

文章编号: 1001-0920(2009)12-1781-05

一种用于事件监测的传感器网络拓扑控制策略

曾 明, 胥布工

(华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广州 510640)

摘 要: 针对事件驱动型传感器网络应用系统, 基于简化的 AODV(ad hoc on-demand distance vector routing)(S-AODV)算法, 提出一种结合预先路由和按需路由的混合拓扑控制策略, 通过随机选择一部分节点预先运行 S-AODV 算法来减小事件发生时任务节点的初始拓扑建立时延. 仿真实验表明, 该策略能以较小的能耗代价换取较快的系统响应速度, 满足了事件监测类应用的实时性要求.

关键词: 无线传感器网络; 拓扑控制; 事件监测; 初始时延

中图分类号: TP393

文献标识码: A

A sensor network topology control strategy for event monitoring applications

ZENG Ming, XU Bu-gong

(School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China.

Correspondent: ZENG Ming, E-mail: zengm@scut.edu.cn)

Abstract: For event-driven sensor network applications, based on a simplified AODV(ad hoc on-demand distance vector routing)(S-AODV) algorithm, a hybrid topology control strategy combining with a pre-routing and on-demand routing idea is proposed. By using random pre-selection of nodes running S-AODV algorithm, the initial delay of the topology establishment between task nodes when the events are monitored is reduced. The simulation result shows that the strategy can take a smaller cost of energy in exchange for faster system response time to meet the real-time requirements of the event monitoring applications.

Key words: Wireless sensor networks; Topology control; Event monitoring; Initial delay

1 引 言

基于传感器网络的事件监测类应用是传感器网络的一类重要应用系统. 其典型应用包括火灾探测、安全防范和目标跟踪等. 这类系统的一个显著特点是基于事件驱动, 只有当事件发生时, 网络才开始工作, 节点的唤醒和数据传输是不可预知的. 为了节省能耗, 必须设计按需拓扑控制策略, 即只有当事件发生时才建立主拓扑结构. 此外, 为了提高响应时间, 建立主拓扑结构所花费的时间不能过长, 而且网络通信延迟应尽可能地小.

围绕上述设计目标, 本文给出一种可减小初始拓扑建立时延的混合拓扑控制策略(HTCS), 该策略融合了预先路由和按需路由的思想, 通过对 ad hoc 网络中按需距离矢量路由协议(AODV)^[1]进行改进, 将基站标定为唯一目的地址, 并预先存储部分

节点到达基站的路径, 在实现动态按需拓扑控制的同时, 能够有效提高传感器网络的响应速度, 满足监测系统的实时性要求.

目前, 有关按需拓扑控制的研究成果主要是针对 ad hoc 网络提出的, 如 DSR(Dynamic source routing)^[2], TORA(Temporally ordered routing algorithm)^[3], ABR(Associativity based routing)^[4]以及 AODV 等. 它们都有一个共同特点, 即只有在源节点需要路由时才发起路由, 建立主拓扑结构. 这些协议较好地解决了网络带宽和能量的过度消耗问题, 但初始路由时延大的问题无法避免. 此外, 针对传感器网络提出的启发式算法 STEM(Sparse topology and energy management)^[5]也是一种典型的按需拓扑路由算法. STEM 算法通过设置一个专门的侦听信道进行周期性地短时间侦听, 当侦听到

收稿日期: 2009-01-07; 修回日期: 2009-03-23.

基金项目: 国家自然科学基金-广东联合基金重点项目(U0735003).

作者简介: 曾明(1977—), 男, 武汉人, 讲师, 博士, 从事传感器网络、网络化控制系统的研究; 胥布工(1956—), 男, 江苏盐城人, 教授, 博士生导师, 从事鲁棒控制与网络化控制系统等研究.

信号后就启动数据信道进行数据转发. 这种采用两个物理信道的方法节能效率很高, 但同样存在较大的初始时延, 而且物理实现也较为困难.

为了减小初始时延, 文献[6]提出了一种区域路由控制协议(ZRP), 该协议将预先路由协议和按需路由协议相结合, 把网络分为若干个互相重叠的区域, 每个区域的半径长度由用户设定. 同一区域内的节点通信使用区内路由协议(预先路由), 跨区的节点通信则使用区间路由协议(按需路由). 这种混合路由机制, 一方面避免了区内的初始延迟问题, 另一方面也避免了区间路由交互开销大的问题. 但由于划分区域需要知道节点的位置信息, 这在很多场合是不能满足的, 而且区域半径的选择对路由效率的影响也很大.

