

一种基于多代理的传感器网络 IPv6 地址配置协议

罗丹彦, 左德承, 杨孝宗

(哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 为了更好的发挥无线传感器网络的效能,方便与 Internet 的互联,需要实现无线传感器网络 IP 地址的自动配置。因为 IPv6 可以提供大量网络地址,更符合无线传感器网络要求地址数量较多的这个特点,所以本文针对无线传感器网络提出了一种基于多代理的 IPv6 地址自动配置协议 SNMAAP,通过在网络中使用地址代理,不仅可以使节点在很短的时间内获得可用地址,而且也降低了地址出现冲突的概率和网络开销。在 OPNET 仿真平台上对 SNMAAP 协议以及两种地址配置协议 IPv6 Stateless Autoconfiguration 协议和 MANETconf 协议进行了仿真,实验结果表明在相同条件下 SNMAAP 协议不仅保证了地址的唯一分配,协议的开销、延迟和重复检测开销也均较小。

关键词: 无线传感器网络; 地址分配; IPv6

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-1328(2009)03-1125-08

DOI:10.3873/j.issn.1000-1328.2009.00.048

0 引言

近年来,由于无线通信和电子技术的迅速发展,传感器节点变得体积更小、成本更低、功耗更低、功能更强大、通信距离更远。这些具有一定感知、数据处理、通信等能力的传感器节点的出现,使传感器网络技术成为可能。无线传感器网络通常是指由密布在感知区域内的大量传感器节点组成的网络^[1],由于其具有可快速布署、抗毁性强、监测精度高、覆盖区域大等特点,无线传感器网络技术已经成为当前信息领域的研究热点之一^[2]。

IPv6 作为 Internet 协议的下一版本,具有 IPv4 无法比拟的优势,它可以提供大量的 IP 地址,更符合无线传感器网络内节点数量较多、需要大量网络地址的这个特点,因此无线传感器网络节点更适合采用 IPv6 地址。本文提出了一种基于多代理的无线传感器网络 IPv6 地址自动配置协议(Sensor Networks Multi-agents Address Assignment Protocol, SNMAAP),通过在网络中设置代理节点,协议不仅实现了传感器网络内节点 IPv6 地址的自动分配,而且能够保证比较低的地址冲突概率,协议开销、延迟和重复检测开

销也均较小。

本文的第 1 节简要介绍了网络地址配置协议及相关工作,第 2 节叙述了 SNMAAP 协议的原理,第 3 节从理论上证明了 SNMAAP 协议可以保证较低的地址冲突概率,第 4 节为仿真实验及结果,文章最后在第 5 节对全文进行了总结。

1 网络地址配置协议

网络地址配置协议负责为节点分配网络地址,它可分为状态地址配置协议和无状态地址配置协议两类。状态地址配置协议假设在网络中存在一个中心实体,由此实体为未配置地址的节点分配唯一的 IP 地址,并将已分配地址的信息保存在中心地址分配表中从而避免地址冲突。DHCP^[3] 协议就属于此类协议,在 DHCP 协议中,由 DHCP 服务器负责为网络内的主机进行 IP 地址分配。无状态地址配置协议允许在网络中不存在中心实体,节点可以自选地址,并通过分布式的重复地址检测来验证地址的唯一性。根据进行重复地址检测的时机和方式的不同,重复地址检测机制可分为:主动重复地址检测(Strong DAD)^[4]、弱重复地址检测(Weak DAD)^[4]和

被动重复地址检测(Passive DAD)^[5]。

根据分配地址的节点身份以及重复地址检测机制的不同,无状态地址配置协议可分为以下三类:

(1) 独立地址配置协议

在该类协议中新加入网络的节点以随机或一定的方式为自己选择一个临时地址,之后为避免出现地址冲突,由其自身发起重复地址检测过程。此类协议的典型协议主要有:

IPv6 无状态自动配置协议(IPv6 Stateless Auto-configuration)^[6]。在此协议中,节点通过三步获得 IP 地址:link-local 地址建立、重复地址检测、site-local 地址建立。其中重复地址检测采用泛洪机制,因此限制了网络的规模,为了克服这个缺点,又提出了分级的策略^[7],但是分级会提高网络维护的成本。

文献[8]提出了一种地址自配置协议,在此协议中,节点在规定地址范围内随机选择一个地址,然后用该地址作为目的地址,采用路由发现的方法来请求一个路由,在几次广播路由请求包 RREQ 后,如果都没有收到路由应答包 RREP,就证明在网内没有节点使用这个 IP 地址,选择的这个 IP 可用。这种方法要求路由协议具有路由发现这个过程,未考虑网络分割。

