

基于拥塞控制的无线传感器网络数据汇集树生成算法

石为人¹ 唐云建¹ 王燕霞¹

摘要 针对无线传感器网络数据汇集应用中, 由于数据流量大, 相邻路径之间容易发生串扰、信道竞争和冲突, 造成拥塞问题, 提出了基于拥塞控制的无线传感器网络数据汇集树生成算法 (Data gather tree algorithm based on congestion control, DGT-CC). DGT-CC 算法通过层次发现、邻居发现、启发式搜索和流量均衡策略构造一棵最短路径最小拥塞权值树. 理论分析证明 DGT-CC 算法收敛, 并能够构造一棵最短路径最小拥塞权值树, 仿真实验表明 DGT-CC 算法在丢包率、网络吞吐量和时延方面都较普通的最短路径树具有更好的性能.

关键词 无线传感器网络, 数据汇集, 拥塞控制, 路由树

DOI 10.3724/SP.J.1004.2010.00823

Data Gather Tree Algorithm Based on Congestion Control in Wireless Sensor Networks

SHI Wei-Ren¹ TANG Yun-Jian¹ WANG Yan-Xia¹

Abstract In data gathering application of wireless sensor networks, owing to the heavy traffic, the channel contention and interference between adjacent paths, the congestion would easily happen. The data gather tree algorithm based on congestion control (DGT-CC) is proposed, which generates a shortest path and minimum congestion weight tree through level found, neighbors discovery, heuristic search, and traffic balanced strategy. Theoretical analysis proves the DGT-CC to be convergent, and the routing tree to be a shortest path and minimum congestion weight tree. Simulation results show that the DGT-CC algorithm is superior to the ordinary shortest path tree in terms of success rate of data transfer, network throughput, and delay.

Key words Wireless sensor network (WSN), data gathering, congestion control, routing tree

根据不同的应用情况, 可以将无线传感器网络 (Wireless sensor network, WSN) 数据流分为三种类型: 事件驱动型, 查询驱动型和连续型^[1-2]. 在连续型数据流中, 各个传感器节点源源不断地将数据向 Sink 节点汇集, 我们称这种应用为数据汇集应用. 在数据汇集应用中, 由于数据流量大、多点向一点汇集, 容易发生相邻路径之间串扰、信道竞争和冲突, 造成多次重传, 严重时就会引发拥塞. 拥塞不但增加丢包率, 影响传输可靠性, 而且会浪费宝贵的能量资源. 拥塞控制对网络性能影响很大, 不但可以提高带宽的利用率和节点能量的利用率, 还能降低网络的传输延迟, 减少网络丢包, 提高数据传输的成功率.

文献 [3-4] 阐述了 WSN 可能发生两种类型的拥塞: 一种是节点级拥塞, 节点产生数据报文的速度超过了自身发送报文的速度, 导致缓存队列变长, 增大了排队延时, 甚至产生队列溢出, 造成重传; 另一种是链路级拥塞, 无线信道是共享信道, 当干扰存在

或者多个相邻节点同时竞争使用无线信道时, 就会产生访问冲突, 由冲突产生的重传会增加分组的服务时间, 降低链路利用率和网络的吞吐量, 引起链路级拥塞. 本文认为, 在无线传感器网络中还存在第三种拥塞: 热点拥塞. 由于较多的节点将数据发送到一个转发节点 (如: 网关节点) 时, 该转发节点就成为网络的热点, 如果热点接收到的分组速率过快, 就会造成转发队列增加, 甚至溢出, 从而产生热点拥塞. 本文假设在不发生节点级拥塞的情况下, 尝试通过拓扑控制来均衡流量分配, 从而减少访问冲突, 避免链路级拥塞和热点拥塞.