本文借鉴了ZRP的思想, 通过结合预先路由和按需路由来减小初始路由时延. 但与ZRP不同的是, 本文并未对网络进行区间划分, 而是先以一定的概率随机选择部分节点运行简化的AODV算法(S-AODV), 保证网络中一部分节点预先存储到达基站的路径. 当事件发生时, 一旦检测到事件的任务节点, 便立刻运行S-AODV算法. 由于网络中部分节点已存储到达基站的路径, 此时运行S-AODV很快就会建立到达基站的路径, 从而可有效减少网络的初始时延. 较之于AODV算法, 虽然此方法在一定程度上增加了网络开销和节点能耗, 但仿真实验结果表明, 本算法能以较小的能耗代价换取较快的系统响应速度, 这对于实时性要求较高的场合是非常必要的.

2 混合拓扑控制策略设计

下面首先对AODV算法的工作过程进行介绍, 并结合事件监测类传感器网络系统的应用特点对其进行简化. 在此基础上, 给出用于事件监测的混合拓扑控制策略, 并详细讨论了基于该策略的拓扑形成和维护过程.

2.1 AODV算法及其简化

AODV算法包括路由发现和路由维护两个过程. 当源节点有数据要发送给目标节点时, 它首先在自己的路由表中查寻到目标节点的路由. 如果路由存在并且有效, 则立刻开始发送数据; 反之, 如果相应的路由不存在, 或路由存在但已经标明为无效时, 源节点就开启一个泛洪路由发现过程. 源节点创建一个路由请求消息RREQ(Route request), 并向其邻节点广播. RREQ的格式如下:

```
RREQ: <source_addr, source_sequence_#,
broadcast_id, dest_addr,
dest_sequence_#, hop_cnt>
```

其中: 源地址和广播号联合标识一个RREQ消息, 目的序列号用来标识路由的新旧程度.

当中间节点收到路由请求后, 首先根据RREQ中的广播号来判断是否为已经处理过的RREQ. 如果是, 则简单地丢弃; 如果是新收到的RREQ, 则查寻路由表, 判断是否已经存在到达目标节点的有效路由, 没有就继续泛洪过程; 如果中间节点确定自己有到目标节点的有效路由, 并且路由中的目标节点系列号大于或等于路由请求中的系列号, 则它将直接沿反向路径向源节点单播路由应答消息RREP(Route reply), 并通知目标节点以保证路由是双向的.

目标节点收到路由请求后, 不再广播路由请求, 它先建立反向路径, 产生一个路由应答消息RREP, RREP中含有最新的系列号等信息, 沿反向路径单播给源节点. 中间节点和源节点在收到RREP后会建立到目标节点的路由, 并更新系列号等有关信息. 源节点收到RREP后即建立路由, 并开始传输数据. RREP的格式如下:

```
RREP: <source_addr, dest_addr,
dest_sequence_#, hop_cnt, lifetime>
```

其中lifetime定义了该路由维持的时间.

在将AODV算法引入事件监测类传感器网络应用时, 考虑到事件监测系统的目标节点是唯一的, 因此可对AODV进行适当简化. 在简化的AODV协议中, 所有消息包中目标地址设置为常数(基站地址), 并去掉用于标识反向路由的源地址系列号. 另外, 对于已经建立的路由, 为了减小维护代价, 各包含路由信息的节点并不需要周期性地广播HELLO信息进行连接确认, 只需存储到达基站的下一跳节点地址即可. 因为在事件监测类传感器网络应用系统中, 节点通常是静止的, 不会由于节点的移动而导致拓扑结构的变化.

S-AODV协议中各消息包的定义如下:

```
RREQ: <source_addr, base_addr_#,
broadcast_id, hop_cnt>
```

```
RREP: <source_addr, base_addr_#,
hop_cnt, lifetime>
```

对AODV简化的主要目的是减小网络控制报文开销, 提高整个网络的运行效率. 下面基于简化的AODV协议给出用于事件监测的混合拓扑控制策略, 并详细讨论其拓扑形成和拓扑维护过程.

2.2 混合拓扑控制策略设计

针对事件监测类传感器网络应用系统, 为了兼顾系统的节能性和系统响应时间两个指标, 本文给出一种基于S-AODV的混合拓扑控制策略. 其核心

仿真选择 CBR (Continuous bit rate) 源产生 UDP (User datagram protocol) 报文^[8], 每个 UDP 报文的大小为 512 Byte, 数据包目的地址均为基站地址. 每个任务节点可以视为一个 CBR 源, 仿真过程中通过设置 CBR 源的数量来模拟网络中预先运行 S-AODV 算法的节点数量. 对于 100 个节点的传感器网络, 本文选择在 0 ~ 40 个 CBR 业务源 (任务节点) 情况下考察网络的初始时延和节点能耗开销.