文章[9]提出了一种通过 GPS 信息为节点分配 IPv6 地址的方法,这种方法可以很好的保证地址唯一性和较少的协议开销,但是要求每个节点都已知其 GPS 信息,这就对节点提出了很高的要求。

(2) 基于邻居节点的地址配置协议

此类协议中新加入网络的节点向其邻居发出地址分配请求,邻居节点作为地址代理为新节点分配地址。代理节点可以通过全网泛洪等策略来保证地址的唯一性。MANETconf^[10]协议便属于此类协议。

在文献[11]中提出了一种分布式动态地址配置协议。这个协议的思想是每个节点保留一个未分配 IP 地址集,从此地址集中为新加入网络的节点分配 IP 地址,并为其分配一段空闲的 IP 地址空间。节点离开网络时需将自己拥有的地址空间还给网络中的节点,但是某些节点突然离开网络会造成部分地址空间流失,为解决这个问题需进行周期性泛洪来检测节点地址空间的泄漏。这种方法的可扩展性较差,而且需要周期性地对地址池进行维护,并且会造成地址的浪费。

文献[12]和[13]提出了 DHCP 协议针对无线网络进行扩展后的 DRCP 协议。在 DRCP 协议中,每个无线网络节点既是客户机也是服务器,而且每个节点拥有一个地址池。地址池的分发采用 DAAP 协议^[14],每个节点通过申请,从邻居节点获得一半大小的地址池。

(3) 基于地址代理的地址配置协议

在此类协议中地址代理节点维护全网的地址信息,代理节点为新加入网络的节点分配地址并且周期性地发送广播消息来检测网络的合并和分割。

在文献[15]中提出了一种由汇聚节点为距离自己较近的传感器节点分配地址的方法,这种方法对网络结构要求较高,不具备一般性,且未能很好地体现传感器网络的对等性和分布性。

由于无线传感器网络内节点数目较多、无中心控制节点、节点随时可能出现或消失,造成拓扑结构动态改变等原因,在传感器网络中更适于采用无状态地址配置协议。以上所述无状态地址配置协议多是基于 IPv4 地址的,而且多是为无线自组网设计的,因此本文基于第三类无状态配置协议的设计思想,并结合无线传感器网络的特点、应用背景,为无线传感器网络设计了一种基于 IPv6 地址的地址配置协议 SNMAAP。

2 SNMAAP 协议

2.1 相关定义

在本协议中,根据传感器节点加入网络时的状态以及在网络中所担负责任的不同将它们划分为三种状态节点,节点处于不同状态,其功能和任务也不同。三种状态节点的定义如下:

定义 1 初始节点(NEW node) 刚进入网络,尚无合法 IP 地址的节点被定义为初始节点。

定义 2 代理节点(AGENT node) 已拥有合法 IP 地址,能够为其他节点分配 IP 地址的节点被定义为代理节点。

定义 3 完成节点(ACCOMPLISH node) 已拥有合法 IP 地址,辅助代理节点分配 IP 地址的节点被定义为完成节点。

图 1 示意了节点在这三种状态间的转换关系。

定义 4 子网 由代理节点及所有通过它获得地址的完成节点组成的网络被定义为一个由该代理

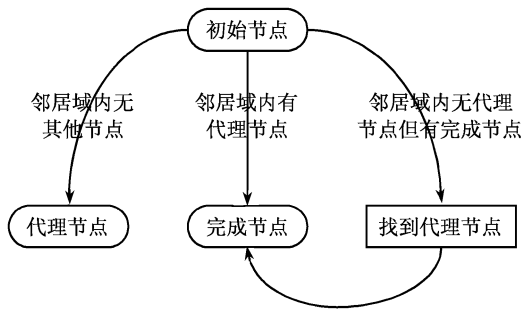


图 1 节点状态转换示意图

Fig.1 Node state transferring graph

节点负责的子网。

子网通常为整个传感器网络的一个子集。

2.2 IPv6 地址结构的设计

本协议设计的 128 位 IPv6 地址如图 2 所示,由 64 位网络前缀、32 位子网 ID 号、16 位时间及 16 位随机数组成。

网络前缀:自组网的网络前缀为 FEC0:0:0:FFFE::/64^[8],由于目前对传感器网络并没有相关规定,因此本协议将传感器网络的网络前缀也设置为 FEC0:0:0:FFFE::/64。

