决这一问题。质量可靠就是根据监测信息质量决定信息信赖程度。

传感器节点的环境条件决定了感知数据的贡献度(CD)不同, 比如距离相关事件的距离、事件发生点的

① 收稿时间:2011-04-11;收到修改稿时间:2011-05-21

相对位置。本文算法正是利用感知数据的贡献度达到期望的目的。该算法包括两个相互依赖的过程。选择阶段根据贡献度选择传感器节点转发数据到节点,传输阶段根据贡献度和队列长度等信息管理数据拥塞时缓冲和负载平衡。

1 质量可靠事件协议

当一个期望可靠事件(DER)即可靠事件监测需要的数据包数量 r 发生时,事件区域内所有节点都能感知到,并且知道距离事件发生点的距离^[4]。每一个传感器节点产生对应时间的数据包并标记数据包的贡献度。因为无线传感器网络都为特定目标而组织,所以可以根据实际应用情况估计。贡献度是感应信号在需求信息中的比重。

如果贡献度分配结束就会在事件区域内通过相互协作选择一个簇头节点。根据文献[5]提出的规则选择离事件发生最近的传感器节点为簇头节点。每一个传感器节点将自己的编号信息和贡献度信息发送给簇头节点,簇头节点收到信息后按贡献度大小排列节点。簇头节点选择达到期望可靠事件的传感器节点转发数据。为选择转发传感器节点,簇头节点通过下式决定超过期望可靠事件 r 的最小贡献度 k_r 和最小贡献度中最小节点数 n_{kr} 。

$$\min\{k\}, \min\{n\}, \text{for}(\sum_{i=k+1}^{CD_{\max}} (CD_k \cdot N_i) + (CD_k \cdot n)) \geq r$$

其中 $CD_{\max} \geq k \geq 1$, $1 \leq n \leq N_i$, CD_i 是贡献度值的大小, N_i 是满足条件的节点数目。簇头节点在满足最小贡献度 k_r 的节点中从 $CD_{kr} + 1$ 到 CD_{\max} 任意选择 n_{kr} 个传感器节点作为转发数据节点。算法如下:

- ① 测量事件可靠性 $m = 0$;
- ② $\text{for}(k = CD_{\max}; 1 \leq k; k--)$
- ③ $\text{for}(n = 1; n \leq N_k; n++)$
- ④ $m = m + CD_k$;
- ⑤ $\text{if}(m \geq r), \text{return } k \text{ and } n$;

为防止数据丢失带来的干扰,给期望可靠事件加一个权值 α , 这样期望可靠事件的值就变为 $DER_{r+\alpha}$ 。增加这个权值,避免了不必要信息的发送,减少了数据拥塞的可能性。相应的,质量可靠事件协议还能减少节点能耗。

为提高能量效率和事件监测可靠性,本文提出一种基于贡献度的缓冲管理和负载平衡策略。因为传感

器节点存储能力有限,缓冲区中只能存储有限的数据。如果缓冲区满了,再接收的数据就会被丢弃。大多数缓冲管理策略中,数据包靠后面的位置的信息容易丢失。然而,如果丢掉的数据有较高的贡献度,就会大大降低到达期望可靠事件的可能性。为防止含有高贡献度的信息丢失,本文提出根据贡献度存储和丢失数据。

在基于贡献度的缓冲管理策略中,当传感器节点收到数据时按贡献度从高到低存储数据。为防止由于缓冲溢出,传感器节点只在缓冲存储阈值内存储数据。如果收到新的数据,重新排列贡献度大小并存储在缓冲区中,然后传感器节点丢弃在阈值空间外的数据。换句话说,低贡献度的数据会被丢弃。因为保留的高贡献度数据对达到期望可靠事件有重要影响。