文献 [5] 指出树状路由最适合低成本、低功耗、资源非常受限的无线传感器网络数据汇集应用. 在网络节点资源和通信能力相同的情况下, 最短路径树 (Shortest path tree, SPT) 的拓扑结构通常具有转发跳数少和传输延迟低的优点. 而由一个连通图生成的最短路径树通常不止一棵. 在数据汇集应用中, 不同的最短路径树具有不同的拥塞情况. 因此, 本文旨在尝试研究 WSN 数据汇集应用中, 最短路径树状路由的拥塞控制和流量均衡问题, 提出基于拥塞控制的无线传感器网络分布式最短路径最小拥塞数据汇集树建立算法 (Data gather tree based on congestion control, DGT-CC). 本算法主要分为三

收稿日期 2009-02-20 录用日期 2009-06-01
Manuscript received February 20, 2009; accepted June 1, 2009
国家教育部博士点基金 (20060611010) 资助
Supported by the Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (20060611010)
1. 重庆大学自动化学院 重庆 400030
1. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030

大步骤: 1) 通过层次发现构造层次图; 2) 通过邻居发现构造相对邻居图, 并采用启发式搜索算法生成一棵最短路径树; 3) 通过流量均衡策略, 进一步规避局部热节点, 均衡网络数据流量, 生成最小拥塞树. 通过理论分析, 证明了 DGT-CC 算法的正确性, 即算法收敛, 并能构造一棵最短路径最小拥塞权值树. 仿真实验表明 DGT-CC 算法较普通的最短路径树具有更好的性能.

1 相关研究

近几年来, 国内外的研究人员提出了一些针对 WSN 的拥塞控制策略. 文献 [6] 提出一种拥塞控制机制 CODA (Congestion detection and avoidance), 使用开环逐跳拥塞反馈机制和闭环多源速率调节机制来缓解网络拥塞. CODA 通过消息缓冲队列检测和周期性信道负载检测来判断是否拥塞, 当拥塞发生时启用开环控制策略, 检测到拥塞的节点将压力消息 (Suppression message), 向着数据源的方向反向传播, 收到压力消息的节点根据本地情况判断是否继续传播压力消息, 并采取一定的本地拥塞控制策略. 在网络带宽利用率超过某个规定阈值时, 触发闭环拥塞控制机制, 通过 ACK 形式将发送速率控制反馈给各相关节点. CODA 使距离 Sink 远的源数据获得传输的机会小于距离 Sink 近的源数据, 这使其公平性较差. 文献 [7] 提出一种基于事件的拥塞控制机制 ESRT (Event-to-sink reliable transport), 在保证一定频度的传感器数据报文顺利到达 Sink 的前提下, 尽量减少源节点发包速度、节省通信能量. 这种方法只适用周期性报告的 WSN 应用, 拥塞检测的周期比较长. 文献 [3] 针对多到一树型拓扑的数据汇集应用, 提出基于子节点数目的传输调度机制, 保证每个节点发送相同流量的数据到 Sink 节点. 根节点根据自己产生数据的速率和发送速率, 为来自不同子节点的数据分别建立缓存队列, 也为自己产生的数据建立一个队列, 同时记录每个子节点子树上的节点总数. 节点的子树上节点总数逐级统计, 通过数据分组捎带上传. 节点的产生数据速率通过控制命令或数据捎带下传给子节点. 根节点根据每个子节点的子树上节点总数确定每个缓存队列的发送概率. 该文献还给出了根据子树节点数目按固定比例和顺序的分组调度算法, 其主要目的是保证分组传输的公平性. 文献 [8] 提出一种速率控制机制 IFRC (Interference-aware fair rate control), 期望每个数据源至少可以获得拥塞的最小速率, 使用 AIMD (Additive increase, multiplicative decrease) 控制方法, 拥塞时所有相关节点先将自己的速率降低到拥塞节点的速率, 然后各节点根据自身的状况慢慢提高, 使全网的速率逐渐达到一

个最佳分配. 文献 [9] 提出根据区分服务的思想来减轻网络节点的内存和计算开销, 通过指数级优先算法标定数据流等级, 网络节点根据拥塞状态来动态调整报文过滤标准 (节点门限), 再根据所确定的报文过滤标准和报文优先等级采取相应的流量调节措施. 该文献采用了队列溢出和队列等待时间进行拥塞检测, 并通过控制报文来同步邻居节点间的过滤标准, 从而保证了无线信道带宽分配上的公平性. 文献 [10] 在分析了 WSN 特点的基础上, 阐述了拥塞检测和拥塞避免的几种策略, 重点介绍了基于速度控制、流量调度和传输调度等典型的拥塞解除算法, 并对 WSN 拥塞控制技术的发展趋势进行了展望.