0	63 64	95 96	111 112 127
FEC0 0000 0000 FFFE	子网 ID	时间域	随机数

图 2 SNMAAP 协议的 IPv6 地址结构

Fig.2 IPv6 address structure of SNMAAP

子网 ID:由子网内的代理节点产生的唯一标识一个子网的 ID 号,同一子网内的所有节点子网 ID 相同,子网不同 ID 号不同。在 RFC2373^[16]中对 IPv6 地址体系结构规定:网络前缀从 001 到 111 范围内的所有 IPv6 地址,它们的后 64 位地址应该遵循 IEEE EUI-64 格式,即后 64 位中的第 7 位始终取值为‘1’。自组网的网络前缀在此范围之内,因此为了与自组网区分,本文在设计 IPv6 地址后 64 位时将第 7 位(即子网 ID 的第 7 位)恒设置为‘0’。通过这种方法构成的传感器网络 IPv6 地址将永远不会与 Internet 地址、自组网地址重复。此外,因为子网 ID 是 IP 地址的一个组成部分,所以只要各子网的子网 ID 不同,就可以保证不同子网之间的 IP 不会发生重复。

时间域:代理节点为初始节点分配地址的时间。因为代理节点为每个初始节点分配地址的时间都不同,即同一代理节点不可能同时为两个初始节点分

配地址,所以通过此域可以保证在同一代理节点分配的所有 IP 地址之中不会出现重复地址。

随机数:代理节点为初始节点分配地址时产生的 16 位随机数。

对此 IPv6 地址格式进行分析可知,通过使用此种格式,可分配地址个数达到 2^{63} 个,在网络内部任意两节点出现重复地址的可能性只有 2^{-63} ,地址冲突的可能性非常低。

2.3 协议使用的主要数据结构

代理寻找请求包 (Agent Request packet, AGENT_REQ):此包是初始节点刚加入网络时向它的一跳邻居节点发出的寻找代理节点的请求包。

代理寻找应答包 (Neighbor Acknowledgement packet, NB_ACK):此包是邻居节点对初始节点所发的 AGENT_REQ 的应答。

地址请求控制包 (Address Request packet, ADDR_REQ):初始节点根据邻居节点回应的 NB_ACK 选择出代理节点后,向代理节点发出的申请分配地址请求包。

代理应答包 (Agent Acknowledgement packet, AGENT_ACK):此包是代理节点回应给初始节点的、含有为其分配的 IP 地址信息的控制包。

重复地址更新包 (Duplicate Address Update packet, DAU):当节点发现在网络中存在至少两个代理节点 IP 不同但子网 ID 相同时,由节点发出的通知这些代理节点重新选择子网 ID 的控制包。

地址更新控制包 (Address Update packet, AU):代理节点更新子网 ID 号后,发送给自己子网内节点的通知它们更新子网 ID 号和 IP 地址的控制包。

HELLO 包:此包是网络内节点定期向邻居节点广播的控制包,用来检测网络的分割与合并。

2.4 SNMAAP 协议的地址分配算法

SNMAAP 协议的地址分配算法由图 3 进行示意。

当一个无 IP 地址的新节点加入网络时,它成为初始节点。初始节点首先在邻居范围内广播代理寻找请求包 AGENT_REQ,若在最大应答时间 MAX_TIME_OUT 内未收到任何节点回应的代理寻找应答包 NB_ACK,初始节点将认为自己周围没有任何邻居节点,网络中只有自己,从而初始节点把自己设为代理节点,并按照本协议所设计的 IPv6 地址结构,产生一个子网 ID 号、随机数,并连同产生时间一并

填入到 IPv6 地址的后三个域中,形成一个供自己使用的 IPv6 地址。此时初始节点地址分配过程完毕,并产生一个由其负责的子网。

若初始节点收到邻居节点发来的代理寻找应答包 NB_ACK,则需判断其中所包含的子网 ID 号。如果所有子网 ID 号均相同,而且代理节点 IP 也相同,初始节点将选择距此代理节点最近、IP 最小的邻居,并通过其沿最短路径向代理节点发送 ADDR_REQ。代理节点在收到此包后为初始节点分配一个 IPv6 地址,并将此 IP 地址添加到它的地址列表中。稍后代理节点将 AGENT_ACK 单播回初始节点,初始节点收到后用其中包含的 IPv6 地址作为本地 IP 地址,并记录子网 ID 号、代理节点的 IP 地址、到代理节点的路径及跳数。此时初始节点地址分配过程完毕,初始节点将自己设置为完成节点,并加入到由该代理节点负责的子网中。

```

SNMAAP Address Assignment Algorithm
// when a NEW node comes in the network
Begin
broadcast AGENT_REQ;
start a timer;
if (the NEW node does not receive any NB_ACK && elapsing time > MAX_TIME_OUT)
{ stop the timer and choose a subnetwork ID;
  allocate a IPv6 address to itself and change itself to AGENT node;
}
if (the NEW node receives NB_ACK)
{ stop the timer;
  if (there is only one subnetwork ID in all NB_ACK && the AGENT node in all NB_ACK is the same one)
  { AGENT node allocate a IPv6 address to NEW node;
    NEW node change itself to ACCOMPLISH node;
  }
  else
  { if (some AGENT nodes have the same subnetwork ID) merge ();
    select a AGENT which will allocate a IPv6 to NEW node;
    NEW node change itself to ACCOMPLISH node;
  }
}
}
End
merge()
{ do {
  make AGENT nodes select a new subnetwork ID;
} while ( all AGENT nodes have different subnetwork ID);
AGENT nodes update their IP address and tell every node which got IP address from it to update their IP address;
}
    
```