负载平衡策略首先保证拥有高贡献度的数据通过更好的链路发送到 sink 节点提高成功率,其次,分散数据传输路径以减少网络堵塞,延长网络生存周期。通过网络协议,每一个传感器节点都知道通往 sink 节点的下一跳节点的路由路径。传感器节点获得链路质量(包括参数接收信号强度、信噪比、丢包率^[5]),从下一跳节点到 sink 节点的时间,这些信息存储在下一跳链路质量表中。传感器节点需要链路质量时在时间 t 收集存储在缓冲区的贡献度信息。传感器节点根据下面的规则向下一跳节点发送数据。

2 拥塞控制

文献[6]的算法中以逐跳拥塞控制策略为例,通过检测队列长度来考察拥塞程度。队列长度较长的数据都会在数据头设置一个拥塞通知。当拥塞率设定后通知各个节点,节点暂停转发数据,拥塞程度也就下降了,但是这样的后果是节点缓存丢失。跨层协作拥塞控制协议^[7]应用在多跳网络中,提出了共享媒介获得拥塞信息,它主要考虑对任意对节点的单播流量,但传感器网络应用往往都是到 sink 节点的大量数据流。本文提出一种新的随机贡献度拥塞控制策略。该策略尽量降低缓存丢失(试图进入到缓存区中丢失的数据比例),每一个节点根据得到各个参数分配到下一个节点的可能性。

在贡献度拥塞控制算法中,提出两种方法解决缓冲丢失。第一,每一个传感器节点分配下一跳节点的选择概率,队列长度较短的下一跳节点最有可能被选

为传感器节点的下一跳节点,应用这条规则传感器节点可以平衡传输路径。第二,为有效地缓解拥塞,提高信息传输准确性,每一个节点通过对比贡献度等级和下一跳节点的队列长度控制传输的概率,这样拥有更高贡献度的数据包在传输时相对竞争就比较小。每一个节点在一个固定周期执行上述算法。

每一个传感器节点都有下一跳节点的队列长度列表,队列长度在发送数据的开头部分。通过和下一跳节点信息交换就可得到下一跳节点队列长度^[7]。假设传感器的下一跳节点有个,它在第个周期开头包含四个矩阵:

$$\begin{aligned} L(t) &= [l_1(t), l_2(t), \dots, l_j(t)] \\ P(t) &= [p_1(t), p_2(t), \dots, p_j(t)] \\ Q(t) &= [q_1(t), q_2(t), \dots, q_j(t)] \\ D(t) &= [d_1(t), d_2(t), \dots, d_j(t)] \end{aligned} \quad (1)$$

上式中 $L(t)$ 代表矩阵,其中的元素 $l_i(t)$ 是第 i 个下一跳节点的队列长度, $l_i(t)$ 是第个 $(t-1)$ 周期结束后最新更新的信息。在 $P(t)$ 和 $Q(t)$ 两个矩阵中, $p_i(t)$ 和 $q_i(t)$ 分别代表下一跳节点选择概率和非延迟概率。 $D(t)$ 中的元素 $d_i(t)$ 代表退避时延(当传感器节点准备发送数据到它确实发送数据的时间延迟)。应当注意到开始发送数据并不意味着马上就能发送。 $p_i(t)$ 在一个周期内不会改变,而 $q_i(t)$ 和 $d_i(t)$ 会随着 $l_i(t)$ 和 $CD_i(t)$ 的更新而改变。

在初始时刻, $p_i(0)$ 和 $q_i(0)$ 分别为 $1/k$ 和 1 ,即在初始时刻传感器节点以相同的概率选择下一跳节点并且没有传输时延。数据更新后,贡献度高的数据会选择下一跳节点中相对应值较高的 $p_i(t)$ 。为探测传输是否已经进行选择 0 到 1 之间任意的一个数 δ , 如果 δ 小于 $q_i(t)$ 说明已经开始传输数据,否则产生退避时延 $d_i(t)$ 。退避时延过后,传感器节点重新选择 δ 继续传输之前的数据。

第个 t 周期结束后,传感器节点得到更新的 $L(t+1)$, $p_i(t+1)$ 可表示为:

$$p_i(t+1) = p_i(t) + \beta(\bar{l}(t+1) - l_i(t+1)) \quad (2)$$

β 是队列长度影响的权重, \bar{l} 是下一跳节点队列长度平均值即

$$\bar{l}(t) = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j l_i(t) \quad (3)$$