上述的拥塞控制机制大部分是基于点对点速率控制, 不适合于数据汇集应用. 而文献 [3] 虽然是针对多到一树型拓扑的数据汇集应用, 但其目的主要是解决分组传输的公平性. 文献 [3, 6-8] 都是通过降低数据源的发送率来减少流量, 以达到缓解拥塞的目的, 其代价是牺牲了传感器的有效数据量. 本文针对数据汇集应用, 在最短路径树拓扑结构保证数据实时性的情况下, 建立最短路径最小拥塞权值树, 使网络数据流均衡分配, 从而缓解网络拥塞.

2 DGT-CC 算法

2.1 相关定义

WSN 最短路径最小拥塞权值树的建立问题可以归结为图论中的生成树问题. 对 WSN 的图模型有如下定义:

1) WSN 所有节点随机分布在二维平面上, 节点位置固定, 通信半径相同, 形成一个简单连通无向图: $G = (V, E)$, 其中 V 表示 WSN 节点集, E 表示节点对称链路形成的边集.

2) 每个节点具有唯一标号, 节点 x 的标号记为 $id(x)$, 并且可以排序, 即对于 $\forall x, \forall y, x \in V, y \in V$, 满足 $id(x) < id(y)$ 或者 $id(x) > id(y)$.

3) 节点与其邻居节点连接的边数称为节点的度数, 节点 x 的度数记为 $d(x)$. $d_x(y)$ 表示节点 x 的邻居 y 的度数.

4) 节点 x 到 Sink 的最小跳数记为 $h(x)$. $h_x(y)$ 表示节点 x 的邻居 y 到 Sink 的最小条数.

5) 节点 x 的邻居节点集记为 $N(x)$.

6) 节点 x 的父节点集记为 $F(x)$, $F(x) = \{u | u \in V \cap u \in N(x) \cap h(u) = h(x) - 1\}$.

7) 以节点 x 为根的子树中的节点个数记为 $t(x)$. $t_x(y)$ 表示以节点 x 的邻居 y 为根的子树中的节点个数.

8) 网络中传感器节点数据产生的周期为 T .

$N(x)$ 和 $d(x)$ 可以通过邻居发现得到, $h(x)$ 可

以广播算法^[11-12]进行层次发现得到, $t(x)$ 初始化为 1, 在数据汇集的过程中通过统计上行数据流的源节点地址个数得到, 并通过 ACK 稍带的方式, 告知邻居节点.

对于一棵数据汇集树, 假设其深度为 N , 给定层次 $i, i < N$, 从 $i+1$ 到 N 层的所有节点, 设总共 M 个节点, 则这 M 个节点产生的数据流, 必然全部通过第 i 层. 假设第 i 层上有 n 个节点, 其 t 值分别为 t_1, t_2, \dots, t_n , 且 $t_1 + t_2 + \dots + t_n = M$. 为了均衡数据流, 应该让 t_1, t_2, \dots, t_n 之间的差值最小化. 根据乘法原理, 当 $\prod_{i=1}^n t_i$ 最大时, t_1, t_2, \dots, t_n 之间的差值最小.

定义 1. 由图 $G = (V, E)$ 生成的一棵最短路径树 $T = (V, E')$, $E' \subseteq E$, 深度为 N , 第 i 层的节点个数为 n_i , 则树 T 的第 i 层的拥塞权值定义为

$$W_L(i) = \frac{1}{\prod_{j=1}^{n_i} t_{ij}} \quad (1)$$

其中, t_{ij} 表示第 i 层节点 j 的 t 值.