图 3 SNMAAP 协议的地址分配算法
Fig.3 SNMAAP address assignment algorithm

如果在初始节点收到的所有 NB_ACK 中出现子网 ID 号相同但相应代理节点 IP 不同的情况,则此时网络发生合并,在这些子网中可能会出现重复地址,此时首先执行合并处理过程。初始节点首先发出 DAU 控制包,命令除具有最小 IP 地址以外的所有具有相同子网 ID 的代理节点重选子网 ID,直到这些代理节点和它们已知的所有代理节点都拥有不同的子网 ID,然后这些代理节点根据新子网 ID

更新自己的 IP 地址,并向所有其曾经分配地址的节点发送 AU 包,通知它们更新自己的子网 ID 号从而更新 IP 地址。在此过程结束后,初始节点选择一个距自己最近、地址最小的代理节点,并沿最短路径向其发送地址请求控制包 ADDR_REQ,直至最终完成地址的分配。

在本协议中,初始节点不能为其他初始节点转发控制包,因此如果在初始节点周围只有初始节点时,邻居初始节点在收到各种控制包后将不做任何处理,直接丢掉,此后初始节点将认为在其周围没有代理节点,从而令自己成为代理节点并为自己分配地址。

因为网络内同时出现两个代理节点的子网 ID 号及 IP 地址均相同的概率只有 2^{-63} ,非常低,所以本协议对网内同时出现两个代理节点子网 ID 号及 IP 地址均相同的这种情况不予考虑。

2.5 协议对网络分割和合并现象的支持

在传感器网络中,由于初始节点的出现、传感器节点的移动以及由于节点能源耗尽造成节点失效等原因,都会使网络拓扑结构发生改变,从而网络出现分割或合并。为了更好的完成数据传输,地址配置协议必须能够支持网络的分割与合并,保证地址的成功分配以及地址的唯一性。

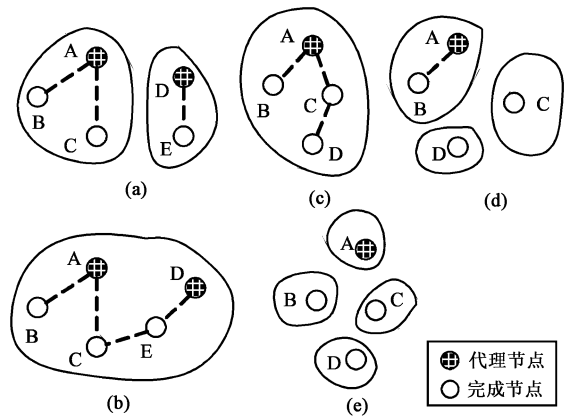


图 4 网络的分割和合并
Fig.4 Network partitioning and merging

当由于初始节点的出现而使子网出现合并时,初始节点将使用 2.4 中叙述的方法完成对子网合并的处理和地址的分配,并保证地址的唯一性。由于节点的移动而使子网发生合并的情况由图 4(a)和 (b)进行示意。图 4(a)表示在节点移动以前,传感器网络内有两个子网,第一个子网由 A、B、C 三个节

点组成,第二个子网由 D、E 两个节点组成。在图 4 (b)中完成节点 E 移动后成为完成节点 C 的邻居节点,并通过周期性发送的 HELLO 消息得知彼此的存在,此时子网发生合并。C 和 E 交换消息后如果发现两个代理节点的子网 ID 相同,则选择 IP 较小的节点,例如 C,采用 2.4 中的方法完成对子网合并的处理,并保证网络地址的唯一性。当发现子网合并的两个节点都是代理节点或是代理节点与完成节点时,也采用这种方法完成对网络合并的处理。

