

# 基于群树结构的 IPv6 无线传感器网络的组网及路由协议<sup>\*</sup>

刘湘雯<sup>1,2</sup> 侯惠峰<sup>1</sup> 张 霞<sup>1</sup> 于宏毅<sup>1</sup> 胡捍英<sup>1</sup>

(解放军信息工程大学通信工程系 郑州 450002)<sup>1</sup> (空军工程大学电子信息系 西安 710077)<sup>2</sup>

**摘 要** 如何实现 WSN 与 IP 网络的结合是当前的一个热点研究问题。针对 IPv6 与无线传感器网络相结合的标准全 IP 方式,研究了无线传感器网络的网络组织、路由以及地址分配方案,提出了基于群树结构的组网、路由以及地址分配方案,实现了 IPv6 与无线传感器网络的紧密结合,并用 NS-2 对其性能进行了仿真分析。

**关键词** 群树结构, IPv6, IP 地址自动配置, 路由

## Cluster-tree Based Networking and Routing Protocol for IPv6 Wireless Sensor Networks

LIU Xiang-Wen<sup>1,2</sup> HOU Hui-Feng<sup>1</sup> ZHANG Xia<sup>1</sup> YU Hong-Yi HU Han-Ying<sup>1</sup>

(Department of Communication Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002)<sup>1</sup>

(Department of Electron and Information, Air Force Engineering University, Xi'an 710077)<sup>2</sup>

**Abstract** It's a hot issue of how to integrate IPv6 and wireless sensor networks. Aiming at the standard all-IP manner of integrating IPv6 with wireless sensor networks, networking, routing and address auto-configuring schemes of standard all-IP wireless sensor networks are studied. Cluster-tree based networking, routing and address auto-configuring strategies in all-IPv6 wireless sensor networks are proposed. The close integrating of IPv6 with wireless sensor networks is implemented. The performance of the cluster-tree architecture is simulated and analyzed with NS-2.

**Keywords** Cluster-tree architecture, IPv6, IP address auto-configuration, Routing

## 1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)以其获取信息精度高、部署灵活性强、可靠性高、经济性好等特点,在军事侦察、环境监测、工业控制与监视、智能建筑、交通运输以及其它商业领域具有非常广阔的应用前景。如何实现 WSN 与 IP 网络的结合是当前的一个热点研究问题。当前,关于 IPv6 与 WSN 的结合方式主要有三种观点<sup>[1~3]</sup>:①只有网关节点支持 IPv6 协议;②只有部分特殊节点支持 IPv6 协议;③全 IP 方式,每个普通传感器节点都支持 IPv6 协议。其中,只有网关节点支持 IPv6 协议的结合方式,传感器节点采用自定义协议,如果设计合理,协议的效率可以比较高。但是,该方式无统一标准,协议的复杂度和稳定性难以事先确定。只有部分特殊节点支持 IPv6 协议的方式,适合网络中有部分能力强的节点的异构网络。全 IP 方式要求每个普通传感器节点都支持 IPv6 协议,可以理解为:①每个普通传感器节点具备全局唯一的 IPv6 地址,以满足标识节点及寻址的需要;②在每个普通传感器节点上运行 TCP/IP 协议栈,以解决 WSN 及内外部 IPv6 网络节点之间通信的需要;③根据传感器节点对 IPv6 协议支持程度的不同,又可细分为两种情况:(i)每个传感器节点只支持主机(host)侧的 IPv6 协议;(ii)每个传感器节点既支持主机(host)侧的 IPv6 协议,又支持路由器(Router)侧的 IPv6 协议,即每个传感器节点需要在 IP 层支持路由转发功能。每个节点在 IP 层支持路由转发功能的方

式,简称其为标准全 IP 方式。标准全 IP 方式是实现 WSN 与 IPv6 协议紧密结合的一种方式,它相对于其它结合方式具有如下优势:

(1) IPv6 作为下一代互联网(NGI)规范的协议标准,采用该技术便于推动无线传感器网络技术的标准化;

(2) 标准全 IP 方式使得 WSN 在接入 IPv6 网络的方式上更为方便、灵活;

(3) IPv6 的许多技术特点如自动地址配置、移动性支持等,对大规模 WSN 的自组织管理提供了良好支持;