树 T 的拥塞权值定义为

$$W_T = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \prod_{j=1}^{n_i} t_{ij}} \quad (2)$$

定义 2. 由图 $G = (V, E)$ 生成的一棵最短路径树 $T = (V, E')$, $E' \subseteq E$, 如果树 T 的拥塞权值达到最小, 则称 T 为最短路径最小拥塞数据汇集树.

在数据汇集应用中, 传感器节点周期性的产生数据, 注入网络, 经过多跳流向 Sink 节点, 数据流的大小和方向相对稳定, 其拥塞往往发生在热节点和瓶颈节点处. 因此从直觉上理解, 认为度数越大的节点热度较高.

定义 3. 对图 $G = (V, E)$ 的任意节点 $x \in V, y \in V$, 定义运算符 \prec , 可以对 x, y 排序, 其排序规则为

$$x \prec y = \begin{cases} d(x) < d(y), d(x) \neq d(y) \\ id(x) < id(y), d(x) = d(y) \end{cases}, x, y \in V \quad (3)$$

定理 1. 通过运算符 \prec , 对 $G = (V, E)$ 中的任意节点 u 的父节点可以构造一个全序集 $(F(u), \prec)$.

证明. 由于每个节点具有唯一标号, 并且可以排序, 所以定理 1 显然成立, 证明从略. \square

为了构造最短路径最小拥塞树, 本算法定义以下三种消息:

Request_Msg(x, y) 表示节点 x 请求加入 y 作为其子节点.

Confirm_Msg(x) 表示节点 y 确认了节点 x 的请求消息或更改消息, 并稍带更改后自己的 t 值.

Change_Msg(x, y, z) 表示节点 x 请求加入 y 作为其子节点, 并脱离父节点 z , 消息包含节点 x 的 t 值.

Notify_Msg(x) 表示通知父节点 x , 其 t 值的变化量. 当发送队列数据有要发送时, 可以取消该消息, t 值可以通过稍带方式发送.

节点随时偷听邻居节点网络的消息, 实时更新邻居节点和自己的 t 值.

2.2 DGT-CC 算法描述

步骤 0. 节点初始化, $d(x) = 0, h(x) = 0, N(x) = \Phi, F(x) = \Phi, t(x) = 1$;

步骤 1. 由 Sink 节点开始, 采用广播算法进行层次发现, 使每个节点得到 $h(x)$, 以及所有的 $h_x(y)$.

步骤 2. 节点发送 hello 消息进行邻居发现, 构造相对邻居图, 使每个节点得到 $N(x), d(x)$ 和所有的 $d_x(y)$.

步骤 3. 如果节点 $x, h(x) = 1$, 则为 Sink 邻居节点, 则直接建立与 Sink 的父子关系. 否则, 节点使用运算符 \prec , 构造一个全序集 $(F(x), \prec)$, 并选择全序集 $(F(x), \prec)$ 的第一个节点 y 为父节点. 并发送 Request_Msg(x, y) 消息通告, 收到 Request_Msg 的节点 y , 发送 Confirm_Msg(x) 进行确认. 节点 x 收到确认后建立与 y 的父子关系. 到此可以生成一棵最短路径汇集树.

步骤 4. 在数据汇集的过程中, 统计上行数据流的源节点地址个数得到每个节点的 t 值, 并通过 ACK 稍带的方式, 告知邻居节点. 经过一个数据采集周期 T 可以得到稳定的 $t(x)$ 和所有 $t_x(y)$.

步骤 5. 采用流量均衡算法, 进一步规避局部热节点, 具体操作如下:

1) 对于节点 x , 其父节点为 u , 如果 v 满足 $\{u, v \in F(x)\} \cap \{t(x) + t_x(u) < t_x(v)\}$, 则发送 Change_Msg(x, u, v) 消息, 并将父节点置为 v , 否则执行步骤 6.

2) 收到 Change_Msg(x, u, v) 消息的节点 u 和 v , 分别改变自己的 t 值, 并使用 Notify_Msg 消息或者数据稍带方式通知上层节点.

3) 收到 Notify_Msg 消息或者数据稍带的 t 值变化的节点, 继续通知上层, 直到与 Sink 连接的顶层节点.