图 4 中(c)、(d)和(e)示意了由于节点移动而造成网络分割的情况。如(c)中所示,在传感器网络原有 A、B、C、D 四个节点,A 为代理节点。在(d)中,A 和 D 根据周期性发送的 HELLO 消息得知 C 由于移动而离开网络。此时 D 修改自己的记录表,将去往代理节点的跳数设置为无穷大,从此刻开始完成节点 D 不再处理任何初始节点发送的 AGENT_REQ。完成节点 B 由于仍然是 A 的邻居节点,因此它仍可以为初始节点转发 AGENT_REQ。(e)中示意了由于代理节点移动造成网络分割的情况,B、C 通过 HELLO 消息得知 A 离开后,与(d)相同,修改自己的记录表,将去往代理节点的跳数置为无穷大,并通知所有通过自己转发申请的节点,例如 D,原路径不再可用。D 收到通知后也修改自己的记录表并将此消息广播下去。从此刻开始这些完成节点不再转发任何初始节点发送的 AGENT_REQ。当它们周围出现初始节点时,如果仍然没有可用的代理节点,初始节点将使自己成为代理节点。对于节点因能量耗尽而从网络中消失,造成网络分割的情况,可采用和(d)、(e)相同的原理将能源耗尽节点视为一个因移动而离开的节点进行处理。

2.6 协议在数据传输过程中的处理

在本协议中,地址冲突的节点只可能存在于具有相同子网 ID 的不同子网内,由于无线传感器网络范围一般较大,出现具有相同子网 ID 的两个子网很可能出现在网络的两端,因此如果只依赖初始节点和子网合并并不能完全发现可能出现地址冲突的子网,必须在数据发送过程中对数据传输路径上的子网继续进行监测。在本协议中,要求节点在发送数据时,将本子网的代理节点 IP 包含在数据包中,传输路径上的节点就可以根据此 IP 进行判断。当发现可能出现地址冲突时,由进行判断的节点通过 2.4

中的方法令这些代理节点重选子网 ID,并更新 IP 地址,从而避免冲突。由本文设计的 IPv6 地址结构可知,出现两个代理节点 IP 不同但子网 ID 相同的可能性只有 $\frac{2^{32}-1}{2^{63}}$,因此在子网合并时重选子网 ID 的概率很低。

3 协议分析

在地址配置协议中,分配 IP 地址出现冲突的概率是重要的衡量指标,此概率主要和地址空间的大小以及节点数量有关,地址空间越大,节点越少,出现冲突的概率就越低。

定理 1 设网络内共有 n 个节点,在大小为 r 的地址空间中随机选择地址,地址出现冲突的概率 $p_c(r, n)$ 为:

$$p_c(r, n) \approx 1 - e^{-n} \left(1 - \frac{n}{r}\right)^{n-r-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

证明:网内的第 1 个节点在分配地址时,肯定可以获得一个全网唯一的 IP 地址,第 2 个节点也可以获得一个全网唯一的地址的概率为 $\frac{r-1}{r}$ 。以此类推,网络中 n 个节点随机选择地址都不会产生冲突的概率 $p_n(r, n)$ 可用公式(2)来进行表示。通过应用 Stirling 公式(3),可得公式(4),最后可得出出现冲突的概率 $p_c(r, n)$ 的表达式(5)。

$$p_n(r, n) = \frac{r}{r} \cdot \frac{r-1}{r} \cdot \frac{r-2}{r} \cdots \frac{r-n+1}{r} = \frac{r!}{r^n (r-n)!} \quad (2)$$

$$n! \approx \sqrt{2\pi n} \cdot n^n \cdot e^{-n} \quad (3)$$

$$p_n(r, n) \approx \frac{r^{r+\frac{1}{2}} \cdot e^{-r}}{r^n \cdot (r-n)^{r-n+\frac{1}{2}} \cdot e^{n-r}} = \left(1 - \frac{n}{r}\right)^{n-r-\frac{1}{2}} \cdot e^{-n} \quad (4)$$

$$p_c(r, n) = 1 - p_n(r, n) \approx 1 - e^{-n} \left(1 - \frac{n}{r}\right)^{n-r-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

通过考虑已分配地址,地址配置协议可以进一步降低地址冲突的概率。但是由于路由协议的延迟、网络合并、多节点同时分配地址等原因,节点在随机选择 IP 时,其所知已分配地址通常为全部已分配地址的一个子集。

定理 2 设网络内共有 n 个节点, j 为节点未知的已分配地址的个数, 则 n 个节点在大小为 r 的地址空间中随机选择地址出现冲突的概率 $p_c(r, n, j)$ 为:

$$p_c(r, n, j) \approx 1 - \left(\frac{re}{r-n+j} \right)^{-j} \left(1 - \frac{j}{r-n+j} \right)^{n-r-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