(4) Internet 的组网方式可以为 WSN 充分借鉴,使其成为 WSN 的一种合理拓展。

对于只有网关节点支持 IPv6 协议的方式,文[1~3]提出应用层网关方式、NAT(Network Address Translation)网关方式以及 WSN over TCP/IP 方式。对于部分传感器节点支持 TCP/IP 的方式,文[3]提出了一种 IP over WSN 的实现思路。普通传感器节点只支持 WSN 私有协议;部分群首传感器节点支持两种协议,一种是 WSN 私有协议,一种是 TCP/IP 协议。受通信能力的限制,群首节点与网关节点之间以及它们彼此之间可能并非一跳可达,为了实现它们之间的数据传输, TCP/IP 作为应用承载到 WSN 私有协议之上,在已有的 WSN 协议上实现隧道功能。该方式只给出了部分传感器节点支持 TCP/IP 协议的思路,并没有给出具体的实现方案。

文[4]给出了一种全 IP(v4)方式下的 WSN 的设计和实现方案。网络中包括两类节点:骨干节点和普通传感器节点。

<sup>\*</sup>基金项目: CNGI 示范工程项目(CNGI-04-10-1D),国家自然科学基金(60472064),河南省自然科学基金(SP05ZR23069)。刘湘雯 博士研究生,主要研究方向为无线自组织网络和无线传感器网络协议等;侯惠峰 博士研究生,主要研究方向为无线自组织网络营销和无线传感器网络路由协议、拓扑控制等;张 霞 博士研究生,主要研究方向为无线自组织网络和无线传感器网络路由协议等;于宏毅 教授,博士生导师,主要研究方向为无线自组织网络、无线传感器网络;胡捍英 教授,博士生导师,主要研究方向为第三代移动通信系统。

在布设时就确定哪些节点是骨干节点,哪些节点是普通传感器节点。普通传感器节点一跳可达骨干节点。普通传感器节点把感知到的事件发送给骨干节点,骨干节点再把事件广播给相邻骨干节点,使得所有骨干节点备份所有的事件记录。网络内有一个移动骨干节点,该节点与其它骨干节点一跳通信,获取所有事件。网络前缀在布设时事先配置,节点 IP 地址由节点的地理位置和网络前缀确定。文[4]中每个节点都支持 TCP/IP 协议,但是没有涉及到网络的自组织以及路由问题。

本文针对 IPv6 与 WSN 相结合的标准全 IP 方式,对多跳 WSN 的网络组织及路由方案进行了研究,提出了基于群树结构的组网、路由以及自动地址配置方案。

## 2 网络结构——群树结构

首先给出网络模型,其特征是:网络规模比较大;传感器节点均匀随机布设;传感器节点不具备移动性;节点的发送功率不可调整;所有的传感器节点相同且节点的初始能量相等;网络中只有一个 Sink 节点,并且其能力强大。

要设计标准全 IPv6 结合方式下的多跳 WSN 协议,我们首先需要考虑基于以上网络模型应采用何种网络结构。分群的网络结构具有很多优点,例如,便于实现 IP 地址动态分配和管理,便于大规模网络管理,降低网络开销,便于实现数据聚合、节点休眠调度等。另外,传感器网络中的业务主要是外部用户对网络内部传感器节点的查询,以及传感器节点周期报告和事件触发的报告给外部用户的数据,因此,基于群建立树结构,称其为群树结构,以满足传感器网络的业务需求。

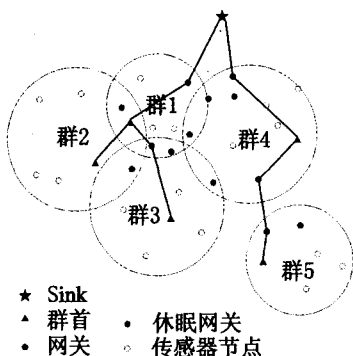


图1 群树结构

群树以 Sink 节点为根节点,群树结构中的每个群作为一个单元,可以看作树上的一个节点,群之间通过网关节点连接,如图1所示。群树结构具有如下优点:

(1) 群树结构与 Internet 的对应非常巧妙:一个群相当于 Internet 的一个子网,连接群的网关相当于 Internet 的路由器。Internet 与群树结构的对比如图2所示。