4) 执行步骤 5 的子步骤 1).

步骤 6. 结束.

2.3 DGT-CC 算法举例

节点随机部署在检测区域中, 通过 DGT-CC 算法的步骤 1 和步骤 2 就可以建立如图 1 所示的相对

邻居图, 虚线表示邻居关系, 并发现各自距 Sink 节点的层次. 每个节点的 $id(h, d)$ 如图 1 所示.

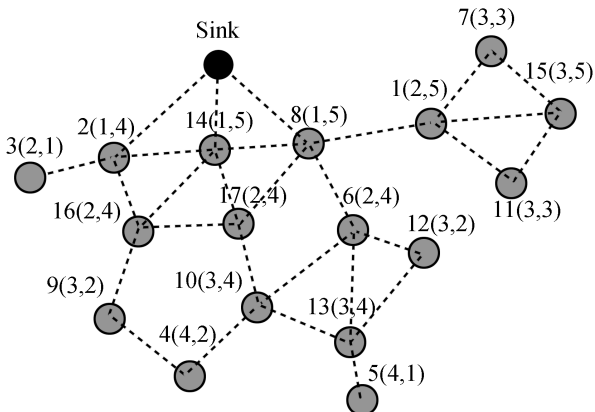


图 1 无向层次图

Fig. 1 Undirected graph with level

由算法的步骤 3 可以生成如图 2 所示的最短路径数据汇集树, 实线表示父子关系, 每个节点的 $id(h, d, t)$ 如图所示. 例如: 节点 16 使用运算符, 构造一个全序集 $(F(16), <) = \{2, 14\}$, 则选择节点 2 为其父节点, 并建立父子关系.

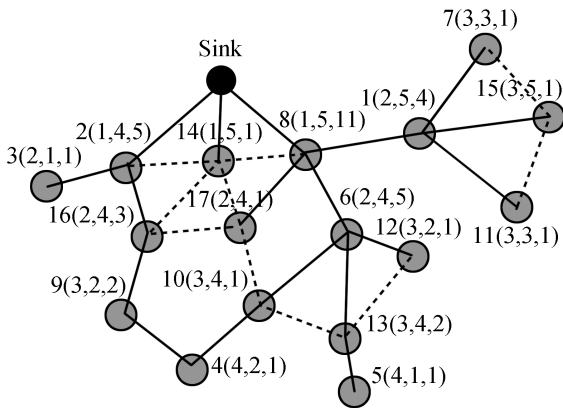


图 2 最短路径树

Fig. 2 Shortest path tree

图 2 中节点 8 的转发任务量明显比节点 14 大, 节点 6 的转发任务量比节点 17 大, 因此对于节点 17 和 10 需要调整其父节点. 经过步骤 4 和步骤 5, 节点 17 和 10 改变自己的父子关系, 从而减少了节点 8 和 6 的转发任务量, 降低了其拥塞程度, 生成了如图 3 所示的最短路径最小拥塞权值树.

3 DGT-CC 算法正确性证明

定理 2. DGT-CC 算法收敛.

证明. 显然, DGT-CC 算法的步骤 0~步骤 3 收敛, 而步骤 4 经过一个数据采集周期后收敛. 步骤 5 采用反证法证明: 假设步骤 5 不收敛, 存在节点 x ,

$x \in V$, 且存在 $u \in F(x)$ 和 $v \in F(x)$, 节点 x 不能准确判定 $t_x(u)$ 与 $t_x(v)$ 的大小关系. 而 DGT-CC 算法通过 Notify_Msg、ACK 稍带、数据稍带和偷听机制保证了节点 x 可以准确知道 $t_x(u)$ 与 $t_x(v)$ 的大小关系, 因此矛盾, 所以步骤 5 收敛. DGT-CC 算法所有步骤收敛, DGT-CC 算法收敛得证. \square