证明: 网络中 n 个节点随机选择地址都不会产生冲突的概率 $p_n(r, n, j)$ 可用公式(7)来进行表示。通过应用 Stirling 公式(3), 最后可得出出现冲突的概率 $p_c(r, n, j)$ 的表达式(8)。

$$p_n(r, n, j) = \frac{r}{r} \cdot \frac{r-1}{r} \cdots \frac{r-j}{r} \cdot \frac{r-1-j}{r-1} \cdots \frac{r-2-j}{r-2} \cdots \frac{r-n+1}{r-n+j+1} \\ = \frac{(r-n+j)!}{r^j (r-n)!} \quad (7)$$

$$p_c(r, n, j) = 1 - p_n(r, n, j) \\ \approx 1 - (r \cdot e)^{-j} \frac{(r-n+j)^{r-n+j+\frac{1}{2}}}{(r-n)^{r-n+\frac{1}{2}}} \\ \approx 1 - \left(\frac{re}{r-n+j} \right)^{-j} \left(1 - \frac{j}{r-n+j} \right)^{n-r-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

由公式(8)可知, 随着 j 的增加, $p_c(r, n, j)$ 也逐渐增加, 当 $j=0$ 时, 节点已知所有已分配地址, 此时地址冲突的概率为 0。当 $j=n$ 时, 节点不知道任何已经分配的地址, 此时公式(8)等于公式(1)。因此, SNMAAP 协议相比未知已分配地址的地址配置协议降低了冲突的概率。由公式(1)、(8)可知, r 越大, 地址冲突的概率就越低, 由于 $r_{SNMAAP} = 2^{63}$, 非常大, 所以 SNMAAP 协议又进一步降低了地址冲突的概率。

4 仿真实验

为了评估协议的性能, 本文将 SNMAAP 协议于 OPNET Modeler 仿真平台上进行了仿真, 并与具有代表性的 IPv6 Stateless Autoconfiguration 协议和 MANETconf 协议进行了比较。

4.1 仿真参数和场景

为了考察协议的性能, 在仿真过程中, 主要考察协议的以下性能指标:

协议开销: 协议中节点为了产生地址和保证地

址唯一所发送的控制包的总个数。

协议总延迟: 从网络初始化开始到所有节点均具有唯一地址为止, 这段时间的长度。

协议平均延迟: 网络内每一个初始节点从开始初始化到确定已经为自己配置了一个唯一 IP 地址为止的这段时间的平均时间长度。

重复检测开销: 从节点检测到网络合并到解决地址冲突所发送或转发的数据包总数。

本文在仿真时, MAC 层协议使用 IEEE802.11 CS-MA/CA, 无线收发机数据率为 1024bps, 带宽为 10kHz, 最小频率为 30MHz, 节点的传输半径为 20m, 初始化时节点所处位置的坐标是在整个活动区域内随机产生的, 节点以一定时间间隔逐个开始工作。因为在无线传感器网络内节点的移动都比较缓慢, 甚至静止不动, 因此在仿真时设置各节点最大运动速度为 1mm/s, 节点的运动采用随机停靠点(random waypoint)模型^[17]。为了考察节点密度、数量对协议性能的影响, 仿真时选择较大、小规模的两个网络场景。

场景一: 小规模的网络, 一般节点个数为几十个。本文选择有 50 个节点的网络场景, 仿真区域为 100m × 100m 的正方形区域。

场景二: 较大规模的网络, 节点个数一般为上百个。在本文中为 1km × 1km 正方形仿真区域, 节点个数为 100 个。

4.2 仿真结果

在场景一所设计的网络环境下, 对 SNMAAP 协议、IPv6 Stateless Autoconfiguration 协议和 MANETconf 协议针对协议开销这一性能进行仿真, 仿真结果如图 5 所示。

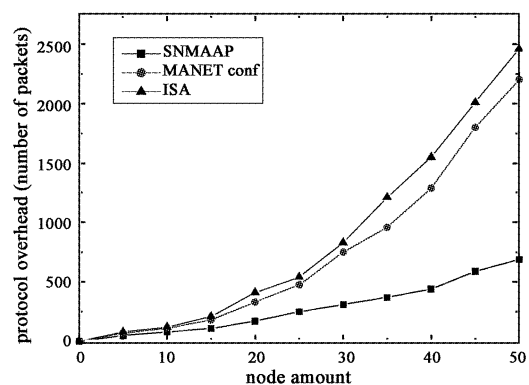


图 5 小规模网络下的协议开销

Fig.5 Protocol overhead in small scale network

从仿真结果可知随着传感器节点个数的增加, SNMAAP 协议和 IPv6 Stateless Autoconfiguration 协议、MANETconf 协议的开销均增大, SNMAAP 协议的开销类似于线性增长, 而后两种协议的开销近似于指数增长, 当节点个数相同时 IPv6 Stateless Autoconfiguration 协议和 MANETconf 协议的开销明显大于 SNMAAP 协议。从图中可以看出, 节点数量越多, 本协议在开销方面的优势就越明显。这是因为对于 IPv6 Stateless Autoconfiguration 协议和 MANETconf 协议, 每个节点需采用全网泛洪来进行地址唯一性的检测, 随着节点个数的增加, 协议开销明显增大。对于 SNMAAP 协议, 代理节点在分配地址时便可以保证地址在子网内唯一, 只在子网合并时检测重复地址, 因此不必进行全网泛洪, 大大降低了开销。