(2) 群树结构可以保证 IPv6 协议栈的标准性:群树结构可以充分利用 IPv6 的特色技术,如地址自动配置、基于地址分级结构的数据转发等,最大程度地保持 IPv6 协议栈的标准性。

(3) 群树结构使得路由变得非常简单:对于查询可以沿着树状结构扩散到全网,数据收集沿着树状结构汇聚到 Sink 节点。

(4) 群树结构对于数据聚合非常有效:在群内由群首完成数据聚合的基础上,数据向 Sink 转发的过程中,由树杈上的群首进一步完成数据聚合功能。

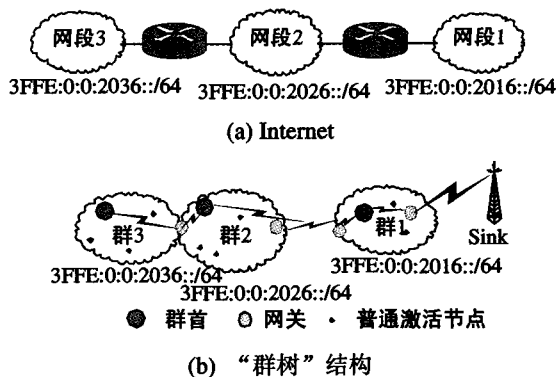


图2 群树结构与 Internet 的比较

## 3 基于群树结构的标准全 IPv6 无线传感器网络路由协议

网络的运行包含两个过程:组网期和运行期。组网期完成群的构造、群间连通性的建立、群树结构的建立以及 IP 地址的分配;运行期进行节点的休眠调度,群树结构的维护以及 IP 地址的维护。

### 3.1 群树结构的建立以及 IP 地址的分配

节点以一定方式构造全连通群。群内任意两个节点间可以直接通信,这与 Internet 一个网段内的节点可以直接通信相对应。通过节点之间交互 Hello 消息,获得邻居节点以及邻居节点的邻居列表。构造群的过程如下:每个节点设置一个定时器,定时器时间与节点的剩余能量以及节点的度(节点的邻居节点个数)有关。定时器超时时间内,如果节点收到了来自其它节点的 Invite 消息,节点放弃竞争,加入其它群。如果定时器超时,节点成为群首,生成一个群标号,比较自己的邻居列表和所有邻居节点的邻居列表,选择和自己邻居列表交集最大的节点邀请加入群,如果存在多个相等的,则随机选择一个,向该节点发送 Invite 消息。收到 Invite 消息的节点向发送者回复 Invite-Ack,并从两者共同的邻居节点中选择一个度大的,重复上述工作,直到所有的节点没有共同的邻居。节点如果收到多个 Invite 消息,则成为连接这多个群的网关。如果发送 Invite 消息的节点在一段时间内没有收到应答,则从邻居列表中重新选择一个节点发送 Invite 消息。最终,所有节点都加入了一个群。群内的群首维护群内成员节点以及相邻群的信息,网关维护自己连接的群的信息。

构造了群之后,每个节点在一跳范围内广播群间连通性探测消息,节点收到该消息后,如果发送消息的节点是其它群的成员,则该节点以及发送消息的节点成为连接这两个群的网关,该节点将其告诉自己的群首,群首记录该群可以通过哪个网关节点到达邻居群,建立群间的连通性。

构造了群并建立了群间连通性后,建立群树结构。建立群树结构时考虑两方面因素:一方面是跳数,对于发送功率不可调整的网络,最小跳数路径即代表了最小能量路径;另一方面是能量,让能量比较少的群把有限的能量用于探测,而能量充足的群帮助下游群完成转发功能,群的能量定义为群内所有节点的剩余能量之和。

群树结构的建立由 Sink 节点发起。Sink 节点广播 RREQ 消息,RREQ 消息中携带广播 ID、自己距离 Sink 的跳数以及群的能量。这里可以把 Sink 以及连接它和相邻群的节点看作一个群,只是 Sink 一直担当群首。如果是连接两个