为使式(2)得到的数据在 0 到 1 之间, $P(t+1)$ 正则化:

$$P(t+1) = \frac{[p_1(t+1), p_2(t+1), \dots, p_j(t+1)]}{\sum_{j=1}^k p_i(t+1)} \quad (4)$$

$P(t)$ 平衡了下一跳节点的队列长度,防止不停地从同一节点发送数据,因此下一跳节点的缓冲丢失可能性也会降低。但是,当信息量很大时还不足以缓解拥塞现象,为缓解发送冲突,拥有高贡献度信息有更多机会发送,采用控制矩阵 $Q(t)$ 的办法。当 $l_i(t)$ 和贡献度 $CD_i(t)$ 改变时, $q_i(t)$ 更新为:

$$q_i(t) = \min(1, \frac{CD_i(t) + \gamma}{l_i(t) + \gamma}) \quad (5)$$

如果 $CD_i(t)$ 远大于 $l_i(t)$ 传感器节点就可能会有缓冲丢失的可能性。相反的,如果传感器节点贡献度较低,传输延迟的可能性就较大。为防止 q_i 过小,常数 γ 同时出现在分子和分母来调整缓冲区域的大小。

退避时延 $d_i(t)$ 依赖于 $q_i(t)$ 。如果 $q_i(t)$ 太小,表明第 i 个下一跳节点有缓冲丢失可能性,对应的上一跳节点就要承受长时间的退避时延。因此,应增加 $d_i(t)$ 的值缓解拥塞现象。如果 $q_i(t)$ 很大,传输就没有或者很小延迟, $d_i(t)$ 由下式决定:

$$d_i(t) = \left\lceil D_{\min} \frac{1}{q_i(t)} \right\rceil \quad (6)$$

D_{\min} 是给定最小退避时延。高拥塞程度的节点更有可能在没有竞争的情况下发送数据。

3 仿真

将 $QERP$ 与 $ESRT$ ^[2] 和 $MERT$ ^[3] 比较,利用无线网络传感器仿真工具比较三种协议。无线传感器网络设置为在一个 $1000m^2$ 的范围内随机布置 2000 个传感器节点,传感器节点的模型遵循文献[8]中的 $MICA2$ 设计原则。传感器节点发送和感知范围同为 50m。随机在产生期望可靠事件(DER)为 70。事件区域是半径为 50m 的范围内。每个时隙为 $20\mu s$,最小退避时延 D_{\min} 设为 25 个时隙。考虑到缓冲区为 7 个数据包时有可能发生拥塞, β (2) 和 γ (5) 分别取为 0.07 和 2。在事件区域内的每一个传感器节点根据和事件发生点的距离产生对应贡献度从 1 到 10 的数据包。

图 1 表示了测量事件可靠性(MER)从图中可看出, $ESRT$ 到达 DER 值比较缓慢,并且到达后由于

数据拥塞产生剧烈震荡, 因为 *ESRT* 让所有传感器节点都发送数据导致在数据拥塞时数据丢失。但是 *MERT* 分散数据量使得更快到达 *DER*, 其震荡范围也比 *ESRT* 小。另一方面, *QERP* 也可以让 *MERT* 很快到达期望可靠事件, 并且波动较 *ESRT* 和 *MERT* 更加平稳, 因为它只允许到达期望可靠事件的传感器节点发送数据, 所以产生数据量小减少了数据拥塞的可能性。即使数据拥塞发生 *QERP* 也可以让拥有高贡献度的数据发送到节点。