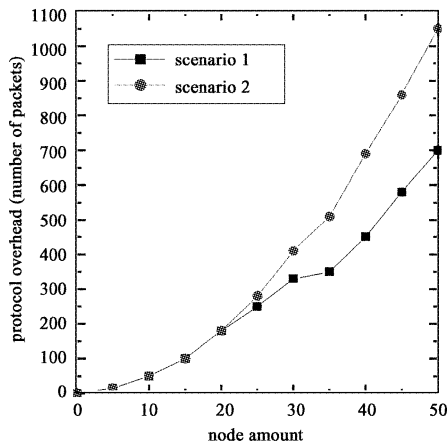


图 6 网络场景大小对协议开销的影响

Fig.6 The influence of the size of network scenarios

图 6 考察了在不同节点密度情况下, SNMAAP 协议产生的开销。从图中可知, 随着节点密度的增加, 协议开销也随之增加。图 7 示意了在场二所设计的大规模网络中对三种协议总延迟的比较, 从图中可见随着节点个数的增加, SNMAAP 的总延迟也随之增加, 但增加的幅度远低于其他两种协议。

图 8 是对网内每个节点分配地址的平均时延的比较。随着节点数量的增加, 每个节点地址分配过程的时间随之增加, 但从图中可以看出, 相对 IPv6 Stateless Autoconfiguration 协议和 MANETconf 协议, SNMAAP 协议的平均延迟递增的幅度较小, 增长较缓慢。

对于引起重复地址检测的两相邻子网代理节点 IP 不同但子网 ID 一致的情况, 由本文设计的 IPv6

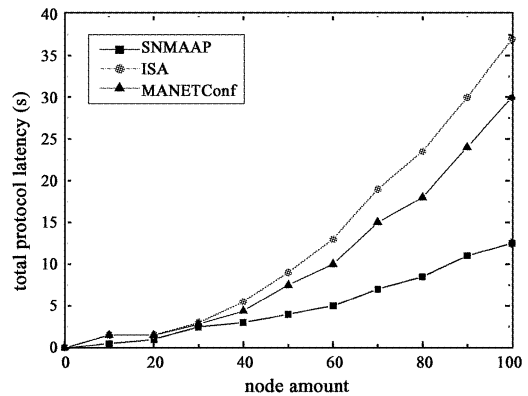


图 7 协议总延迟比较

Fig.7 Total protocol latency

地址结构可知出现这种情况的可能性只有 $\frac{2^{32} - 1}{2^{63}}$,

因此在仿真时很难出现。为了模拟这种情况的发生, 只有在仿真过程中人为的进行控制, 这样才能统计这部分开销的大小。在仿真过程中设置在场景一中存在 10 个节点, 让节点 node_0 和节点 node_8 成为代理节点, 它们 IP 地址不同, 但拥有相同的子网 ID 号, 让节点 node_9 最后加入网络且令其连接由 node_0 和 node_8 负责的两个子网。仿真结果如表 1 所示, SNMAAP 协议的重复地址检测开销小于 IPv6 Stateless Autoconfiguration 协议和 MANETconf 协议。