群的网关节点接收到 RREQ, 则 RREQ 的跳数加 1 单播给另一边所连接的群首或者网关; 如果相邻群的群首节点收到 RREQ, 则判断该 RREQ 的序列号是不是最新, 如果是, 则设置定时器, 在定时器超时时间内, 比较新收到的 RREQ 与当前缓存记录, 如果新的 RREQ 距离 Sink 的跳数小于当前的记录, 则根据新的 RREQ 更新缓存中的记录; 如果跳数相等, 则比较发送 RREQ 的群的能量, 如果能量大于当前缓存记录的能量, 则根据新的 RREQ 更新缓存中的记录; 否则, 丢弃 RREQ。

群首定时器超时, 对于以后到达的 RREQ 消息丢弃, 认为选择出最佳的父亲群以及父亲节点, 并沿着父亲节点向父亲群发送应答消息。父亲群的群首接收到应答消息后, 将该群加入自己的孩子群列表, 并向其发送确认消息。该群的群首接收到确认消息后, RREQ 的跳数加 1 后继续广播。这样, 一直到全网所有的群, 建立全网的群树结构。

在选择父亲群时, 延迟太小, 可能没有选择出最佳的父亲群; 延迟太大, 增加了树建立的延迟。延迟应当与邻居群的个数有关, 即群  $i$  的延迟  $Delay_i$  为,

$$Delay_i = \alpha \cdot D_0 \cdot N_i$$

其中,  $N_i$  为群  $i$  的邻居群个数,  $D_0$  为一个群发送给邻居群的 RREQ 所需要的平均时间,  $\alpha$  是一个系数。这样定义  $Delay_i$  的原因是因为邻居群个数越多, 可选择的父亲群就越多, 需要等待的时间就应当越长。

建立了群树结构后, 完成对各个节点的 IPv6 地址的分配。我们采用无状态地址自动配置方式, 但是无法手动配置担当路由器角色的网关节点以及群首的 IP 地址, 因此, 在群树结构建立后, 由 Sink 节点沿着树结构逐级向其子群分发网络前缀, 每个群分发一个全网唯一的网络前缀。这样, 网络内所有群的群首获得网络前缀, 网关获得连接多个群的多个 IPv6 地址。然后, 群内节点以 link-local 地址向群首申请 IPv6 地址。这样, 传感器节点用它从群首得到的群地址前缀加上自己的 link-local 地址, 自动配置全局 IPv6 地址。

群树结构建立并完成地址分配后, 路由完全基于所建立的群树结构的地址分级结构。

构造了群、建立了群树结构并向所有节点分配了 IP 地址之后, 网络进入运行期。运行期进行节点的休眠调度, 群树结构的维护以及 IP 地址的维护。

### 3.2 节点的休眠调度

运行期所有节点处于四种状态: 探测、群首、网关和休眠。图 3 是节点的状态转移图。节点起始于探测态, 此时, 节点发送探测消息, 当前激活网关收到该消息后, 如果发现是连接相同群的网关节点发送的探测消息, 并且自己的能量即将耗尽, 则要求发送探测消息的节点唤醒, 这样发送探测消息的节点成为激活网关, 当前网关休眠; 如果当前网关的能量比较充足, 则要求发送探测消息的网关休眠, 最终使得连接相同群的网关只有一个激活。群首收到探测消息后, 如果发现自己的能量不足, 则要求该节点唤醒以替换自己成为群首, 或者如果发现自己的邻居群记录中, 没有该节点连接的群的信息, 则向其发送要求唤醒消息, 这样, 该节点成为激活网关。节点在发送了 3 个探测消息后一段时间内, 没有收到让自己激活的消息, 则返回休眠态。不是网关和群首的普通传感器节点进入休眠态。

网关节点发现自己连接的群已经解散或者在一段时间内无法和其连通, 并且只剩下一个连接的群, 则节点退化为普通

传感器节点, 向该群首发送要求休眠的消息, 此后, 节点转入休眠态。

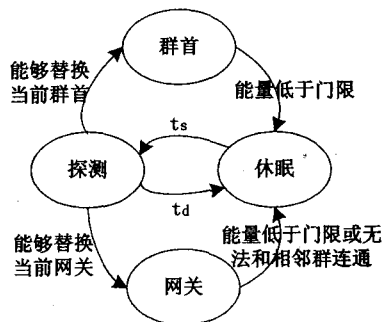


图 3 节点的状态转移图

节点进入休眠态一段时间后, 返回探测态。普通传感器节点的休眠时间设为预测的群首的工作时间, 网关节点的休眠时间设为预测的群首工作时间与连接相同群的网关节点工作时间中比较小的一个。