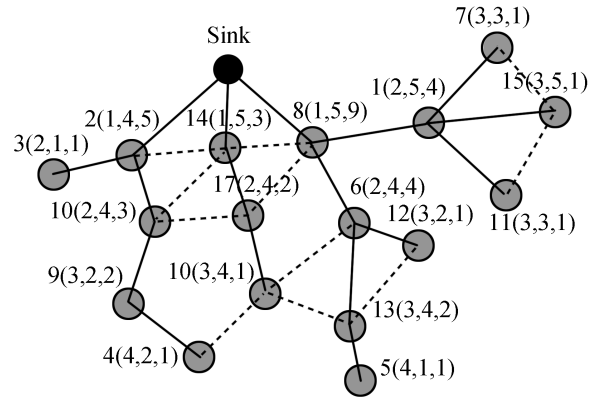


图 3 最短路径最小拥塞权值树

Fig. 3 Shortest path tree with minimum congestion weight

定理 3. DGT-CC 算法构造的路由汇集树是一棵最短路径树.

证明. 使用反证法. 假设由 $G = (V, E)$, 通过 DGT-CC 算法构造了树 $T = (V, E')$, $E' \subseteq E$, 树 T 不是最短路径树, 则存在节点 $u \in V$, u 到 Sink 节点的距离不是最短路径, 对于 $v \in F(u)$, 边 $uv \in E'$. 但是由算法的步骤 3 知, 必然存在一个 $v \in F(u)$, 其边 $uv \in E'$, 因此矛盾, 故定理 3 得证. \square

定理 4. DGT-CC 算法构造的路由汇集树使得每一层的拥塞取值最小.

证明. 使用反证法. 假设由 $G = (V, E)$, 通过 DGT-CC 算法构造了树 $T = (V, E')$, $E' \subseteq E$, 存在树 T 的第 i 层, $i < N$, 其拥塞权值不是最小, 则在第 i 层存在节点 x, y , 在第 $i+1$ 层中存在 $u, x \in F(u), y \in F(u)$, 满足 $t(u) + t_u(x) < t_u(y)$. 由算法步骤 5 知, 节点 u 的父节点必然发生调整, 因此树 T 没有通过 DGT-CC 算法完成构造, 这与树 $T = (V, E')$ 是通过 DGT-CC 算法构造的矛盾, 定理 4 得证. \square

定理 5. DGT-CC 算法构造的路由汇集树是一棵最短路径最小拥塞树.

证明. 使用反证法. 假设由 $G = (V, E)$, 通过 DGT-CC 算法构造了树 $T = (V, E')$, $E' \subseteq E$, 树 T 不是最小拥塞树, 则由定义 1 和定义 2 知, 至少存在第 i 层, $i < N$, 其拥塞权值不是最小, 但这与定理 4 矛盾, 定理 5 得证. \square

4 仿真验证

4.1 仿真环境与参数

本文使用 NS-2^[13] 进行仿真实验, 仿真使用了 100 个节点, 其中包括 1 个 Sink 节点和 99 个传感器节点, 在 800 m × 800 m 场景下随机生成节点的位置, 具体仿真参数如表 1 所示. 传感器节点以一定的周期产生数据并向 Sink 节点传输. 在不同发送速率下, 对丢包率、网络吞吐量和时延进行评估. 并对比了单纯的最短路径树 (SPT) 和 AODV 路由协议^[14].

表 1 仿真参数
Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Scene size	800 m × 800 m
Node number	99 node + 1 Sink
Mac	802.11
Application	CBR
Packet size	128
Queue length	10
WirelessPhy: Power for Tx	3.65362 E-2 (for 100 m transmit range)

4.2 丢包率

在仿真实验中, 统计一段时间内各个传感节点的应用层发出的 CBR 包个数和 Sink 节点接收到 CBR 包的个数. 用总的发送数量减去总的接收后除以总的发送数量就可以得到丢包率. 图 4 给出了传感器节点在不同数据包产生速率下丢包率. 随着发送速率增大, DGT-CC 算法的丢包率明显小于 SPT 和 AODV.