需要指出的是, 本文研究的初始时延不同于以往 ad hoc 网络仿真过程中的端到端的平均时延. 端到端的平均时延是指数据分组从源节点的 IP 层到达目的节点的 IP 层所需要的平均时间. 包括路由发现时延、数据包在接口队列中的等待时延、传输时延以及 MAC 层的重传时延, 它反映了路由有效性^[10]. 其定义如下:

$$T_{\text{Average-delay}} = \frac{\sum (\text{接收到数据包的时间} - \text{发送数据包的时间})}{\text{发送数据包的个数}} \quad (3)$$

从其定义可以看出, 端到端的平均时延包含了路由初始时延. 实际上它是一个平均值, 而且与发送数据分组的大小紧密相关, 因此它并不能直接反映出网络的初始时延大小. 例如, 当一个路由发现时间为 5 s, 其一个数据包传送时间为 0.1 s 时 (一旦路由建立后, 数据传送时延非常小), 传送 10 个数据包计算出来的端到端的平均时延为

$$T_{\text{Average-delay}} = \frac{5 + 10 \times 0.1}{10} = 0.6 \text{ s} \quad (4)$$

由此看来, 端到端的平均时延并不能反映出网络初始连接的快慢. 因此, 在本文的仿真实验中选用初始路由时延作为评价网络响应速度的性能指标. 初始路由时延的定义如下:

$$T_{\text{Connect-delay}} = \text{收到 RREP 应答的时间} - \text{发送 RREQ 请求的时间} \quad (5)$$

在实际仿真过程中, 为获得上述定义的初始路由时延, 采取了一种近似方法, 即通过计算目的节点开始收到数据包的时间与源节点发起路由的时间之差来作为初始路由时延. 这种近似处理方法的依据是: 一旦网络拓扑路由建立后, 数据传送时延相对较小, 中等负载下, 其时延一般不超过 0.2 s^[7,8]. 这比起多达数秒甚至十几秒的路由建立时间, 通常可以忽略不计.

另外, 对于节点能耗开销的计算是基于其转发的数据量, 同时假定节点接收和发送数据的功耗相同, 均为 30 mW. 所有实验重复 10 次, 取其平均值作

为实验结果.

3.2 实验结果及分析

首先对 AODV 算法在不同负载下的初始时延进行仿真. 与 ad hoc 网络中对 AODV 算法仿真以暂停时间作为获取相关性能指标的方法不同, 本实验主要记录不同 CBR 负载下节点的初始路由时延. 假定网络中有 n 个 CBR 负载准备发送, 以启动时刻为基准, 记录各负载节点的第 1 个数据包到达基站所需要的平均时间, 并作为此负载情况下的初始路由时间. 重新设置负载时网络中所有节点复位, 清除网络中已经建立的路由.

图 2 给出了 AODV 算法在 0 ~ 40 个 CBR 负载下的初始时延. 可以看出, 即便在轻度负载下 (10 个 CBR 源左右), 也需要 2 ~ 3 s 的初始路由时间. 而且, 随着负载的增加, 初始路由时延逐渐增大. 当达到 40 个 CBR 负载时, 初始时延接近 6 s. 这主要是由于 AODV 算法是基于广播消息建立路由的. 当负载增加时, 会造成泛洪效应, 导致网络拥塞, 丢包现象严重, 从而造成初始路由时延的增加.

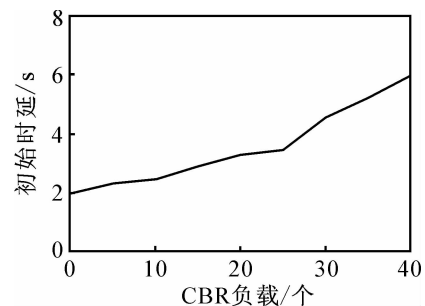


图 2 AODV 算法初始路由时延

图 3 和图 4 是对 AODV 改进后用于事件监测的混合拓扑控制策略的仿真结果. 与图 2 中横坐标表示的 CBR 负载不同, 图 3 和图 4 中的横坐标“CBR 负载”实际上是指网络中预先运行 S-AODV 的节点数量, 即 k 的取值. 从图 3 可以看出, 当网络中预先存储路由拓扑信息的节点数量达到 10% ($k = 10$) 时, 初始时延已经低于 1 s; 当网络中预先存储路由拓扑信息的节点数量达到 30% ($k = 30$) 时, 初始时延在 0.3 s 左右. 可见, 系统响应速度明显提高. 但从图 4 反映的节点消耗能量来看, 此时能耗增加较大. 实际上, 在很多实时性要求较高的监测类应用中, 1 s 的系统响应速度是完全可以接受的. 因此, 将存储预先路由信息的节点数 k 控制在总节点数量的 10% 比较合理, 此时额外的能量消耗相对较小. 可见, 相对于 AODV 协议, 本算法能以较小的能耗代价获得较快的系统响应速度, 符合监测类传感器网络系统的应用要求.