任何节点发现自己不能成为其它群的成员, 并且还有邻居节点, 则进入群重构阶段, 这与群的构造过程相同。

### 3.3 群树结构的维护

群树结构采用周期维护和事件触发维护两种方式, 对群树结构进行维护的同时, 完成 IP 地址的维护。周期维护由 Sink 节点周期的发起, 与群树结构建立过程相同。周期维护群树结构时, 重新分配 IP 地址。周期维护的开销比较大。

为了解决周期维护带来的开销问题, 结合周期维护方式采用事件触发的维护。如果一个群发现自己的父亲群与自己不具有连通性, 则在自己相邻的群内寻找一个最佳的群作为自己的新父亲群, 建立到 Sink 的最优路径。寻找最佳父亲群的方法如下: 群首广播路由维护消息, 相邻群的群首接收到该消息后, 携带自己到 Sink 的跳数、群的能量向该群的群首发送应答; 如果是连接邻居群的网关节点接收到该消息, 它把该消息通过连接邻居群的另一个网关发送至邻居群群首, 或者直接发送至邻居群群首, 邻居群群首接收到该消息后, 携带自己到 Sink 的跳数、群的能量向该群发送应答。该群的群首收到第一个应答消息后, 设置定时器, 在定时器超时时间内选择一个最佳的父亲群, 选择最佳父亲群的方法与路径建立时选择最佳父亲群的方法相同, 并向该父亲群发送应答消息, 父亲群的群首接收到应答消息后, 将其加入自己的孩子群列表, 并向其发送确认消息。

在比较好的情况下, 可以选择一个非孩子群作为自己的父亲群。一种比较差的情况是, 只有该群的孩子群才有可能成为该群的父亲群。此时, 需要对其进行适当的处理, 否则形成环路。如图 4 所示, 群 3 发送了路由维护消息后, 等待一段时间后, 只有自己的孩子群 4 向其发送应答, 此时, 群 3 选择自己的孩子群 4 作为新父亲节点, 并向其发送要求确认消息, 群 4 接收到该消息后, 发现形成环路, 修改路由表, 置其为空或者无效, 但是不向群 3 发送确认消息。然后, 群 4 在自己的一跳范围内广播路由维护消息, 完成与群 3 同样的找路过程。如果找到一个非孩子群 2 作为群 4 的新父亲群, 群 4 才向群 3 发送确认消息, 群 3 收到该确认消息后, 修改路由表, 父亲群域修改为群 4。群只有收到自己选择的父亲群的确认, 才修改路由表。群 3 在足够长的时间内没有收到确认, 则认为该群为游离节点, 没有到达 Sink 节点的路径。

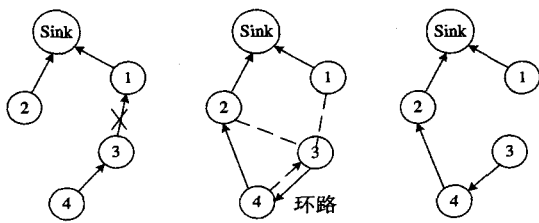


图4 群树的维护以及IP地址维护

### 3.4 IP地址的维护

IP地址的维护分为两种情况，一种是由于群解散或者生成新的群而带来的地址维护，一种是由于群树的维护而导致的父子关系改变带来的地址维护。

#### (1) 群解散以及生成新群时IP地址的维护

随着网络的运行，节点能量不断耗尽，群内节点逐渐减少，当群内所有节点都可以加入其它邻居群时，该群解散，群解散之前，由群首将该群的IP地址交给邻居群托管。全连通群中，由于环境或者其它因素而导致节点间链路断开，则会生成新的群，此时需要对节点的IP地址进行维护。生成新的群之后，向邻居群申请IP地址，邻居群如果有多余的IP地址，则向其分配一个网段，该群成为该邻居群的孩子群。这可以参见文[5,6]。