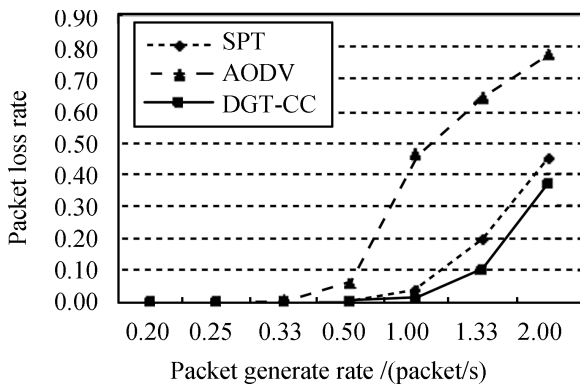


图 4 不同数据包发送速率下的丢包率

Fig. 4 Packet generating rate vs. packet loss rate

4.3 网络吞吐量

网络吞吐量是网络层的一个重要性能指标, 通

常的测试是点对点的数据流量测试. 但在数据汇集的传感器网络应用中, 每个节点都要产生数据流并向 Sink 节点传输. 因此, 在仿真实验中统计一段时间内 Sink 节点接收到 CBR 数据包的个数除以统计时间得到与网络吞吐量相当的一个性能指标. 图 5 显示了传感器节点在不同数据发送速率下网络吞吐量, DGT-CC 算法的吞吐量大于 SPT 和 AODV.

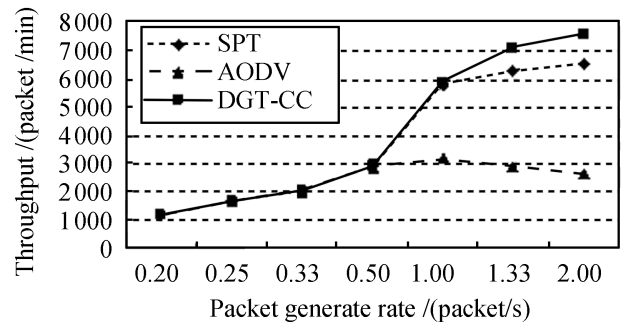


图 5 不同数据包发送速率下的吞吐量

Fig. 5 Packet generating rate vs. throughput

当丢包率和网络吞吐量的仿真结果可见, 当数据发送速率较高 (大于 0.5 packet/s) 时, 网络就会发生一定程度的拥塞, 此时 AODV 协议的丢包率急剧增大, 网络吞吐量不再增加, 因此 AODV 协议不适用于本文所述的网络应用环境 (WSN 数据汇集应用), 在网络延时分析中不再与 AODV 协议进行对比.

4.4 网络延时

在仿真过程中选取一个离 Sink 节点较远的传感器节点, 并统计其产生数据包传输到 Sink 节点的延时, 如图 6 所示, 在拥塞情况比较明显时 (数据发送速率大于 1 packet/s), 数据延时明显增加. 这是由于数据流量较大时, 冲突和重传次数增加使得发送缓存队列增加, 从而产生了较大的排队延时. 但 DGT-CC 算法的流量均衡策略使得数据包延时小于单纯的 SPT.

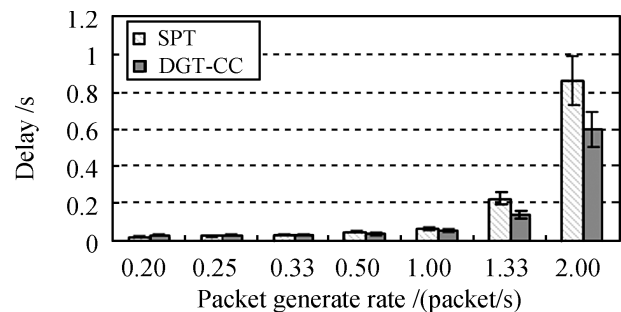


图 6 不同数据包发送速率下的延时情况

Fig. 6 Packet generating rate vs. delay

5 结论

本文针对无线传感器网络数据汇集应用, 阐述了数据汇集应用的特点, 产生 congestion 的原因和 congestion 类型, 提出基于 congestion 控制的无线传感器网络最短路径最小 congestion 数据汇集树建立算法 (DGT-CC). 在最短路径树拓扑结构保证数据实时性的情况下, 建立最短路径最小 congestion 权值树, 使网络数据流均衡分配, 从而缓解网络 congestion. 理论分析证明 DGT-CC 算法收敛, 并能构造一棵最短路径最小 congestion 权值树. 通过对丢包率、网络吞吐量和传输时延的仿真实验, 结果表明, DGT-CC 算法较普通的最短路径树具有更好的性能.