另外, 为了验证仿真结果的可信度, 本文还基于

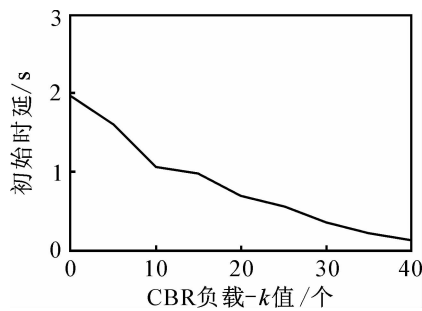


图 3 HTCS 算法在不同 k 值下的初始时延

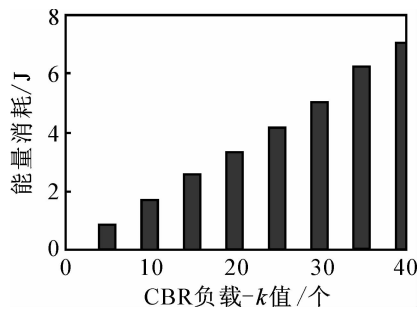


图 4 HTCS 算法在不同 k 值下节点的额外能量开销

CrossBow 的 MicaZ 系列节点进行了 X-MESH 组网实验. 将 30 个节点进行 MESH 自组网, 采用 Moteview2.0 来观察网络节点的拓扑结构和组网情况. 实验发现, 30 个节点的组网时间大概维持在 12 ~ 20 s 之间. 可见, 节点初始路由的建立时间的确较长. 虽然 X-MESH 组网协议比本文给出的算法复杂, 但也给出了一个初始路由建立时间的参照系, 增强了本文仿真结果的可信度.

4 结 论

本文对事件监测类传感器网络应用系统的设计目标进行了分析. 针对实时性要求较高的事件监测系统, 基于简化的 AODV 算法给出了一种混合拓扑控制策略 HTCS, 通过随机选择部分节点预先运行 S-AODV 算法来减小事件发生时任务节点的初始拓扑建立时延. 本文详细讨论了该策略中预先发起节点的选取机制以及拓扑结构的形成和维护过程, 并进行了仿真实验分析. 实验结果表明, 该拓扑控制策略能以较小的能耗代价获取较快的系统响应

速度, 有效减少了初始拓扑建立的时延.

参考文献 (References)

- [1] Perkins C, Royer E B, Das S. Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing [EB/OL]. IETF RFC3561, 2003.
- [2] Johnson D, Maltz D. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks [C]. Mobile Computing. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996: 153-181.
- [3] Park V D, Corson M S. Temporally-ordered routing algorithm (TORA) version1 functional specification [EB/OL]. IETF draft-ietf-manet-tora-spec-04. txt, 2001.
- [4] Toh C K. Associativity based routing for ad hoc mobile networks [J]. Wireless Personal Communications, 1997, 4(2): 103-109.
- [5] Schurgers C, Tsiatsis V, Srivastava M B. STEM: Topology management for energy efficient sensor networks[C]. Proc of IEEE Aerospace Conf. Montana, 2002; 1099-1108.
- [6] Haas Z J, Pearlman M R. The zone routing protocol (ZRP) for ad hoc networks[EB/OL]. IETF draft-ietf-manet-zone-zrp-04. txt, 2002.
- [7] Amir E, Estrin D, Breslau L, et al. The network simulator-NS2[DB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. 2008.
- [8] Perkins C E, Royer E M, Das S R, et al. Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc networks [J]. IEEE Personal Communications, 2001, 8(1): 16-28.
- [9] Greis M. NS notes and documentation [DB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/node218.html>. 2008.
- [10] Broch J, Maltz D A, Johnson D B, et al. Performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols[C]. Proc of 4th ACM/IEEE Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 1998: 85-97.

(上接第 1780 页)

- [16] 陈为胜, 王元亮, 李俊民. 周期时变时滞非线性参数化系统的自适应学习控制[J]. 自动化学报, 2008, 34(12): 1556-1560.
(Chen W S, Wang Y L, Li J M. Adaptive learning

control for nonlinearly parameterized systems with periodically time-varying delays[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(12): 1556-1560.)