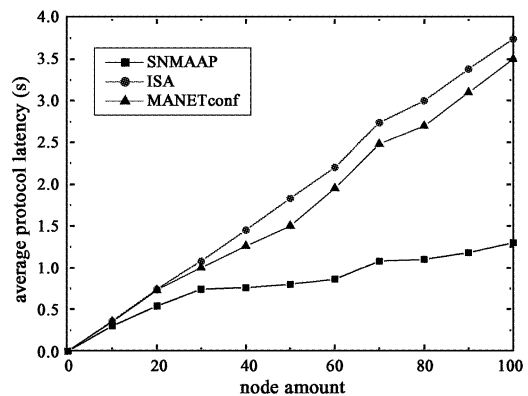


图 8 协议平均延迟比较

Fig.8 Average protocol latency

表 1 重复地址检测开销

Table 1 Overhead of duplicate address detection

协议	发送控制包的数量
IPv6 Stateless Autoconfiguration	23
MANETconf	20
SNMAAP	12

5 结论

本文根据无状态地址配置协议的设计原则,设计了一种基于多代理的无线传感器网络 IPv6 地址自动配置协议 SNMAAP。该协议通过对 IPv6 的研究,详细设计了 IPv6 地址结构来减少网内地址出现冲突的可能性。此方法还引入了状态信息,将节点分为代理节点、初始节点和完成节点,节点处于不同状态,所承担的责任也不同。在本协议中,每个节点通过发送查询包找到网络内的代理节点,由代理节点为其分配地址。节点通过对邻居节点信息中所包含的代理节点信息进行分析,判断是否有发生地址冲突的可能,只有在有可能的情况下才进行地址的更新,通过这种方式可以减少地址配置过程中控制包的开销。在仿真实验中,通过对比 IPv6 Stateless Autoconfiguration 协议、MANETconf 协议和本文所设计的 SNMAAP 协议的性能,可以看出在相同条件下,SNMAAP 协议不仅实现了地址的唯一分配,而且在协议开销、时延及重复检测开销上均有较大优势。

参考文献:

- [1] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282 - 1291. [REN Feng-yuan, HUANG Hai-ning, LIN Chuang. Wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2003, 14(7): 1282 - 1291(in Chinese).]
- [2] 崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 李天璞, 刘巍, 赵泽. 无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163 - 174. [CUI Li, JU Hai-ling, Miao Yong, LI Tian-pu, LIU Wei, ZHAO Ze. Overview of wireless sensor networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 42(1): 163 - 174(in Chinese).]
- [3] Droms R. Dynamic Host Configuration Protocol[EB/OL]. Network Working Group, IETF, RFC 2131, (Mar 1997)[Mar 2008]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2131.txt>
- [4] Vaidya M H. Weak duplicate address detection in mobile ad hoc networks[C]//Proceedings of ACM MobiHoc 2002, Lausanne, Switzerland, June, 2002: 206 - 216.
- [5] Weniger k. Passive duplicate address detection in mobile ad hoc networks[C]//Proceedings of IEEE WCNC 2003, New Orleans, USA, Mar 2003: 1504 - 1509.
- [6] Thomson S. IPv6 Stateless Address Autoconfiguration[EB/OL]. Network Working Group, IETF, RFC 2462, (December 1998)[Mar 2008]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2462.txt>.
- [7] Weniger K, Zitterbart M. IPv6 autoconfiguration in large scale mobile ad hoc networks[C]//Proceedings of European Wireless 2002, Florence, Italy, February 2002, 1: 142 - 148.
- [8] Perkins C E, Malinen J T, Wakikawa R, Belding-Royer E M, Sun Yuan. IP Address Autoconfiguration for Ad Hoc Networks[EB/OL]. Mobile Ad Hoc Networking Working Group, INTERNET DRAFT, (14 November 2001)[Mar 2008]. <http://tools.ietf.org/html/draft-perkins-manet-autoconf-01.txt>
- [9] ZHAO Yun-long, YANG Xiao-zong, YANG Nan, GAO Zhen-guo. IPv6 address assignment in MANETs[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(1): 52 - 59.
- [10] Nesargi S, Prakash R. MANETconf: configuration of hosts in a mobile ad hoc network[C]//Proceedings of Twenty - First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002), IEEE, 23 - 27 June 2002, 2: 1059 - 1068.
- [11] Mansi R T, Ravi P. A distributed protocol for dynamic address assignment in mobile ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(1): 4 - 19.
- [12] McAuley A J, Manousakis K. Self-configuring networks[C]//Proceedings of 21st Century Military Communications Conference (MILCOM 2000), 22 - 25 Oct 2000, 1: 315 - 319.
- [13] Misra A, Das S, McAuley A, Das S K. Autoconfiguration, Registration, and mobility management for pervasive computing[J]. Personal Communications, IEEE, 2001, 8(4): 24 - 31.
- [14] Patchipulusu P. Dynamic address allocation protocols for mobile ad hoc networks[D]. Texas A&M University, Aug 2001.
- [15] Jobin J, Krishnamurthy S V, Tripathi S K. A scheme for the assignment of unique addresses to support self-organization in wireless sensor networks[C]//Vehicular Technology Conference 2004, 26 - 29 Sept 2004, 6: 4578 - 4582.
- [16] Hinden R, Deering S. IP Version 6 Addressing Architecture[EB/OL]. Network Working Group, IETF, RFC 2373, (July 1998)[Mar 2008]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2373.txt>.
- [17] Camp T, Boleng J, Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research[J]. Wireless Communication & Mobile Computing: Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications, 2002, 2(5): 483 - 502.

作者简介: 罗丹彦(1979 -), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事移动计算、无线传感器网络、自组网等方面的研究。
通信地址: 哈尔滨工业大学 415 信箱(150001)
电话: (0451)86414093
E-mail: luody@ftcl.hit.edu.cn