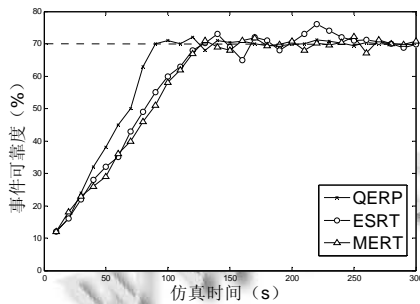


图 1 实际测量事件可靠度

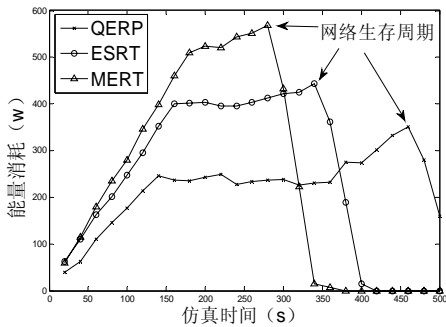


图 2 能量消耗与网络生命周期

图 2 展示了随着仿真时间的变化传感器能量消耗和网络生存周期。和允许事件发生区域所有节点都向节点发送数据, 消耗了大量的传感器能量并很快在节点周围产生死节点, 接下来这两种协议就使传感器节点绕过死节点向节点发送数据, 加剧了能量消耗。结果节点周围所有节点都会失效, 网络生存周期结束, 平衡了负载, 获得更长的网络生存周期。通过基于贡献度的负载平衡管理策略只有部分节点发送数据所以能耗更少。

表 1 表示端到端随机取 5 个节点传输成功率对比, 算法中多个传感器节点可能共享同一个下一跳节点, 传输成功率下降达到 33%。现对其他两种算法, 传输成功率变化较小, 意味着更合理的路径分配, 并且始

终保持高效传输成功率。相比较而言和能量消耗更加均衡, 但拥有剩余高能量节点比更多, 低能耗节点比更少。综上, 虽然发送了较少的数据本文的算法达到了事件可靠的要求。

表 1 端到端传输成功率

节点编号	ESRT	MERT	QERP
1	0.3305	0.3683	0.4329
2	0.3546	0.3592	0.4536
3	0.4383	0.3546	0.4655
4	0.3432	0.3831	0.4423
5	0.5324	0.6231	0.4704
平均值	0.3998	0.4177	0.4533

4 结语

本文提出了质量可靠事件协议()克服了数量可靠事件协议(和)的种种弊端。根据环境不同产生数据贡献度不同这一特性提出相应的控制方法。包括两种相互依赖的过程, 选择阶段根据贡献度向节点发送数据, 传输阶段基于贡献度的缓存管理平衡策略。仿真结果对比表明相对其他两种策略更稳定、更节能。

参考文献

- 1 Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y. Wireless Sensor Networks: a Survey. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 393-422.
- 2 Sankarasubramaniam Y, Akan O, Akyildiz I. ESRT: Event to Sink Reliable Transport Wireless Sensor Networks. *Proc. of Mobi Hoc 2003*. June 1-3, 2003, Annapolis, Maryland, USA. ACM press, 2003: 177-188.
- 3 Dalvi S, Sahoo A, Deo A. A MAC-aware energy efficient reliable transport protocol for wireless sensor networks. *Wireless Communications and Networking Conference*, April, 5-8, 2009 Mumbai Indian: IEEE 2009: 1-6.
- 4 Zhang W, Cao G. DCTC: Dynamic convoy tree-based collaboration for target tracking in sensor networks. *IEEE Wireless Communication Magazine*, 2004, 3(5): 1689-1701.
- 5 Scheuermann B, Locherta C, Mauve M. Implicit hop-by-hop congestion control in wireless multihop networks. *Ad hoc Networks*, 2008, 6(2): 260-286.
- 6 Wang C, Li B, Sohraby K, Daneshmand M, Hu Y. Upstream congestion control in wireless sensor networks through cross-layer optimization. *IEEE J. Sel. Areas Communication*, 2007, 25(4): 786-795.
- 7 Hull B, Jamieson K, Balakrish H. Mitigating congestion in wireless sensor networks. *Proc. of the 2nd International Conference on Embedded Network Sensor Systems*. New York: ACM Press, 2004. 134-147.
- 8 Hill J, Culler D. Mica: A wires platform for deeply embedded Networks. *IEEE Micro*, 2002, 22(6): 12-24.