#### (2) 父子关系改变后IP地址的维护

新的父子关系建立后，改变了IP地址的规律性，为了保证标准的IP转发，需要维护地址的规律性。在图4中，群3的父亲群本来为群1，由于群3与群1间所有的网关节点失效或者群1失效，群3重新选择群4作为自己的新父亲群，此时，其上游群Sink并不知道群3的数据需要由群2和4进行转发，还会把群3的数据发送给群1，这就带来了问题，这需要由群3通知群Sink，Sink收到消息后，修改自己的转发表，则以后要发送至群4的数据由Sink经过群2和群4转发至群3。

## 4 仿真结果和性能分析

我们采用NS-2分析算法的性能。网络中有50个节点，随机均匀分布在100m×100m的范围内，节点在整个仿真过程中静止不动，节点的通信范围为20m，节点的发送功率不可调整。MAC协议采用改进的802.11以支持修面功能，信道模型为自由空间传播模型。每个节点的初始能量为10J。网络中只有一个Sink节点，位于网络中任意位置，Sink节点的初始能量配置为50J。所有节点在仿真的整个过程中保持静止态。业务为CBR业务，分组大小为512bytes，节点发送分组的平均速率为每秒发送1个分组。能量模型设为发送功率0.050208W，接收功率0.05W，侦听功率0.045W。

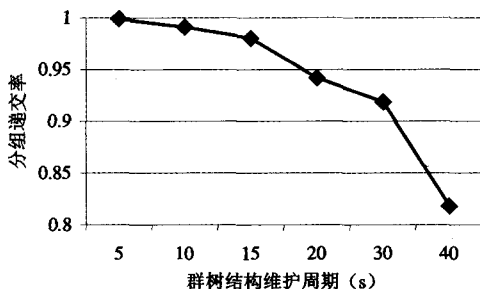


图5 群树结构维护周期与分组递交率的关系曲线图

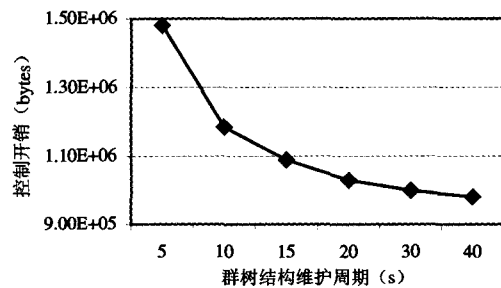


图6 群树结构维护周期与控制开销的关系曲线图

图5和图6分别是分组递交率和开销随着群树结构维护周期的变化曲线图。在仿真时，仿真时间100s，选择父亲群的基本延迟时间 $\alpha \cdot D_0$ 设为0.006s。从图5可以看出，随着周期维护群树结构时间间隔的增大，分组递交率不断降低，这是因为，维护群树结构的间隔越大，路径的正确性就越低，虽然采取了事件触发的维护策略以减少这种情况的发生，但还是不能弥补周期维护所带来优势，而使得分组递交率降低。从图6可以看出，随着周期维护群树间隔的增大，控制开销不断减少。当群树维护周期为20s时，控制开销达到平稳态，分组递交率可以达到94%以上。

