

# 无线传感器网络与 IPv6 网络的互联互通

王晓楠<sup>1,2</sup>, 唐振民<sup>2</sup>, 钱焕延<sup>2</sup>

(1. 常熟理工学院计算机科学与工程学院, 常熟 215500; 2. 南京理工大学, 南京 210094)

**摘 要:** 设计无线传感器网络(WSN)与 IPv6 网络无缝互联的通信模型, 给出一种传感器地址自动配置算法, 实现传感器节点的自动路由寻址。提出一种适用于 WSN 的 IPv6 协议裁剪方案, 以节省传感器节点的功耗。在实验平台以及仿真环境中实现了该模型, 并对其性能进行分析, 实验结果证明了该模型的有效性和正确性。

**关键词:** 无线传感器网络; IPv6 网络; 路由

## Intercommunication Between Wireless Sensor Network and IPv6 Network

WANG Xiao-nan<sup>1,2</sup>, TANG Zhen-min<sup>2</sup>, QIAN Huan-yan<sup>2</sup>

(1. Computer Science and Engineering School, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500;

2. Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094)

**【Abstract】** This paper designs a model to implement a seamless communication between a Wireless Sensor Network(WSN) and an IPv6 network. This model creates an automatic address configuration algorithm in a sensor network, and based on the algorithm this model performs automatic routing and addressing. It puts forward a reduced IPv6 protocol stack to save a sensor node's power. This model is implemented in both an experimental platform and a simulation environment, and its performance is analyzed. Experimental results prove the validity and correctness of this model.

**【Key words】** Wireless Sensor Network(WSN); IPv6 network; routing

### 1 概述

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)已经成为当前国际上备受关注的、知识高度集成的前沿热点研究领域之一。TCP/IP 的广泛应用使 Internet 成为有线网络事实上的协议标准, 并且其应用范围正逐步向无线领域拓展, IPv6 的良好特性也使得某些 WSN 的应用成为可能, 因此, 如何实现 WSN 与 IPv6 网络的互联已成为当前的研究热点。

近年来出现了很多针对 WSN 的新路由协议和设计方案<sup>[1-4]</sup>。但是, 它们大都只适用于传感器网络内部节点之间的寻址路由, 不能适用于传感器节点与有线网络, 特别是 Internet 网络节点之间的寻址路由。文献[5]提出一种分布式的、基于地理位置信息的传感器节点地址自动分配方案。该方案对于节点相对分散的 WSN 具有一定的实用性, 但对于节点分布密集的情况仍存在问题。对于网络协议的裁剪, 研究人员提出了很多方法<sup>[6]</sup>, 但这些方法中绝大部分是指数级时间和空间复杂度, 并不适用于传感器网络。因此, 如何优化网络协议栈以适合传感器网络使用还有待进一步探讨和研究。

### 2 通信模型

本文的研究主要应用于环境监测、危险区域远程控制等领域, 因此, 本文的研究对象主要也是静态传感器网络, 即传感器网络中的节点不能移动。此外, 模型定义 IPv6 网络与 WSN 的接入节点为 IPv6 接入节点, 以 IPv6 接入节点为根节点的树称作 IPv6 接入节点树, 还假设 IPv6 接入节点不受电量以及存储空间等硬件条件的限制。

#### 2.1 传感器节点地址格式

根据 IPv6 地址的分层结构以及传感器网络自身特点, 传感器节点与 IPv6 接入节点地址采用的格式如图 1 所示。

3	13	8	24	16	32	32
FP	Sensor Network Prefix					Sensor Network Node ID

图 1 地址格式

在该模型中, 一个传感器节点的 IPv6 地址分为 3 个部分:

- (1)可聚合全局地址格式前缀, 取值范围与 Unicast 相同, 即 001;
- (2)随后的 93 bit, 即传感器网络地址前缀, 一个传感器网络中所有传感器节点的 IPv6 地址的网络地址前缀都相同;
- (3)传感器节点 ID, 它唯一地标识一个传感器网络中的一个传感器节点。

如果一个新的传感器节点加入传感器网络, 它首先会获取一个 IPv6 地址以便与其他(传感器节点或 IPv6 节点)节点进行通信。传感器节点的 IPv6 地址分为 2 个部分, 即 96 bit 传感器网络前缀与 32 bit 传感器节点 ID, 其中, 96 bit 传感器网络前缀来源于传感器节点所属的 IPv6 接入节点的 IPv6 地