References

- Akkaya K, Younis M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2005, **3**(3): 325–349
- Akyildiz I F, Su W L, Sankarasubramanian Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, **40**(8): 102–114
- Ee C T, Bajcsy R. Congestion control and fairness for many-to-one routing in sensor networks. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Baltimore, USA: ACM, 2004. 148–161
- Wang C, Li B, Sohraby K, Daneshmand M, Hu Y. Upstream congestion control in wireless sensor networks through cross-layer optimization. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, **25**(4): 786–795
- Qiu W, Skafidas E, Hao P. Enhanced tree routing for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2009, **7**(3): 638–650
- Wan C Y, Eisenman S B, Campbell A T. CODA: congestion detection and avoidance in sensor networks. In: Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles, USA: ACM, 2003. 266–279
- Akan O B, Akyildiz I F. Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2005, **13**(5): 1003–1016
- Rangwala S, Gummadi R, Govindan R, Psounis K. Interference-aware fair rate control in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2006 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York, USA: ACM, 2006. 63–74
- Ju Hai-Ling, Cui Li, Huang Chang-Cheng. EasiCC: a congestion control mechanism for WSN. *Journal of Computer Research and Development*, 2008, **45**(1): 16–25 (鞠海玲, 崔莉, 黄长城. EasiCC: 一种保证带宽公平性的传感器网络 congestion 控制机制. *计算机研究与发展*, 2008, **45**(1): 16–25)
- Sun Li-Min, Li Bo, Zhou Xin-yun. A survey of congestion control technology for wireless sensor networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2008, **45**(1): 63–72 (孙利民, 李波, 周新运. 无线传感器网络的 congestion 控制技术. *计算机研究与发展*, 2008, **45**(1): 63–72)
- Williams B, Camp T. Comparison of broadcasting techniques for mobile Ad Hoc networks. In: Proceedings of the 3rd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. Lausanne, Switzerland: ACM, 2002. 194–205
- Ni S Y, Tseng Y C, Chen Y S, Sheu J P. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network. In: Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. Seattle, USA: ACM, 1999. 151–162
- The Network Simulator-NS2 [Online], available: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, June 3, 2009
- Perkins C, Royer E M, Das S R. RFC3561: Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. Internet RFCs, 2003

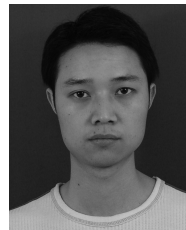


石为人 重庆大学自动化学院教授. 主要研究方向为智能控制与智能管理, 无线传感器网络及其应用和嵌入式系统.

E-mail: wrs@cqu.edu.cn

(SHI Wei-Ren Received his bachelor degree in industrial automation instrumentation from Chongqing University. He is currently a professor at the

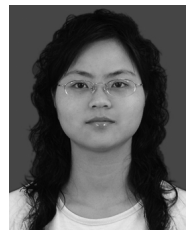
College of Automation, Chongqing University. His research interest covers intelligence control and management, wireless sensor networks, and embedded system.)



唐云建 重庆大学博士研究生. 主要研究方向为自组织网络、无线传感器网络和嵌入式技术. 本文通信作者.

E-mail: yunjian.tang@qq.com

(TANG Yun-Jian Ph.D. candidate at Chongqing University. His research interest covers ad hoc networks, wireless sensor networks, and embedded technique. Corresponding author of this paper.)



王燕霞 重庆大学硕士研究生. 主要研究方向为智能控制与智能管理.

E-mail: wangyanxia0817@163.com

(WANG Yan-Xia Master student at Chongqing University. Her research interest covers intelligence control and management.)