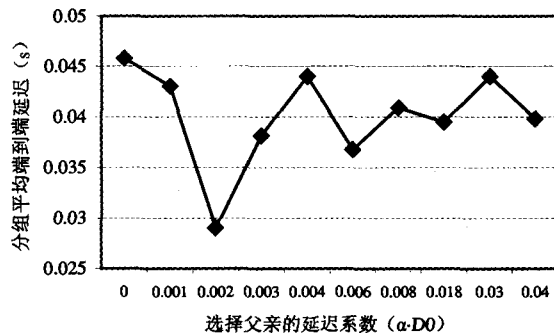


图7 选择父亲群延迟与分组端到端时延之间的关系

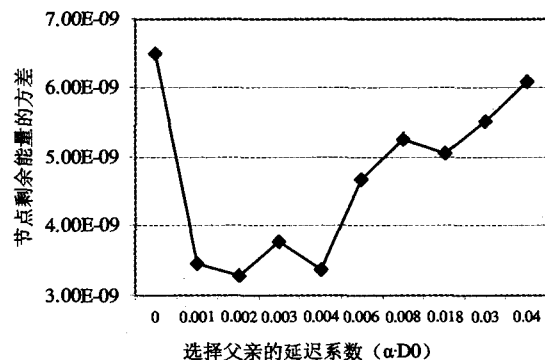


图8 能量均衡性能与选择父亲群延迟之间的关系

图7和图8分别是分组端到端时延和网络能量均衡性能随着选择父亲群时延的变化曲线图。群树维护周期设为15s。从图中可以看出，当群首收到第一个RREQ消息就选择其为父亲节点时，端到端延迟比较大，能量均衡性能也比较差，这是因为选择的上游群不是最优；随着选择父亲延迟的增加，网络的延迟和能量均衡性能逐渐变好，在 $\alpha \cdot D_0$ 为0.002s时，延迟性能达到最好， $\alpha \cdot D_0$ 为0.001~0.004s之间时能量均衡性能达到最好，这是因为选择了比较好的父亲群；此后，随着 $\alpha \cdot D_0$ 的增大，端到端延迟不断增大，能量均衡性能

(下转第51页)

在非阻塞模式下,所有的连接请求都能满足,因此疏导的目标就是使网络资源耗费最小。图5和图6比较了使用的收发器个数随着节点的收发器总数和链路波长总数的变化趋势,使用的流量疏导策略是MST。从图中的比较可以看出,在波长和收发器资源充足的情况下,TSAG模型极大地减少了占用的收发器。

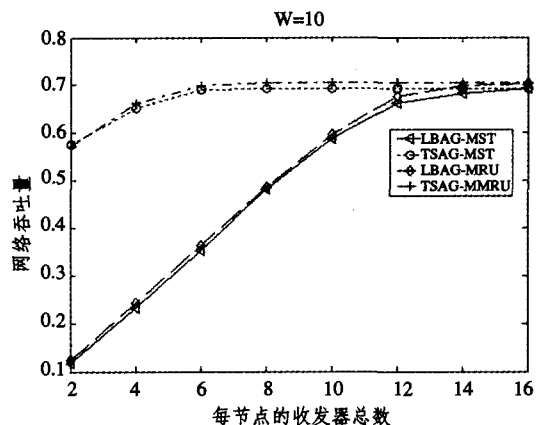


图7 吞吐量比较,  $W=10$

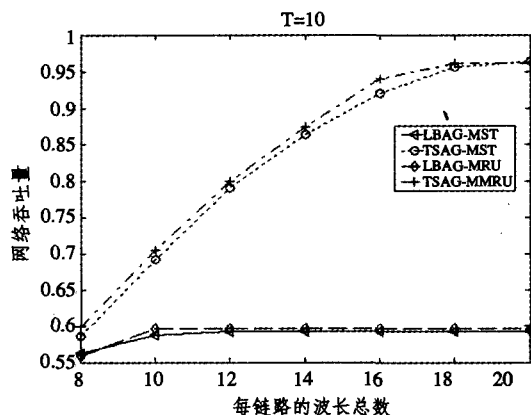


图8 吞吐量比较,  $T=10$

在网络资源不足的阻塞模式下,疏导的目标就是满足更多的连接请求,使网络吞吐量最大。两种模型的网络吞吐量

(上接第31页)

也不断变差,这是因为路径的建立延迟增大,当节点有数据发送时,路径还没有建立好,采用了路径修复,增大了延迟,或者由于对已经不是最优的旧路由继续使用,导致网络的延迟和能量均衡性能变差。

**总结及下一步工作** 本文以群树结构与Internet相对应,实现了传感器网与IPv6的巧妙结合。尽管如此,IPv6毕竟不是专门面向WSN而设计的通信协议,在无线传感器节点上直接运行标准的IPv6协议也存在另外一些问题,例如:包头开销问题<sup>[7]</sup>,IPv6协议栈的剪裁问题<sup>[8]</sup>等。总之,标准全IPv6无线传感器网络的相关技术还需要更深入的研究。

## 参考文献

- 1 Dunkels A, Alonso J, Voigt T, et al. Connecting wireless sensor networks with TCP/IP networks. In: Proceedings of the Second International Conference on Wired/Wireless Internet Communications (WWIC 2004). Germany: Springer, 2004. 143~152
- 2 Zuniga M, Krishnamachari B. Integrating future large-scale wireless sensor networks with the Internet[J/OL]. [USC Computer