**基金项目:** 江苏省教育厅自然科学基金资助项目(09KJD520001); 中国博士后科学基金资助项目(20090451217)

**作者简介:** 王晓楠(1973—), 女, 讲师、博士, 主研方向: 下一代网络体系结构及协议; 唐振民, 教授、博士、博士生导师; 钱焕延, 教授、博士生导师

**收稿日期:** 2009-06-13 **E-mail:** wxn\_2001@163.com

址的传感器网络前缀。本模型将 32 bit 的传感器节点 ID 划分为 8 个等级, 每个等级由 4 bit 组成, 其中 IPv6 接入节点的级别最高。一个传感器网络区域内最多可以包括 16 棵以 IPv6 接入节点为根节点的树, 此树的深度最多可达到 8, 而树中的每个节点最多可以拥有 16 个孩子节点。例如, 在一个传感器网络中, 如果 IPv6 接入节点的 IPv6 地址为 3FE8:1:1:1:1:1:1000::/96, 并且以此接入节点为根节点建立一棵树, 那么此树根的孩子节点地址就是 3FE8:1:1:1:1:1:1X00::, 其中,  $X=1, 2, \dots, F$ , 依次类推。

## 2.2 传感器节点获取 IPv6 地址的过程

在本文的模型中, 传感器网络中的传感器节点用 2 个字节(16 bit 分别表示 16 个可分配的地址, 0 表示未分配, 1 表示已分配)记录其当前可以分配的和已经分配的地址的状态。本模型采用下述无状态自动地址配置算法来获取 IPv6 地址:

- (1)传感器节点  $X$  发送获取 IPv6 地址的 Join 消息。
- (2)在 Join 消息覆盖范围内的传感器节点  $A$  接收到 Join 消息之后, 如果  $A$  有剩余的地址资源可供分配, 则它会向  $X$  返回一个 Response 消息, 此消息包括将要分配的 IPv6 地址。
- (3) $X$  在规定时间内可能接收到多个节点返回的 Response 消息, 它会根据 Response 消息中的 IPv6 地址计算出返回 Response 消息的传感器节点距离所在 IPv6 接入节点树树根节点的跳数(4 bit 为 1 跳), 然后选择跳数最少的节点作为父节点, 同时向父节点返回一个 ACK 确认消息; 如果  $X$  在规定时间内没有接收到任何 Response 消息, 则转到(1)。
- (4)父节点收到 ACK 确认消息之后, 它会将地址控制字节的相应位设置为 Occupied, 即 1。

至此, 传感器节点成功获取 IPv6 地址。在本模型中, 传感器节点可能在规定的时间内没有接收到任何 Response 消息, 由于 WSN 中的节点密度足够大, 因此随着新节点的不断加入, 传感器节点如果不断地重复上述(1)的操作, 最终会收到 Response 消息。

由上文可知, 一个传感器节点获取 IPv6 地址的过程实际上就是它加入一个 IPv6 接入节点树的过程, 如图 2 所示。传感器节点根据上述过程获取了 IPv6 地址: 3FE8:1:1:1:1:1:1220::/96。

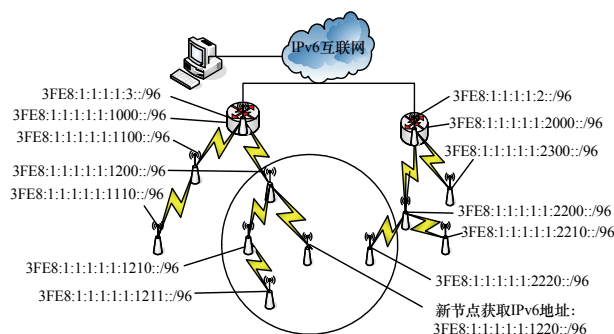


图 2 传感器节点获取 IPv6 地址的过程

## 2.3 释放地址空间的过程

在本模型中, 假设传感器节点电量是不可重新增加的, 那么当传感器节点的电量少于一定阈值时, 本模型就认为此节点失效。当传感器节点  $X$  检测到自己即将失效时, 它会向其父节点发送一个 Leave 消息。父节点接收到 Leave 消息后, 会将地址控制字段的相应位设置为 Free(即 0)。此外,  $X$  还需要通知其子孙节点重新获取 IPv6 地址。

## 2.4 IPv6 协议栈

考虑到传感器节点存储器容量小、计算能力比较弱等特点, 本模型按照如下几个部分对 IPv6 协议进行裁剪:

### (1)IPv6 报头裁剪

IPv6 报文头部的设计原则是将头部开销减小到最低, 所以 IPv6 使用固定长度的头部以及扩展头部的方式实现扩展。对于 WSN 而言, 由于报文处理比较简单, 因此可以不实现扩展头部。另外, IPv6 报文头部的 Version, Traffic Class 和 Flow Label 域一般情况下都是常数, 而 Payload Length 的值可以通过 MAC 帧中的长度域计算出来, 因此, 可以对 Version, Traffic Class, Flow Label, Payload Length, Next Header 域进行压缩。根据 IEEE802.15.4 MAC 帧的设计思想, 本模型为 IPv6 报文引入一个控制域, 在控制域后是 IPv6 头部其他域以及 IPv6 报文载荷, 具体的报文格式如图 3 所示。

字节数: 1	可变
头部控制	IPv6 头部和数据负载

图 3 压缩的 IPv6 报文格式

控制域中的每位控制着 IPv6 报文头部各个域的格式, 具体的格式如图 4 所示。

0	1~2	3	4	5~7
Version, Traffic Class, Flow Label	Next Header	源地址	目的地址	保留

图 4 IPv6 头部控制域

IPv6 头部控制域中每个位的具体含义如下:

- 1)Version, Traffic Class, Flow Label:
  - 0: 没有压缩, 即在报文中存在;
  - 1: Version=6, Traffic Class=0, Flow Label=0。
- 2)Next Header:
  - 00: 没有压缩, 即在 Payload 中存在 Next Header;
  - 01: IPv6 载荷是 ICMPv6 报文;
  - 10: IPv6 载荷是 UDPv6 报文;
  - 11: 预留, (因为 WSN 一般不实现 TCP)。
- 3)源地址:
  - 0: 没有压缩, 即在报文中是 128 bit;
  - 1: 压缩地址。
- 4)目的地址:
  - 0: 没有压缩, 即在报文中是 128 bit;
  - 1: 压缩地址。

### (2)地址压缩

本模型在传感器网络内部采用内部地址(即 IPv6 地址的后 32 位传感器节点 ID)实现传感器节点的路由寻址。根据本模型传感器地址的结构特点, 如果一个传感器节点位于 IPv6 接入节点树的第 3 层, 那么它的传感器节点 ID 有效位只是前边的 12 位, 后边的 20 位都是 0, 因此, 为了节省传感器节点资源, 这里只传输地址有效位, 即 2 个字节。如果一个 IPv6 节点与一个传感器节点进行通信, 那么 IPv6 节点地址在传感器网络内部只被传输与传感器节点当前所在 IPv6 接入节点树树根节点的 IPv6 地址不同的部分, 例如: 如果树根节点的 IPv6 地址为 3fe8:1:1:1:1:1:1000::/96, 而 IPv6 节点的地址为 3fe8:1:1:1:1:1:12:1:1, 那么在传感器网络中, IPv6 地址被压缩为 2:1:1:1, 由于前边的地址前缀与树根节点相同, 因此不在传感器网络中传输。

## 2.5 路由分析

当 IPv6 节点获取了某个传感器节点  $X$  的地址, 并想与之通信时, 它会发送一个 IPv6 请求消息, 此消息会被网络系统路由到  $X$  所在的 IPv6 接入节点树的树根节点  $T$ 。  $T$  首先剪裁 IPv6 报文(包括压缩源和目的地址), 然后将报文按照  $X$  的地址进行路由推进, 最后此消息达到  $X$ 。

$X$  处理完 IPv6 请求消息之后, 会向 IPv6 节点返回一个响应消息, 此消息首先到达其所在 IPv6 接入节点树的树根节点  $T$ ,  $T$  还原消息, 包括还原源和目的地址以及消息内容, 然后将其按照正常的路由方式路由到目的 IPv6 节点。至此, IPv6 节点与传感器节点的一次交互完成, 如图 5 所示。