的比较如图7和图8所示。图7假设所有的光纤链路有10个波长,每节点的收发器数从2变化到16时,比较了TSAG和LBAG的吞吐量性能。从图中的比较可以看出,TSAG的性能要优于LBAG,并且每节点的收发器越少,TSAG的优势就越明显。还可以看出MRU策略的性能要优于MST,因为MRU分配资源更加有效率。

图8假设每节点的收发器个数是10,每光纤链路的波长数从8变化到20时,比较了TSAG和LBAG的吞吐量性能。从图中的比较可以看出,TSAG的吞吐量高于LBAG,并且随着每光纤链路的波长数的增加,TSAG的优势越明显。同样可以看出MRU的性能优于MST。

**结论** 将流量疏导看成一个两层的路由问题,本文提出了一种应用于静态WDM网状网络的收发器节约辅助图(TSAG)模型。基于TSAG模型,还提出了一种收发器节约算法TSABAG。仿真数据表明,TSAG模型与LBAG模型相比,节约了收发器资源,并拥有较高的网络吞吐量。将来还要进一步研究动态流量疏导的算法,以及波长转换受到限制时的流量疏导问题。

## 参考文献

- 1 Zhu Hongyue, Zang Hui, Zhu Keyao, Mukherjee B. A novel Generic Graph Model for Traffic Grooming in Heterogeneous WDM Mesh Networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(2): 285~299
- 2 Chiu A L, Modiano E H. Traffic Grooming Algorithms for Reducing Electronic Multiplexing Costs in WDM Ring Networks. IEEE/OSA J. Lightwave Technol., Jan. 2000, 18: 2~12
- 3 Zhu Keyao, Mukherjee B. Traffic Grooming in an Optical WDM Mesh Network. IEEE J. Selected Areas in Communications, Jan. 2002, 20: 122~133
- 4 Zhu Hongyue, Zang Hui, Zhu Keyao, Mukherjee B. Dynamic Traffic Grooming in WDM Mesh Networks Using a Novel Graph Model. SPIE Optical Networks Magazine, 2003, 4(3): 65~75
- 5 Zhu Keyao, Zang Hui, Mukherjee B. A Comprehensive Study on Next-Generation Optical Grooming Switches. IEEE J. Selected Areas in Communications, 2003, 21(7): 1173~1186
- 6 Zhu Keyao, Zhu Hongyue, Mukherjee B. Traffic Engineering in Multigranularity Heterogeneous Optical WDM Mesh Networks through Dynamic Traffic Grooming. IEEE Network, 2003, 17(2): 8~15
- 7 Wang Yao, Ramamurthy B. A Link Bundled Auxiliary Graph Model for Constrained Dynamic Traffic Grooming in WDM Mesh Networks. IEEE J. Selected Areas in Communications, 2005, 23(8): 1542~1555

Science Technical Report CS 03-792]. 2003

- 3 Hui D, Richard H. Unifying micro sensor networks with the Internet via overlay networking. In: Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN 2004), Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 2004. 571~572
- 4 Dunkels A, Voigt T. The design and Implementation of an IP-based Sensor network for intrusion Monitoring. In: Swedish National Computer Networking Workshop (SNCNW 2004), Karlstad, Sweden, 2004. 31~36
- 5 Mohsin M, Prakash R. IP address assignment in a mobile ad hoc network. In: Proceedings of Military Communications Conference, California, USA, 2002. 856~861
- 6 Nesargi S, Prakash R. MANETconf: configuration of hosts in a mobile ad hoc network. In: Proceedings IEEE INFOCOM 2002. New York, USA, IEEE Press, 2002. 608~617
- 7 Dunkels A, Alonso J, Voigt T. Making TCP/IP viable for wireless sensor networks. In: Holger Karl, ed. European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN 2004). Berlin, Germany: Springer, 2004. work-in-progress session
- 8 Dunkels A. Full TCP/IP for 8-bit architectures. In: Proceedings of the First International Conference on Mobile Applications, Systems and Services (MOBISYS 2003). Berkeley, CA: USENIX Association, 2003. 85~98