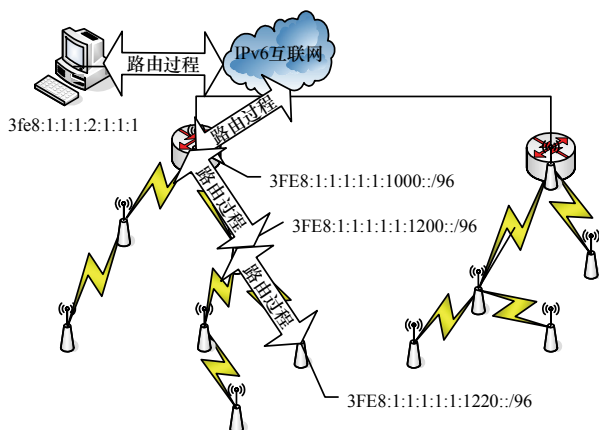


图 5 IPv6 节点与传感器节点的路由过程

IPv6 节点 3fe8:1:1:1:2:1:1:1 向 IPv6 地址为 3fe8:1:1:1:1:1220/96 的传感器节点发送了一个 IPv6 消息, 该消息按照正常路由方式到达 IPv6 接入节点树树根节点 3fe8:1:1:1:1:1000/96, 根节点首先将消息中的源地址、目的地址以及消息内容进行剪裁压缩, 然后按照传感器地址将消息发送给树根节点的子节点 3fe8:1:1:1:1:1200/96, 同样, 节点 3fe8:1:1:1:1:1220/96 再将该消息发送给它的子节点 3fe8:1:1:1:1:1220/96, 至此, 消息路由到目的节点。

传感器节点处理完消息之后, 它向 IPv6 节点返回一个响应消息, 此消息首先被路由到它的父节点 3fe8:1:1:1:1:1200/96, 父节点将消息路由到它的父节点 3fe8:1:1:1:1:1000/96, 树根节点接收到此消息之后, 对消息进行还原操作, 然后按照正常的路由方式将消息路由到目的 IPv6 节点。

## 3 实验结果与分析

本文在小型的实验平台上测试了传感器节点与 IPv6 节点通信的正确性和连续性。实验平台采用 MPR2400 Micaz 节点来测试本模型的有效性, Micaz 节点采用 Chipcon 公司的兼容 IEEE802.15.4 链路层协议的 CC2420 射频芯片, 整个实验环境的拓扑结构见图 5。其中, IPv6 节点安装了 IPv6 协议栈, 其 IPv6 地址为 3fe8:1:1:1:2:1:1:1; 传感器节点的 IPv6 地址是自动配置的。在实验平台上, 首先测试了传感器节点与 IPv6 节点是否能进行无缝连接, 通过在 IPv6 节点上向传感器节点(IPv6 地址为 3fe8:1:1:1:1:1220/96)发送 Ping 报文来确定传感器节点的可达性, 实验结果如图 6 所示。



图 6 传感器节点与 IPv6 节点互通的实验结果

实验采用 2 节普通电池给 MPR2400 Micaz 节点供电, 在报文没有压缩的情况下, 节点每秒钟向 IPv6 节点传送一次采集的光信号信息(2 Byte 数据)。在没有压缩报文的情况下, 节点的寿命是 8 天, 使用压缩算法之后, 节点的寿命延长至 14 天, 可见本模型能有效地降低传感器节点发送 IPv6 报文消耗的能量, 从而延长节点的寿命, 此外, 本模型中的传感器节点能自动完成路由选择, 而无需发送路由信息也降低了传感器节点消耗的能量。

在本模型中, IPv6 节点可以通过传感器地址推断出传感器的大概物理位置, 也就是整个 WSN 的拓扑结构, 这对环境监测、危险区域远程控制等领域来说是非常实用的。

## 4 结束语

本文提出 IPv6 网络与 WSN 无缝连接的通信模型, 并在小型的实验平台以及仿真环境下分别测试了该模型的可行性与有效性。WSN 与 IPv6 网络互联虽然是一个研究热点, 但是其相关研究还处于初级阶段, 因此, 还有很多问题有待进一步研究和讨论。

## 参考文献

- [1] Akkaya K, Younis M. A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 325-349.
- [2] IETF Draft. Transmission of IPv6 Packets over IEEE802.15.4 Networks[Z]. 2007-03.
- [3] Olivier B, Florence M, Laurent M. Modeling and Analysis of Wireless Sensor Networks[Z]. (2006-01-01). <http://pop-art.inrialpes.fr/~girault/Synchron06/Slides/samper.pdf>.
- [4] Olvezky P C, Thorvaldsen S. Formal Modeling and Analysis of the OGDC Wireless Sensor Network Algorithm in Real-time Mode[C]// Proc. of IPDPS'06. Rhodes, Greece: [s. n.], 2006.
- [5] Dunkels A, Voigt T, Alonso J. Making TCP/IP Viable for Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of EWWSN'04. Berlin, Germany: [s. n.], 2004.
- [6] IETF Draft. 6LoWPAN[Z]. 2007-03.

编辑 顾姣健